Estimación de la tasa de sobrepaso promedio del oleaje para muros costeros de sección transversal curva

INTRODUCCIÓN

El diseño de obras de defensa de costas requiere cuantificar a partir de datos de campo o ensayos en modelos reducidos el fenómeno de rebase del oleaje sobre la coronación de las mismas. La determinación de la altura de coronación, así como, otros parámetros que definen la geometría de la estructura, es un punto crítico en el diseño, el cual debe basarse en un compromiso adecuado entre la economía de la obra y su comportamiento hidráulico frente al oleaje. La mayoría de los trabajos de investigación del Remonte y Rebase del oleaje se han dedicado al caso de diques en talud (convencionales), y otra cantidad a los diques verticales, quedando el área de muros de sección curva realmente poco investigada. A continuación se presenta de forma sintética el desarrollo y resultados de trabajos de investigación para la obtención de un modelo matemático determinístico, el cual es obtenido a través de ensayos de modelación física con oleaje irregular.

ENSAYOS EN UN TANQUE DE OLEAJE DE MUROS COSTEROS DE SECCIÓN TRANSVERSAL CURVA

El mismo se desarrolló en un tanque de oleaje del Centro de Estudios de Puertos y Costas de España utilizando las técnicas más modernas de generación de oleaje irregular. El tanque tiene las dimensiones siguientes: 50,0 m de largo, 6,0 m de ancho y 0,70 m de profundidad. Se dividió en tres encauzamientos de un metro de ancho. Se estudiaron tres alternativas de forma simultánea, sometidas a diferentes escalones de altura de olas y período pico del espectro tipo JONSWAP, con dos diferentes factores de apuntamiento espectral, se colocaron dos sensores para medir alturas de ola. A continuación se

Resumen / Abstract

El presente trabajo muestra los resultados de un estudio experimental a través de la modelación física, en un tanque de oleaje dotado de un generador de oleaje irregular del Centro de Estudio de Puertos y Costas (CEPYC) de España. Se obtiene un modelo empírico para la estimación de la tasa de sobrepaso promedio del oleaje de tormenta en muros costeros de sección transversal curvas. Las condiciones de estudio seleccionadas reflejan el entorno ambiental y el clima marítimo de las costas cubanas. Los resultados obtenidos son aplicados a una importante zona costera del litoral cubano, el conocido Malecón de la Habana, el cual sufre severos daños durante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos generados en el Golfo de México. Los resultados son mostrados en tablas y gráficos.

Palabras clave: *modelación física, oleaje de tormenta, muros costeros*

The paper presented shows the results of an experimental study by physical model, in a tank of irregular waves at the Center of Studies in Ports and Coasts (CEPYC) in Spain. An empiric model is obtained to estimate the average rate of overtopping of the storm wave over curved seawalls. The conditions selected for the study reflect the environmental characteristics and marine climate of the Cuban coasts. The results obtained are applied to the well known Malecón de la Habana which suffers severe damages during the occurrence of meteorological phenomena generated in the Gulf of Mexico. The results are shown in tables and graphics.

Keywords: *physical modeling, storm waves, coastal walls*

Dr. Ing. Luis F. Córdova López, Profesor Titular, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE
email: luis@cih.ispjae.edu.cu

presenta un esquema de la instalación experimental, figura 1. (CEDEX, 1989)

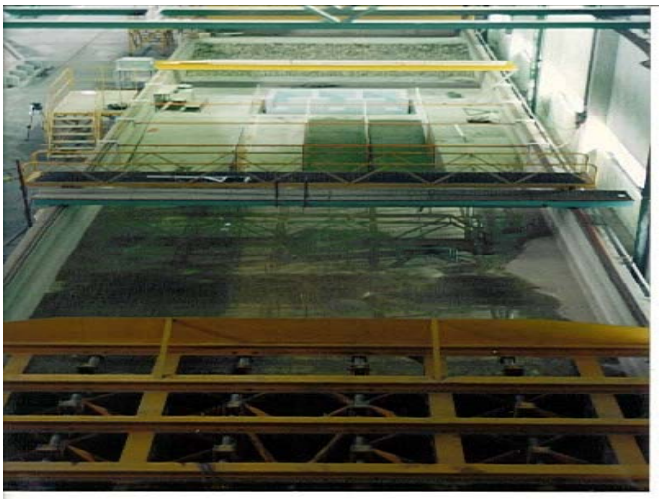

Figura 1. Instalación experimental

OBJETIVOS DEL TRABAJO

1. Obtención de un modelo empírico que permita predecir con buena precisión la tasa de rebase promedio, donde se combinen la totalidad de las variables independientes que han sido seleccionadas para el experimento.
2. Aplicar los resultados obtenidos en la solución de un caso real del litoral cubano.

Para dar cumplimiento a estos objetivos se desarrollaron las siguientes tareas:

1. *Selección de las características del clima marítimo*

Para utilizar en los ensayos, se toma como punto de partida las condiciones de oleaje en aguas profundas del mar Caribe noroccidental, zona en la cual se forman t mentas de gran envergadura que afectan el litoral cuba con bastante frecuencia (tabla 1). En especial se han lorado dos fuentes de información, una de carácter in nacional: Global Wave Statistics (1988), y otra de car ter nacional: Características hidrometeorológicas gene les de la zona costera correspondiente al Malecón Ha nero. Informe Final. (1994).

2. *Definición de las secciones a estudiar*

Las alternativas que se estudian se describen de siguiente manera.

Variante I: Muro de doble curvatura, concebido por Thorn y Roberts (1981), recogido en la publicación, ¨Sea defence and coastal protection work ¨, estudiado para las condiciones del Mar del Norte, está formado por dos radios de curvatura y el ángulo de salida de la curvatura superior es de 10 grados, como se puede observar en la figura, es de complejo diseño y construcción. Se diseña teniendo en cuenta que la altura del mismo (H), sea mayor o igual que la amplitud de la ola de diseño. (Owen, 1991)

Tabla 1. Eventos meteorológicos

Eventos Meteorológicos más importantes que han afectado el Litoral Habanero durante los últimos 20 años. (según Instituto Cubano de Meteorología de la ACC).

Eventos	Pleamar (m)	Fecha	Hs (m)	Persistencia (h)
Huracán Eloise	1,21	9/75	5,7	6
Frente Frío	0,92	1/77	5,7	24
Baja Extratropical	1,24	3/83	5,6	12
Huracán Juan	1,44	10/85	5,8	6
Huracán Floyd	1,07	10/87	5,2	3
Baja extratropical	1,31	2/92	5,3	12
Baja extratropical	0,99	1/87	5,1	30
Baja extratropical	1,06	3/93	5,3	30

Variante II: Muro vertical de simple curvatura. El mismo presenta un ángulo de salida de la curvatura de 30 grados y la longitud de la ¨ nariz ¨ es más corta comparada con el de doble curvatura. La sección propuesta en este estudio se dimensiona a partir de la experiencia personal del autor al desarrollar varias investigaciones a nivel de modelos físicos en el canal de olas del Centro de Investigaciones Hidráulicas del ISPJAE durante 1994 y principios de 1995 hasta la fecha. (Córdova, 1996-1999).

El esquema (figura 2) que se muestra a continuación muestra los muros costeros.

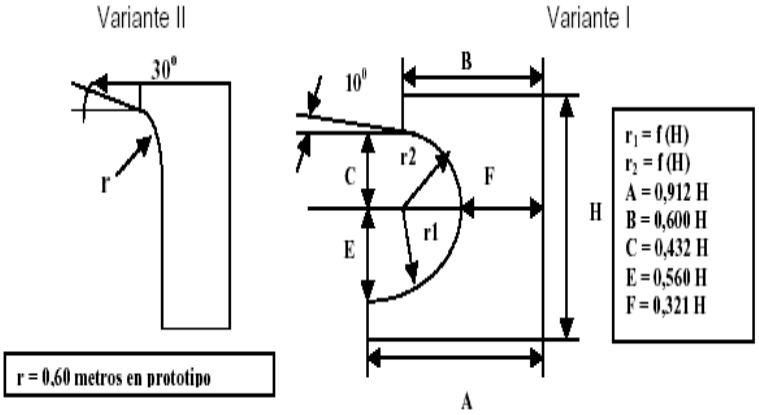

Figura 2. Muros costeros

DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL ESTUDIO

En el fenómeno de rebase del oleaje intervienen un número elevado de variables. En este caso en particular el mismo se concentra en aquellos parámetros que se ha

demostrado que tienen la mayor influencia y se hacen constantes aquellos que son menos significativos, tales como pendiente del fondo marino, ángulo de incidencia del oleaje y rugosidad.

En el caso de la pendiente del fondo marino se fijó una pendiente 1: 15.

Las variables seleccionadas son:

- Altura de ola significativa (Hs).
- Período pico del espectro del oleaje (Tp).
- Altura de corona de los muros (R).
- Profundidad al pie de la estructura (h).
- Parámetro de forma espectral.

A continuación se presentan los rangos de las variables a nivel de laboratorio, así como, los niveles de cada variable.

Tabla 2. Variables adimensionales

Rango de variables adimensionales

Variables	Rango	Valores
Hs/Ls	0,017 – 0,064	12
R/Hs	0,50 – 1,50	12
h/H	0,19 – 0,85	12
ganma	3,3 – 7,0	2

Como pasos necesarios para llevar a cabo el experimento se concibieron y desarrollaron las siguientes tareas.

1. Diseño y construcción en el tanque de oleaje de la instalación experimental.
2. Calibración del oleaje de ensayo.
3. Desarrollo de una metodología de ensayo.
4. Diseño y construcción de un sistema para la medición de los rebases producto del oleaje generado.

Estudio comparativo de los muros costeros

Se muestra en las siguientes figuras 3 y 4.

El estudio comparativo mostró que el comportamiento de ambas secciones es similar para las condiciones en el rango de las variables estudiadas, por lo que se seleccionó la variante del muro de simple curvatura por ser más sencilla su construcción.

COMPORTAMIENTO DEL FENÓMENO DE SOBREPASO CON RESPECTO A LOS DIFERENTES PARÁMETROS

En este epígrafe se desarrolla el análisis de la influencia sobre el fenómeno de rebase de los diferentes parámetros seleccionados en el diseño del experimento, conocer el efecto de cada variable en el rango estudiado

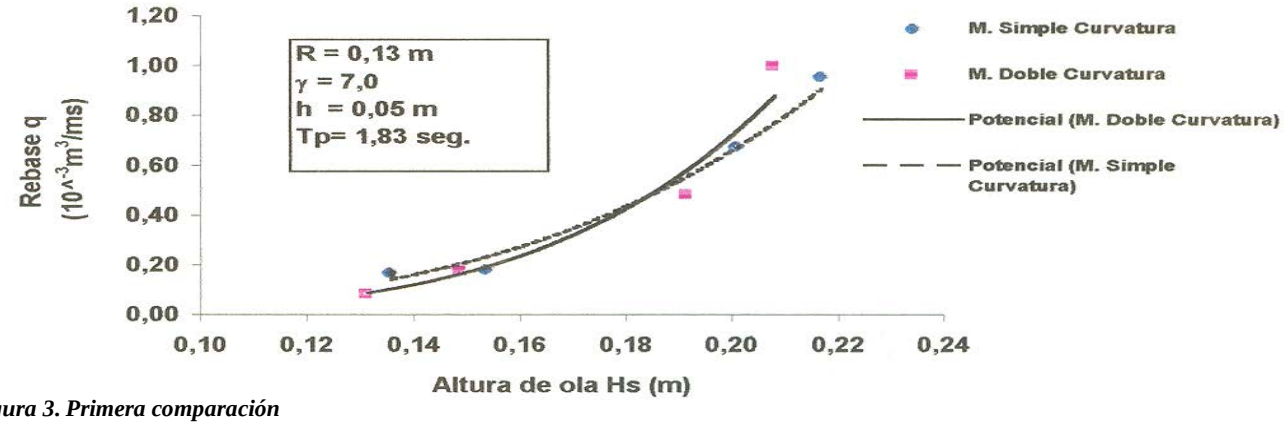

Figura 3. Primera comparación

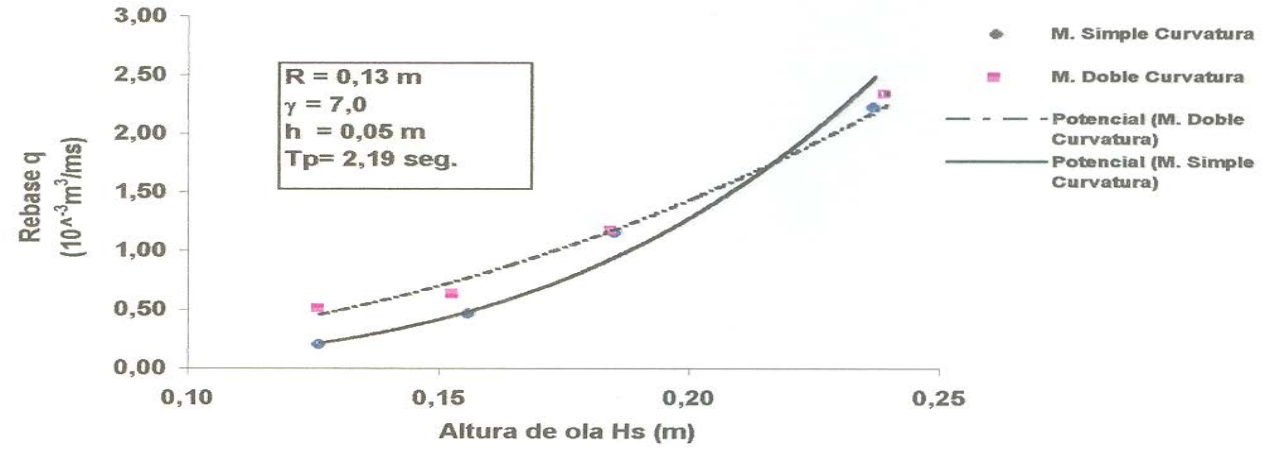

Figura 4. Segunda comparación

permite evaluar para cual de ellas el fenómeno es más sensible, dígase cual produce un crecimiento mayor o más acelerado y viceversa. Permite definir los intervalos que son favorables o desfavorables dando la posibilidad de conocer de forma más amplia el fenómeno.

El valor de rebase se ha expresado en forma adimensional mediante la fórmula planteada por el profesor Goda.

Para desarrollar la caracterización del fenómeno se ha dividido el análisis de la siguiente forma:

- Efecto de la altura de ola.
- Efecto de la pendiente de la ola.
- Efecto del factor de apuntamiento espectral.
- Efecto de la profundidad al pie de la estructura.
- Efecto de la altura de coronación.

El análisis en todos los casos se realiza mediante el uso de gráficos de dispersión y líneas de tendencia, los cuales permiten visualizar de forma adecuada el comportamiento de los resultados de las pruebas realizadas.

EFECTO DE LA ALTURA Y PENDIENTE DE LA OLA

Investigaciones anteriores del fenómeno de rebase tales como las realizadas por Pedersen (1992), Murakami (1996) y Juhl y Sloth (1996) en obras de abrigo de puertos han mostrado que el rebase del oleaje se incrementa de forma casi exponencial con la altura de ola, los experimentos realizados por el autor demuestran un comportamiento de la tasa de rebase expresada de forma adimensional de tipo exponencial, lo cual coincide con lo planteado por los investigadores antes citados, a pesar de ser diferente las condiciones de ensayos, fundamentalmente en lo referido a la profundidad al pie de la obra, los investigadores europeos han desarrollado sus experimentos donde la profundidad al pie de la estructura no afecta la altura de la ola generada en aguas profundas, siendo lo contrario en la desarrollada por el autor de este trabajo, que como se ha señalado está dirigida al estudio de obras de defensa de costas. Sin embargo en el rango estudiado el efecto de la profundidad no ha producido cambios en el comportamiento, aunque es evidente que la diferencia entre las cantidades de rebase será notable para iguales condiciones.

Respecto al efecto del período pico es evidente que en el rango estudiado con el aumento de éste se incrementa el rebase, independientemente del valor de la altura de coronación de la sección, no obstante su influencia es menor comparada con la de la altura de ola. Esto se puede comprobar para un valor constante de pendiente de la ola. Otro aspecto que se destaca es la tendencia a existir una respuesta similar para los períodos mayores.

Referente al efecto de la pendiente de la ola en el rango estudiado, se señala que con el incremento de este parámetro ocurre un incremento del rebase, siempre que se mantiene constante el período de la ola, un aspecto interesante a destacar a partir del análisis de los datos experimentales es que para valores de pendiente de la olas menores que 0,015 las líneas tienden a unirse, y el rebase tendrá un valor constante independientemente de la pendiente de la ola, el cual estará determinado por la profundidad al pie de la sección y la altura de coronación.

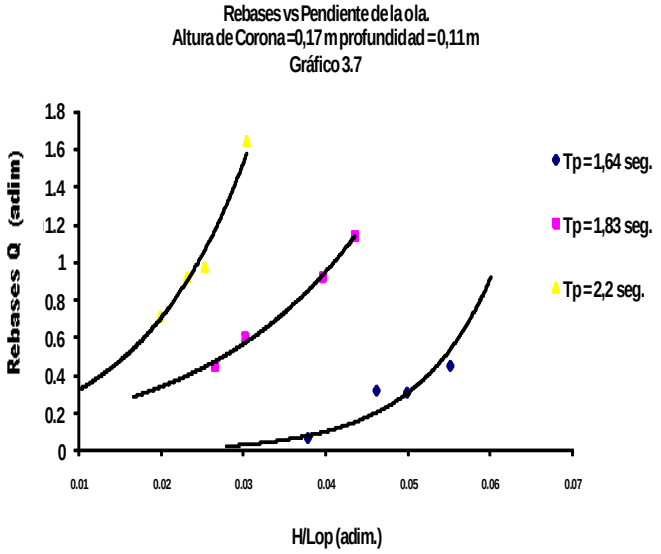

Figura 5. Rebase vs. pendiente de ola

EFECTO DEL FACTOR DE APUNTAMIENTO ESPECTRAL

Para evaluar el efecto de este parámetro se utilizan los resultados experimentales de las fases III y IV. Las líneas rectas expresan la tendencia del rebase para valor de factor de apuntamiento espectral, la línea discontinua representa ã = 3,3 y la continua ã ?= 7,0; el comportamiento del mismo es muy similar para ambos valores. La tendencia del fenómeno es a incrementarse con la pendiente de la ola, observación antes realizada. Del análisis de los gráficos se concluye que existe un punto de intersección de las dos rectas, a partir del cual se produce una inversión de la velocidad de crecimiento del rebase, aproximadamente en el rango de valores de pendiente de altura de ola entre 0,015 y 0,025 este comportamiento es similar al observado por Prud´Homme (1993), aunque este resultado no es concluyente, permite plantear que no existe un efecto apreciable por parte del factor de apuntamiento en el rebase

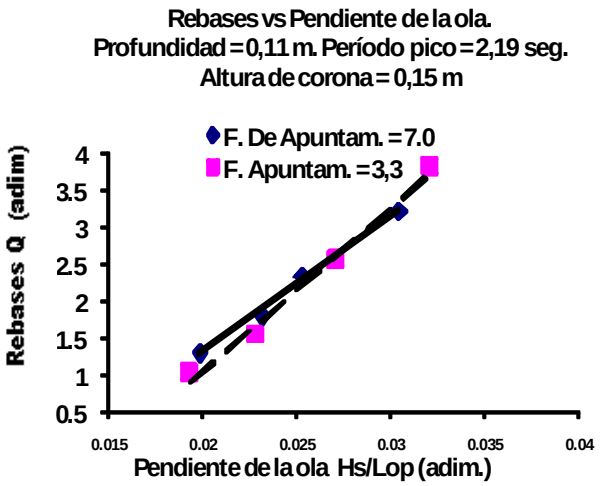

Figura 6. Rebase vs. pendiente de ola

EFECTO DE LA PROFUNDIDAD AL PIE DE LA ESTRUCTURA

La profundidad del agua al pie de una estructura es un factor que puede o no influir en el fenómeno de rebase, dependiendo de la relación profundidad / altura de la ola. En este estudio, debido a los valores de la relación h/Hs, es evidente que el efecto va a estar presente. Para caracterizar el mismo se presenta u gráfico que muestra curvas de igual profundidad relativa h/Lop, para realizar el análisis se ha mantenido constante el período de la ola, observando que a mayor profundidad el rebase es mayor, esto producto que el oleaje generado puede arribar a la sección de estudio con mayor energía, y en el caso de oleaje irregular un número mayor de olas del registro generado conservan su energía hasta impactarse con la sección ensayada. Otro aspecto a señalar que se manifiesta en los gráficos es el efecto de la altura de coronación, ya que en los casos que este valor es mínimo, existe rebase para todas las secciones ensayadas, no ocurriendo lo mismo cuando ésta comienza a aumentar.

Un aspecto a destacar a partir del análisis del comportamiento del rebase para las diferentes profundidades estudiadas y alturas de coronación, y que representa un aporte en el orden práctico al proyecto de obras de defensa, siempre que las condiciones de diseño estén enmarcadas en los límites de este estudio, es lo referido a que cuando la relación altura de coronación y profundidad al pie de la estructura (R/h) es mayor que 2,00 y la pendiente de la ola es menor de 0,025 se observa que los rebases tienden a cero, independientemente de la profundidad.

También se destaca que en el caso que la profundidad relativa expresada mediante la relación (h/Lop) sea menor de 0,01, los valores de rebase son mínimos o nulos, independientemente del valor de la altura de ola, así como que la velocidad de crecimiento del rebase disminuye, siendo menor el efecto de la profundidad (figura 7).

EFECTO DE LA ALTURA DE CORONACIÓN

Esta variable es la de mayor efecto sobre el rebase como parámetro estructural, esto ha sido planteado y demostrado por diferentes investigadores en esta rama tales como Ahrens (1986); Allsop, Jones y Besley (1994); Franco y otros (1996). La relación altura de corona / altura de ola constituye un importante parámetro adimensional, que expresa la influencia de la altura de ola y la distancia vertical medida desde el nivel de aguas tranquilas hasta la cresta de estructura sobre el volumen de agua que sobrepasa una obra de defensa de costa o abrigo de puerto.

De la observación y análisis de los mismos se reafirma lo planteado con respecto al efecto del período pico del oleaje cuando las curvas que representan el rango de menor pendiente de la ola, producen los mayores rebases, siempre que el rango de alturas de olas sea el mismo.

Esto ocurre debido a que el área de la sección que conforma el rebase sobre la corona de la estructura aumenta su ancho, con el incremento del período.

Otro aspecto que se destaca es la disminución de forma exponencial del fenómeno, al incrementarse la altura de coronación o disminuir la altura de la ola, lo cual indica la alta sensibilidad del mismo ante ésta relación. Una conclusión del análisis que lleva implícito un aporte de carácter práctico ingenieril es el referido al valor de altura de coronación relativa, como se puede observar las líneas de tendencia de tipo exponencial aumenta su inflexión para valores de R/Hso menores de 0,80; entre 0,80 y 1,20 ocurre una disminución de la velocidad de crecimiento de los rebases y para valores mayores de 1,20 las líneas se unen tendiendo a cero, independiente al valor de la pendiente de la ola. Esto significa que para valores de $R \leq 0{,}80 Hso$ se producirán volúmenes de sobrepaso de gran magnitud, asociados a fuertes inundaciones, en el rango intermedio $0{,}80 \leq R / Hso \leq 1{,}20$ se producirán volúmenes de rebases considerables, siendo necesario un sistema de drenaje de gran capacidad, siendo necesario un estudio de costo y beneficios. En el caso de $R \geq 1{,}2 Hso$ los volúmenes de agua serían mínimos, fundamentalmente asociados a fuerte salpicaduras producidas por olas de menor altura que rompen sobre la estructura, sin significar volúmenes de agua que produzcan inundaciones.

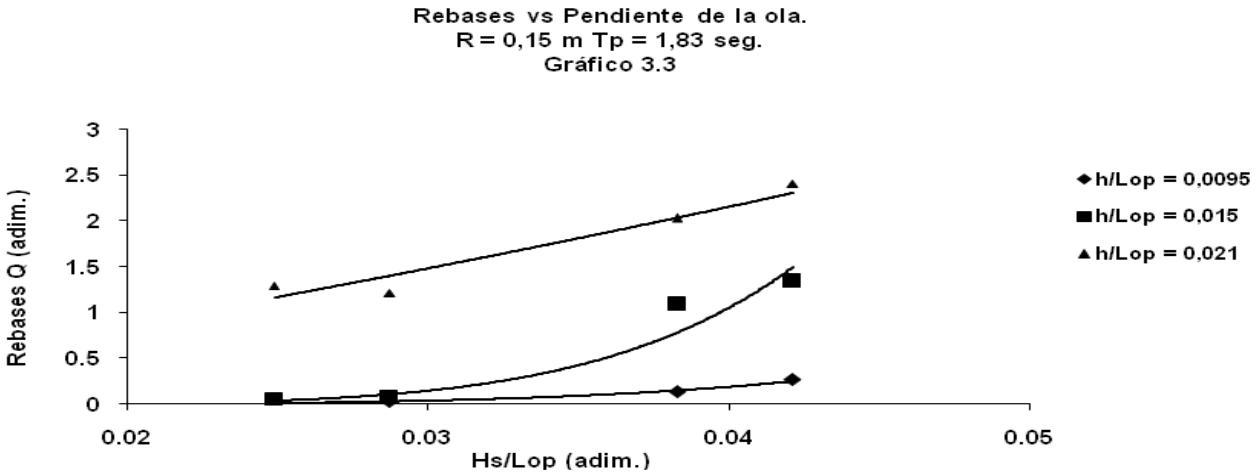

Figura 7. Rebase vs. pendiente de ola

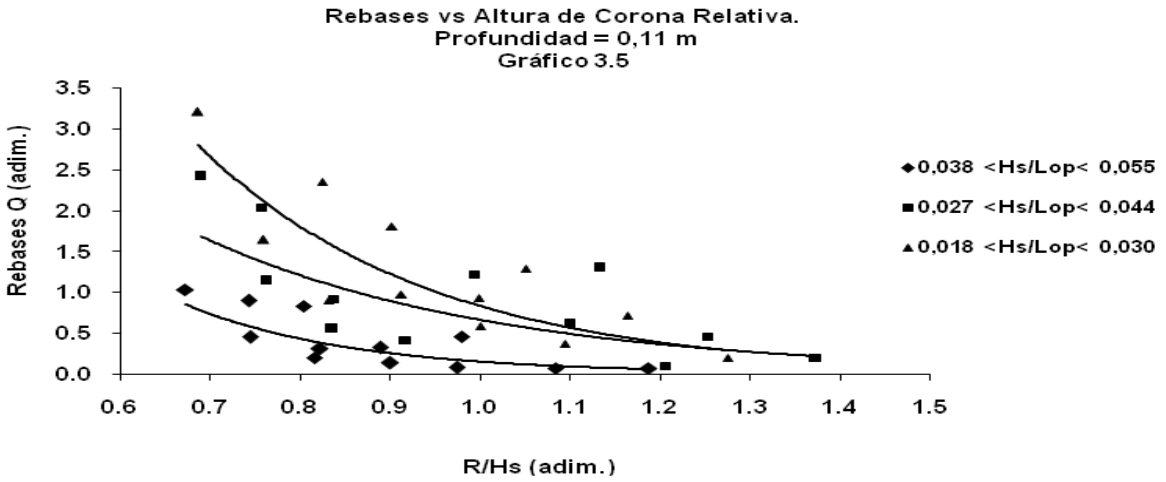

Figura 8. Rebase vs. altura de corona

DESARROLLO DE UN MODELO EMPÍRICO DE ESTIMACIÓN DE LA TASA DE REBASE PROMEDIO

La obtención de una ecuación o conjunto de ellas que interrelacionadas expresen el comportamiento de un evento natural, permite evaluar, predecir y elaborar en el campo de la ingeniería soluciones más eficientes desde el punto de vista funcional y económico. Investigadores de diferentes partes del mundo han trabajado en esta dirección. A continuación se presentan (tabla 3) aquellos modelos que más son citados en la bibliografía internacional consultada por el autor de este trabajo.

En la consecución del objetivo, primero se le aplicó a los datos experimentales cada uno de los modelos arriba señalados, con la característica que se combinarán los cuatro términos independientes adimensionales (alturas de corona relativa) con los dos términos dependientes adimensionales (tasas de rebases adimensionales), para un total de ocho combinaciones.

Se realizan gráficos de dispersión y luego se obtienen las líneas de tendencias de tipo exponencial y potencial y sus correspondientes coeficientes de determinación (r2), para conocer en qué por ciento los modelos son capaces de explicar el conjunto de datos experimentales. De esta forma se cubre la totalidad de las posibilidades que brindan los modelos internacionales.

Del análisis de los gráficos, se concluyó que la tendencia de los resultados experimentales es no lineal, con un marcado carácter potencial o exponencial para todas las combinaciones empíricas de las variables.

Al analizar las líneas de tendencia, el modelo potencial muestra coeficientes de determinación ligeramente mayores que los obtenidos para el caso de los modelos exponenciales (en el caso de seis de las ocho combinaciones).

Tabla 3. Modelos más citados

Autor	Modelo	Altura de corona Relativa	Forma de expresar el Rebase
Owen (1980)	$Q^* = A \exp^{(-BR^*_m / r)}$	$R^* = \frac{Rc}{Hs}\sqrt{s/2\pi}$	$Q^* = \frac{q}{\sqrt{gH^3}}\sqrt{s/2\pi}$
Goda (1985) van der Meer (1994)	-	$R^{'}=R^*/Hs$	$Q^* = \frac{q}{\sqrt{gHs^3}}$
Ahrens (1986)	$Q^* = Q_o e^{(c_1 F^I)}$	$F^I = \frac{F}{(H_m^2 Lp)^{\frac{1}{3}}}$	L^2/T
Allsop (1988)	$Q^* = A(F^*)^{-B}$	$F^* = \left[\frac{Rc}{Hs}\right]^2 \sqrt{\frac{s}{2\pi}}$	$Q^* = \frac{q}{\sqrt{gH^3}}\sqrt{s/2\pi}$

Los valores de los coeficientes de determinación son muy bajos en la totalidad de los modelos internacionales, como se aprecia en la siguiente tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de determinación

Combinaciones de los Modelos	*Coeficientes de Determinación Modelo Potencial*	*Coeficientes de Determinación Modelo exponencial*
Goda vs Goda	0,4021	0,4051
Goda vs Ahrens	0,4484	0,4472
Goda vs Owen	0,3838	0,3779
Goda vs Allsop	0,4563	0,4446
Owen vs Goda	0,4641	0,4681
Owen vs Ahrens	0,4421	0,4407
Owen vs Owen	0,3420	0,3352
Owen vs Allsop	0,4703	0,4587

Esto permitió concluir que existía un parámetro que no es incluido en los modelos internacionales y que para las condiciones físicas que se estudian juega un importante papel. A partir del análisis del efecto de los diferentes factores se demuestra que para las condiciones estudiadas, la profundidad al pie de la estructura influye de forma significativa.

Después de un conjunto de análisis donde se combinaron la profundidad del agua al pie de la estructura con los demás parámetros independientes, se propone por el autor del trabajo un factor, el cual es denominado ¨ Factor de Descarga ¨, (Qo), éste permite combinar la tasa de Rebase por unidad de longitud de estructura, la profundidad al pie de la estructura y la altura de ola en aguas profundas, en el caso de la profundidad y la altura de ola se realiza a través del parámetro denominado profundidad relativa (h/Hos).

La relación (h/Hos) ha sido utilizada por diferentes investigadores para caracterizar la influencia de la profundidad sobre diferentes fenómenos costeros,

El Factor de Descarga se define como:

$$Qo = \frac{qT_p}{L_p^{\,2}\sqrt{\left(\frac{h}{Hos}\right)^3}}$$

donde:
Qo: Factor de Descarga (adim.)
q : Tasa de rebase promedio específica (m3/s.m)
Tp : Período Pico (seg.)
Lp : Longitud de onda (m)
h : Profundidad al pie de la estructura (m)
Hos: Altura de ola significativa en aguas profundas (m)

En la figura 9 se muestra el Factor de Descarga propuesto en este trabajo relacionado con el término adimensional del investigador japonés Goda.

El objetivo de este paso en el proceso de investigación fue buscar aquella combinación que muestre el mayor coeficiente de determinación, y por tanto que la relación entre variación explicada y variación total sea lo más cercano a uno.

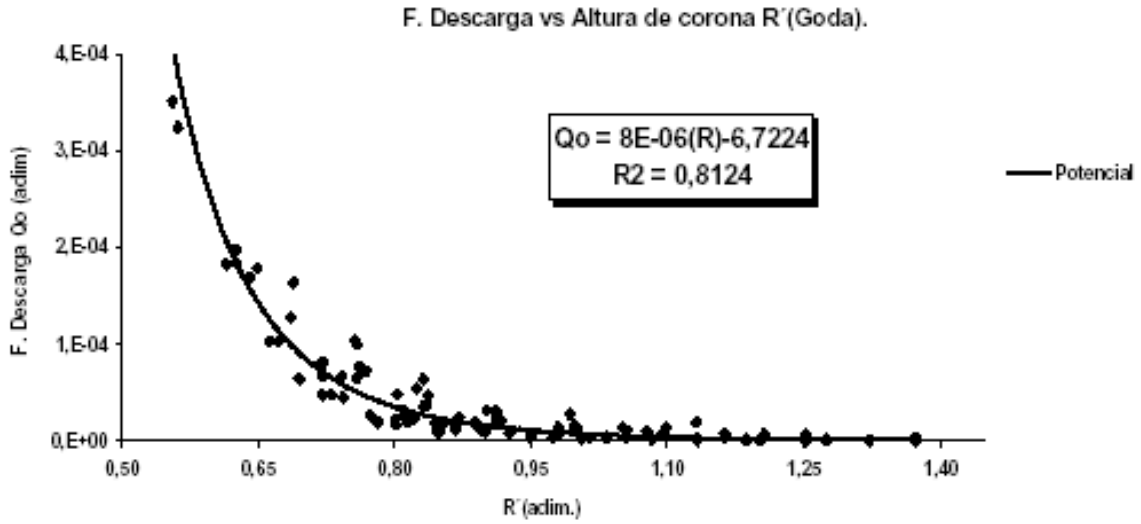

Figura 9. Factor de descarga

La siguiente tabla 5 resume los coeficientes de determinación, para cada una de las combinaciones del Factor de Descarga propuesto y las Altura de Corona Relativa de los diferentes investigadores.

Tabla 5. Combinaciones de los Modelos. Coeficientes de Determinación Modelo Potencial

Combinaciones de los Modelos	*Coeficientes de Determinación Modelo Potencial*
Córdova vs Goda	0,8124
Córdova vs Ahrens	0,6588
Córdova vs Owen	0,4528
Córdova vs Allsop	0,7354

En sentido general los coeficientes de determinación se han incrementado con la nueva propuesta de este trabajo, en el caso más desfavorable (Córdova vs Owen), en casi un 15 %, mientras que se destaca el coeficiente de determinación de 0,81 de la combinación Córdova vs Goda, el cual se puede concluir que es un buen resultado comparado con resultados internacionales, ejemplo de los mismos son los de Ahrens con un valor de r2 igual a 0,88 en 1986 y los de Allsop y Bradbury en 1988 con valores de coeficientes de determinación en el rango de 0,61 a 0,93. (Córdova, 1999)

Por lo que se concluye que el modelo propuesto es el siguiente:

$$Qo = A(R')^{-B}$$

donde:
Qo : Factor de Descarga (adim.).
R´: Altura de corona relativa (adim.)
A : Coeficiente = 8 * 10-6
B : Coeficiente = 6,7224

GENERALIZACIÓN DEL MODELO EMPÍRICO PROPUESTO

Con el objetivo de probar las posibilidades del modelo, el mismo es aplicado a los resultados experimentales del investigador norteamericano Ahrens, los cuales se encuentran reflejados de forma íntegra en el reporte de investigación llamado ¨Irregular wave overtopping of seawall/ revetment configurations¨, Roughans Point, Massachussets de 1986. Ahrens obtiene un coeficiente de determinación igual a 0,88. Al combinar el Factor de Descarga propuesto y el parámetro independiente (F´) (Ahrens,1986), se obtiene un coeficiente de determinación igual a 0,86, similar al obtenido por este autor. Otro análisis que se lleva a cabo consiste en aplicar el modelo completo (Córdova vs Goda), a los datos experimentales del investigador Ahrens, obteniéndose un coeficiente de determinación igual a 0,87, valor similar a los anteriores, lo que se muestra en el siguiente gráfico (figura 10).

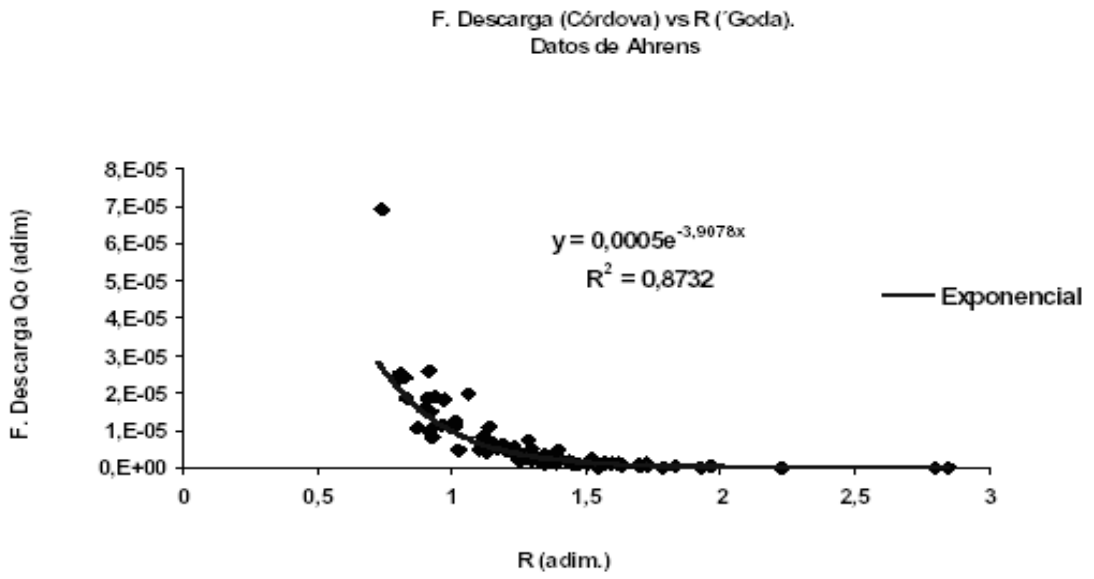

Figura 10. Modelo completo

APLICACIÓN DEL MODELO EMPÍRICO OBTENIDO PARA EL DISEÑO DE MUROS DE SIMPLE CURVATURA, COMO SOLUCIÓN CONTRA INUNDACIONES EN EL TRAMO MÁS CRÍTICO DEL MALECÓN DE LA CIUDAD DE LA HABANA

A partir del diseño de obras de defensa de costas en función de la tasa de rebase admisible se ha decidido tomar para desarrollar este ejemplo de aplicación en la determinación de la altura de coronación de los nuevos muros de protección dos criterios.

Criterio funcional : ¨Para un drenaje directo, en áreas densamente pobladas ¨, el rebase debe ser de 10 l/s.m.
Criterio estructural : ¨Carretera con pavimento», el rebase debe ser de 200 l/s.m

De acuerdo con el dictamen del grupo de expertos creado para dar solución a la problemática del Malecón Habanero el tramo fue dividido en tres subtramos, tomando en consideración la profundidad al pie del muro actual y el ángulo de incidencia del oleaje de tormenta. Quedando de la siguiente forma:

Calle F a Calle J - Prof. = 3,30 m; Cota de corona muro actual = 4,10 m
Calle 6 a Calle F - Prof. = 2,50 m; Cota de corona muro actual = 3,70 m
Calle 12 a Calle 6 - Prof. = 1,50 m; Cota. de corona muro actual = 3,30 m

Características del clima marítimo de diseño :
Hs diseño = 5,00 m
Tp diseño = 12,00 segundos.

El procedimiento se explica a continuación:

1. Sustituir la tasa de rebase admisible (q), así como las variables de diseño que caracterizan el clima marítimo y el entorno

2. Calcular el Factor de Descarga en la ecuación que lo define:

$$Qo = \frac{qT_p}{L_p^2 \sqrt{\left(\frac{h}{Hs}\right)^3}} \quad (3)$$

3. Sustituir el valor de Qo en el modelo propuesto, calculando el valor de altura de corona relativa R/Hs.

$$Qo = 8X10^{-6}\left(\frac{R}{Hs}\right)^{-6,7224} \quad (4)$$

4. Calcular el valor de la altura de corona de la protección propuesta.

Tabla 6. Resultados

Subtramo	Criterio Funcional Cota de Corona (m)	Criterio Estructural Cota de Corona (m)	Cota del muro Actual (m)
Calle F a Calle J	5,45	3,49	4,10
Calle 6 a Calle F	5,10	3,28	3,70
Calle 12 a Calle 6	4,58	2,93	3,30

De los resultados presentados en la tabla 6 (cotas de corona), para garantizar el cumplimiento del requerimiento funcional de 10 l/s.m en los diferentes subtramos deben ser incrementadas entre 1,28 m y 1,50 m.

Respecto al criterio estructural, se señala que aunque se requiere menor cota de corona con los muros de sección de simple curvatura debe destacarse que los rebases que sobrepasarían el muro serían de 200 l/s.m,

cantidad que como se ha referido anteriormente no produciría daños al pavimento, sin embargo es suficiente cantidad de agua como para producir inundaciones de consideración en las zonas bajas del tramo de análisis. Por lo que el autor de este trabajo considera que el criterio que debe ser utilizado está relacionado a la función del área que será protegida.

CONCLUSIONES

1. El rebase del oleaje presenta un comportamiento muy similar para los muros de simple y doble curvatura para las condiciones en las cuales se ha desarrollado el estudio. Esta conclusión confirma la posibilidad de predecir o estimar los volúmenes de sobrepaso mediante un mismo modelo, para las dos secciones estudiadas.

2. El muro de simple curvatura propuesto como resultado de este trabajo es una mejor opción para los proyectistas y constructores de obras de defensa de costas o abrigos de puertos y marinas.

3. Referente al comportamiento del rebase ante los diferentes parámetros, en los rangos estudiados se concluye:

a) El rebase se incrementa notablemente de forma no lineal con el incremento de la altura de la ola significativa.

b) Respecto al período pico del oleaje, se comprueba que el fenómeno es sensible a éste parámetro, no obstante su influencia es menor comparada can la altura de ola. Se destaca la respuesta similar para los períodos mayores estudiados, fundamentalmente producto a que los oleajes caracterizados por estos períodos presentan formas muy similares de disipación de energía.

c) Con el incremento de la pendiente de la ola el rebase aumenta, debido a que este término es la combinación de los dos elementos hidráulicos antes comentados. Se señala como aporte importante que para pendientes de ola menores que 0,015 el rebase tiende a un valor constante y su cantidad estará en función de la profundidad al pie y la altura de coronación de la obra.

d) El análisis del rebase en función del factor de apuntamiento espectral no arroja resultados concluyentes, no obstante desde el punto de vista de la práctica ingeniera queda demostrado que su influencia no es de consideración en el momento del dimensionamiento de la obra de defensa o estimación de volúmenes de sobrepaso.

e) Se demuestra la marcada influencia de la profundidad del agua al pie de la estructura sobre el rebase, al incrementarse el mismo de forma no lineal con el aumento de ésta. Un aporte interesante que permite a los especialistas tomar decisiones en primera aproximación es el referido a que para relaciones de altura de corona / profundidad (R/h) mayores de dos y pendientes de olas menores de 0,025 el rebase tiende a ser nulo.

f) La altura de corona demuestra ser entre el conjunto de parámetros que determinan la cantidad de rebase, el de mayor influencia, al incrementarse éste ocurre una disminución considerable de los volúmenes de sobrepaso.

g) Una conclusión importante es la caracterización realizada del comportamiento del mismo en función de la relación altura de corona / altura de ola (R/Hso), la cual se resume de la siguiente forma:

- Si R/Hso < 0,80 se producirán grandes volúmenes de rebases, ocasionando fuertes inundaciones.
- Si 0,80 < R/Hso < 1,20 se producirán volúmenes de rebase considerables, necesidad de un sistema de drenaje de elevada capacidad.
- Si R/Hso > 1,20 se producirán volúmenes de rebase de menor consideración. Evaluar la necesidad de un sistema de drenaje de acuerdo con la función del área protegida.

4. Queda demostrado que los modelos internacionales no reflejan de forma correcta los resultados experimentales obtenidos, siendo valores muy bajos de coeficientes de determinación en el orden de 0,45.

5. Se propone un nuevo parámetro de tasa de rebase adimensional, el cual incluye el parámetro de profundidad, elemento importante para las condiciones estudiadas y no reflejado en los modelos precedentes, permitiendo una correcta explicación matemática del fenómeno de rebase. Se incrementa en un 50 % la calidad de los ajustes realizados con los modelos internacionales.

6. Como resultado del análisis estadístico al combinar el parámetro de tasa de rebase adimensional propuesto con las diferentes alturas de coronas relativa presentadas por los investigadores antes citados. Se concluye que el modelo de tipo potencial que mejor explica el fenómeno de rebase es el siguiente:

$$Q = AF^{*-B}$$ donde:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{g\left(\frac{h}{Hso}\right)^3}} \quad \text{y} \quad F^* = \left(\frac{R}{Hso}\right)^2 \sqrt{\frac{S}{2\pi}}$$

Coeficientes empíricos de Rebase:
A = 1. 10^{-6}
B = 3,8971

7. Queda demostrado que los modelos internacionales no reflejan de forma correcta las condiciones físicas para las cuales se han desarrollados los experimentos. Los valores de coeficientes de determinación no muestran un buen ajuste, los mismos están en el orden de 0,45.

8. Se propone un nuevo parámetro denominado Factor de Descarga, el cual incluye el parámetro de profundidad, elemento importante para las condiciones estudiadas y no reflejado en los modelos precedentes, permitiendo una correcta explicación matemática del fenómeno de rebase. Se incrementa en un 50 % la calidad de los ajustes realizados con los modelos internacionales.

9. Como resultado del análisis estadístico al combinar el Factor de Descarga propuesto con las diferentes alturas de coronas relativas presentadas por los investigadores antes citados, se concluye que el modelo de tipo potencial que mejor describe el fenómeno de rebase es el siguiente:

$$Qo = AR'^{-B} \qquad A= 8X\ 10^{6};\ B= 6{,}7227$$

donde:

$$Qo = \frac{qTp}{Lp^2\sqrt{\left(\frac{h}{Hso}\right)^3}} \qquad R' = \frac{R}{Hso}$$

10. Se aplica de forma satisfactoria el modelo empírico propuesto en la obtención de una solución contra penetraciones del mar en el tramo más crítico del Malecón de la ciudad de la Habana, mediante la colocación de un muro de sección curva adosado al muro actual.

REFERENCIAS

1) **CEDEX.** ¨Manual de Normalización de Ensayos.¨ CEPYC. Madrid. 1989.

2) **Córdova L.** : ¨Estudio sobre rebase en el tramo más crítico del Malecón de la Habana: Variantes para su disminución en magnitud y efectos negativos ¨. Tesis de Maestría. 1996.

3) **Córdova L. y Fontova M.**: ¨Estudio de variantes de protección contra sobrepasos del tramo calle 12 – calle J, del Malecón habanero. Reporte de Investigación. 1994.

4) **Córdova L.** ¨Estudio del fenómeno de rebase en obras de defensa de costas para las condiciones de Cuba. Tesis presentada para optar por el grado científico de doctor en ciencias técnicas. 1999.

5) **Owen W. y Steele A.**: ¨Effectiveness of recurved wave return walls¨. HR Wallingford. Report No. SR261. 1991.

Noviembre de 2010