

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. FORMULACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE REBASE

Las primeras formulaciones de rebase empezaron a aparecer en la segunda mitad del siglo XX. A continuación revisaremos algunos de los autores que han desarrollado este tipo de formulación.

3.2. AHRENS. SHORE PROTECTION MANUAL

En la década de los años 50 el cuerpo de ingenieros del ejercito de los Estados Unidos de América propuso una fórmula empírica para determinar el rebase sobre obras marítimas debido a oleaje regular. Weggel (1976) determinó posteriormente una serie de procedimientos para valorar determinadas variables de la fórmula, que expuso en un formato gráfico.

A finales de los años 70 la información disponible para predecir el rebase en estructuras marítimas era mínima. En 1977 Ahrens sugirió una nueva formulación para predecir el rebase de oleaje irregular. Aunque el mismo lo definió como una aproximación hasta que nuevos y mejores avances permitieran la obtención del rebase de una forma más precisa. Un ejemplo de estas imprecisiones es la que se comete con algunas ondas largas del espectro que pueden llegar a romper antes de alcanzar la estructura; y en este caso, el valor de rebase debe ser infravalorado.

La formulación propuesta por Ahrens (1984) se basa en unas modificaciones realizadas en la fórmula de rebase para oleaje regular obtenida por Weggel (1976). Ambas asumen una distribución de Rayleigh. La fórmula de Ahrens de rebase para oleaje irregular es la siguiente:

$$Q_p = \sqrt{gQ_o^* (H_o')_s^3} e^{-\left[\frac{0.217}{\alpha} \tanh^{-1} \left(\frac{h_e - h}{r_s} \right) \frac{r_s}{r_p} \right]}$$

dentro del intervalo

$$0 \leq \left(\frac{h_e - h}{r_s} \right) \frac{r_s}{r_p} < 1.0$$

donde

- Q_p rebase por unidad de longitud de la estructura, asociado a P ;
- g aceleración debida a la gravedad;
- Q_o^* coeficiente empírico dependiente del oleaje incidente;
- $(H'_o)_s$ altura de ola significativa equivalente en aguas profundas;
- α coeficiente empírico dependiente de la geometría estructural;
- h_e altura total de la estructura, desde el fondo hasta la coronación;
- h calado al pie de la estructura;
- r_p remonte asociado a una probabilidad particular de excedencia P ;
- r_s remonte originado por oleaje asociado a $(H'_o)_s$.

Los coeficientes Q_o^* y α fueron determinados empíricamente y pueden ser hallados en las tablas postuladas por Weggel (1976) (Figura 3.1).

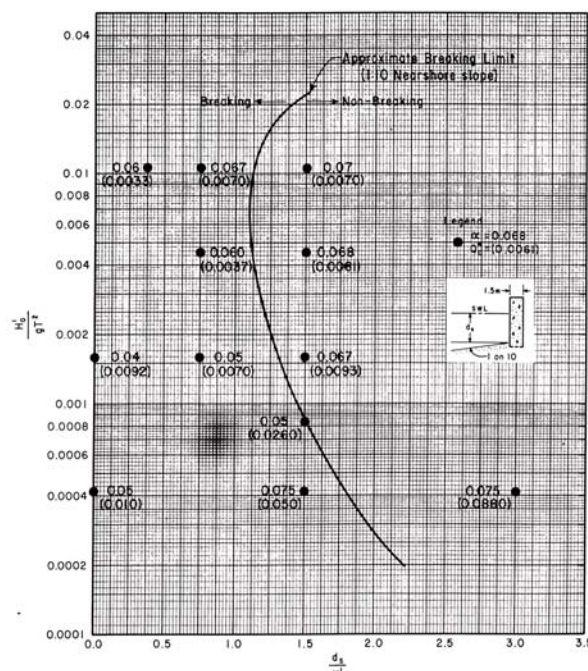


Figura 3.1. Tabla de datos de Weggel (1976).

El término $\frac{h_e - h}{r_s}$ se refiere al francobordo relativo de la estructura. La relación entre

r_p , r_s y P viene dada por una distribución de Rayleigh del remonte:

$$\frac{r_p}{r_s} = \sqrt{-\frac{\ln P}{2}}$$

Según cita el autor, al analizar el rebase de una estructura sujeta a oleaje irregular es, generalmente, más importante determinar un valor extremo de baja probabilidad de excedencia (por ejemplo del 0.5%) y el valor medio de rebase \underline{Q} supuesto sobre unas condiciones de oleaje dadas. El valor extremo Q_p , asociado a una probabilidad P del 0.5% ($P = 0.005$), puede ser determinado usando la ecuación de Ahrens (1984). La figura 3.2 muestra una gráfica propuesta por Ahrens (1984). El grupo de curvas superior ilustran la relación entre el francobordo relativo, $\frac{h_e - h}{r_s}$, y el rebase relativo $\frac{Q_{0.005}}{Q}$, dependiente del coeficiente empírico α . Q se define como el rebase debido a una altura de ola significativa (oleaje regular).

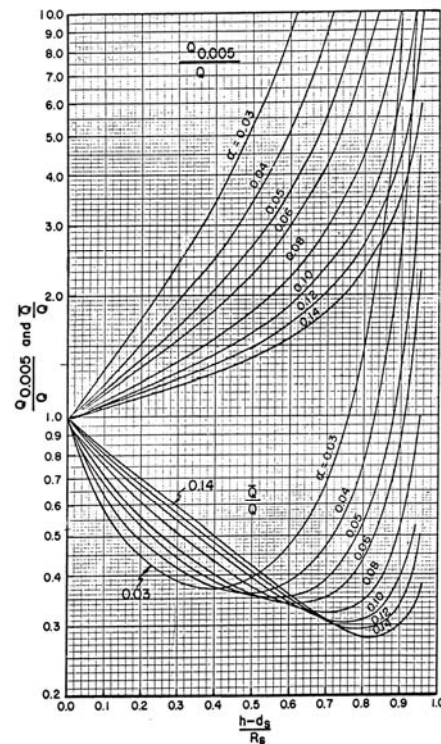


Figura 3.2. Gráfica de resultados de Ahrens (1977)

El valor de rebase medio \underline{Q} se determina calculando el valor de rebase Q_p para todas las olas que sean utilizadas en la distribución o en la muestra. Por ejemplo, en la figura 3.2 se muestra el cálculo para 199 tipos de excedencia diferentes, desde $P = 0.005$ hasta $P = 0.995$, en intervalos de probabilidad de 0.005.

Este método de predicción presenta el inconveniente de la necesidad de conocer el remonte que se produce en la estructura para poder conocer el rebase, lo que representa la realización de más cálculos.

3.3. APROXIMACIÓN DE GODA

En 1985 Goda presentó su nuevo método de obtención de rebase sobre diques marítimos. Durante varios años trabajó en la investigación y posterior análisis de los diversos datos obtenidos en estructuras marítimas existentes en Japón y en simulaciones de laboratorio. Dedicó especial interés al tipo de oleaje irregular. Puede ser este un dato de gran interés pues, anteriormente a Goda, nadie había realizado un estudio tan exhaustivo del rebase en estas condiciones de oleaje.

El método de Goda se basa en un formato gráfico, como veremos a continuación. Las figuras 3.3 y 3.4 muestran los diagramas diseñados por Goda para estimar el rebase sobre diques verticales. Los gráficos de la figura 3.3 están realizados para un fondo batimétrico de aproximación a la costa de inclinación 1:10. Y los de la figura 3.4 para una inclinación 1:30. En las dos figuras, los tres gráficos consideran tres tipos de oleaje

diferenciados por diversos peraltes de ola: $\frac{H'_o}{L_o} = 0.012$, $\frac{H'_o}{L_o} = 0.017$ y $\frac{H'_o}{L_o} = 0.036$. El

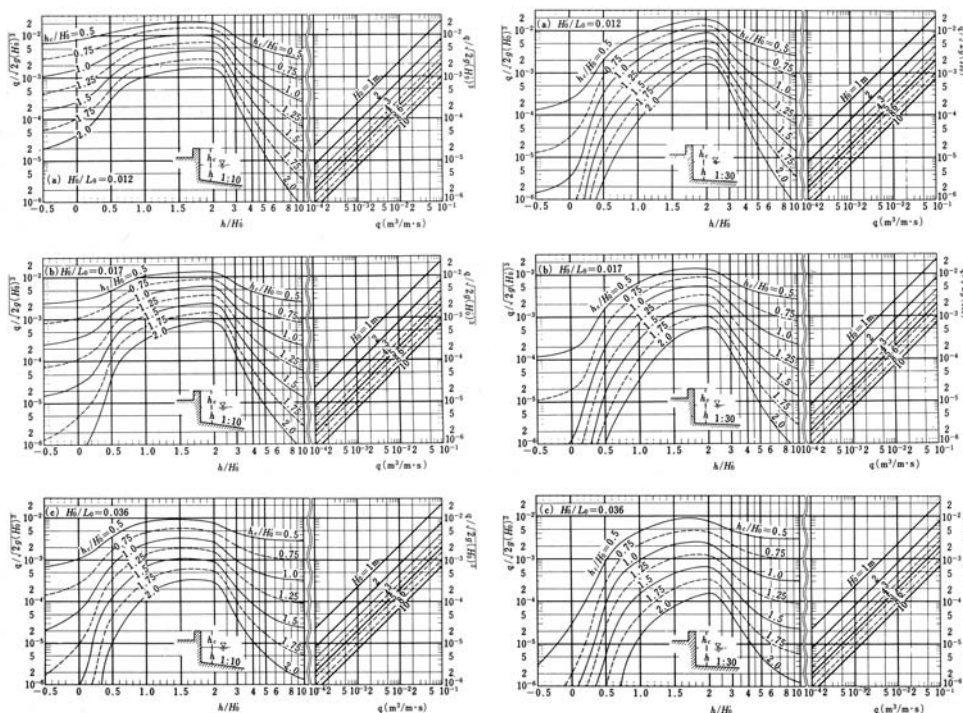
símbolo H'_o se define como la altura de ola equivalente en aguas profundas o como la altura de ola en aguas profundas sin verse afectada por las condiciones de reflexión del oleaje (supuestamente debidas por el dique vertical). L_o es la longitud de onda en aguas profundas. El resto de la simbología que aparece en las gráficas de Goda es la siguiente:

h calado al pie del dique vertical;

- R_c francobordo;
- g aceleración debida a la gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

Como se aprecia en las figuras, el dique vertical estudiado no consta de berna sumergida de protección de fondo ni de parapeto superior en la coronación de la estructura.

El modo a proceder para la obtención del rebase es sencillo. Conociendo las condiciones de oleaje y la geometría del dique conoceremos H'_o , $\frac{H'_o}{L_o}$, $\frac{h}{H'_o}$ y $\frac{h}{H'_o}$. Escogeremos el diagrama que más se ajuste a nuestros datos. Posteriormente introduciremos los datos en el diagrama obteniéndose $\frac{Q}{\sqrt{2g(H'_o)^3}}$. Finalmente obtendremos el valor de rebase unitario Q .



Figuras 3.3 y 3.4. Esquemas de Goda (1985) para rebase.

Si la pendiente del fondo o el peralte del oleaje difiere mucho del propuesto por Goda (1985) en las diferentes gráficas, nos veremos obligados a realizar una interpolación de valores para obtener un resultado lo más correcto y real posible.

El método gráfico de Goda (1985) no llega a ser del todo preciso. El mismo autor nos advierte de una cierta variación de los datos originales a los que aparecen en los diagramas debido a la dispersión de dichos datos originales en su compilación. El error final que podemos cometer, asegura el autor, nunca será superior al 20%.

Herbert (1993) confirmó el trabajo realizado por Goda (1985) ampliándolo a batimetrías de pendientes 1/100 y extendiendo el estudio para peraltes de ola entre 0.017 y 0.060.

3.4. APROXIMACIÓN DE OWEN

Durante 1978 y 1979 Owen (1980) llevó a cabo una extensiva serie de ensayos para determinar el rebase en diques marítimos con diversas formas de diseño, tanto en vertical como en talud. Los ensayos realizados estuvieron sujetos a condiciones de oleaje irregular. Owen (1980) fue el precursor de las modernas fórmulas de rebase propuestas hasta la fecha. Dichas fórmulas utilizan una de las dos siguientes funciones:

$$Q_* = A \exp(-BR)$$

$$Q_* = A(R)^{-B}$$

donde

Q_* rebase adimensional, postulado de diversas formas dependiendo del autor de la fórmula;

R francobordo adimensional, siguiendo el criterio de cada autor en la formulación;

A, B Coeficientes empíricos determinados a partir de los ensayos experimentales. Estos coeficientes son dependientes de varios factores como el oleaje incidente y la geometría del dique.

La fórmula propuesta por Owen (1980) es la siguiente:

$$\frac{Q}{T_z g H_s} = A \exp \left[-B \frac{R_c}{T_z \sqrt{g H_s^3}} \right]$$

donde

Q rebase por unidad de longitud de la estructura;

T_z periodo medio;

g aceleración debida a la gravedad;

H_s altura de ola significativa;

R_c francobordo de la estructura marítima;

Sin embargo los coeficientes empíricos A y B de la expresión general presentan unos límites de aplicación y que expresados en su forma adimensional son:

$$10^{-6} < \frac{Q}{T_z g H_s} < 10^{-2}$$

$$0.05 < \frac{R_c}{T_z \sqrt{g H_s^3}} < 0.30$$

Por lo que la aproximación deja de ser de uso universal.

3.5. APROXIMACIÓN DE VAN DER MEER y JANSSEN

Van der Meer y Janssen (1995) desarrollaron unas nuevas fórmulas empíricas para rebase de oleaje sobre estructuras marítimas a partir de los ensayos experimentales realizados bajo condiciones de oleaje irregular. La fórmula fue desarrollada gracias a una amplia base de datos de oleaje irregular caracterizada de forma espectral.

Se consideran dos tipos diferenciados de condiciones de oleaje: oleaje que alcanza la estructura marítima sin llegar a la rotura (olas impactantes o reflejantes) y oleaje que alcanza la estructura una vez ya ha roto (olas rotas). Para distinguir en que condiciones de oleaje nos encontramos, se utiliza el parámetro de rotura ξ definido como:

$$\xi = \frac{\tan\theta}{\sqrt{s_{op}}}$$

donde

θ ángulo de inclinación de la estructura;

s_{op} parámetro de peralte del oleaje, definido como:

$$s_{op} = \frac{2\pi H_{so}}{gT_{po}^2}$$

H_{so} altura de ola significativa en aguas profundas;

g aceleración debida a la gravedad;

T_{po} periodo de ola en aguas profundas.

Los valores que nos separan las condiciones de oleaje son:

- a) $\xi > 2 \Rightarrow$ condición de olas reflejantes o impactantes;
- b) $\xi < 2 \Rightarrow$ condición de olas rotas.

Van der Meer y Janssen (1995) desarrollan dos formulaciones diferentes para cada una de las dos condiciones de oleaje propuestas.

3.5.1. CONDICIÓN DE OLAS ROTAS

En condiciones de oleaje “roto” (la ola colapsa antes de alcanzar la estructura marítima) Van der Meer y Janssen (1995) proponen:

$$q_b^* = 0.06 \exp(-M_1 R_b^*)$$

donde

q_b^* rebase adimensional definido como:

$$q_b^* = \frac{E[Q]_{MJ}}{\sqrt{gH_{so}^3}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan\theta}};$$

$E[Q]_{MJ}$ rebase por metro lineal de estructura definido por Van der Meer y Jansen (1995);

R_b^* francobordo adimensional definido como:

$$R_b^* = \frac{s_{op}}{\tan\theta} \frac{R_c / H_{so}}{\delta_c};$$

R_c francobordo de la estructura marítima;

δ_c factor corrector combinado dependiente de la berma, rugosidad del talud, batimetría de la zona de estudio y ángulo de ataque del oleaje;

M_1 variable aleatoria Gaussiana con media 5.2 y una desviación estándar de 0.55. La razón de la existencia de esta variable es la

necesidad de hacer constar la dispersión natural de los datos experimentales no tratados. Para obtener un diseño más conservativo, los autores del estudio proponen para M_1 un valor de 4.7 a cambio de su principal valor 5.2.

3.5.2. CONDICIÓN DE OLAS IMPACTANTES Y REFLEJANTES

En condiciones de oleaje impactante y reflejante Van der Meer y Janssen (1995) proponen:

$$q_n^* = 0.2 \exp(-M_2 R_n^*)$$

donde

q_n^* rebase adimensional definido como:

$$q_n^* = \frac{E[Q]_{MJ}}{\sqrt{gH_{so}^3}};$$

R_n^* francobordo adimensional definido como:

$$R_n^* = \frac{R_c / H_{so}}{\delta_c};$$

M_2 variable aleatoria Gaussiana con media 2.6 y una desviación estándar de 0.35. La razón de la existencia de esta variable es la necesidad de hacer constar la dispersión natural de los datos experimentales no tratados. Para obtener un diseño más conservativo, los autores del estudio proponen para M_2 un valor de 2.3 a cambio de su principal valor 2.6.

3.6. APROXIMACIÓN DE CLAUDIO FRANCO Y LEOPOLDO FRANCO

El equipo de C.Franco y L.Franco (1998) ha resuelto una nueva formulación para el rebase sobre diques verticales. Concretamente sus estudios se basan sobre diques formados por cajones, una de las estructuras marítimas verticales con más aceptación en las últimas décadas dada su comodidad constructiva y su fácil manipulación dentro del agua.

Desde 1989 este equipo de ingenieros italianos ha estado recopilando datos de diversos ensayos realizados por varios laboratorios experimentales europeos. En el laboratorio ENEL-CRIS (Centro de investigación hidráulica del consejo italiano de electricidad, Milano) se llevó a cabo la investigación del funcionamiento de modernos cajones de hormigón bajo condiciones de oleaje irregular no rompiente. Más datos para completar su estudio han sido extraídos de proyectos realizados en bajo financiación de la Unión Europea como el MAST2-MCS (monolithic coastal structures) y el LIP (large installation plan, realizado por Delft Hydraulics). Otros laboratorios que han cedido sus datos para que C.Franco y L.Franco pudieran completar su investigación fueron el Centro de Estudios de Puertos y Costas del Cedex (Madrid) y el HR Wallingford (Reino Unido).

Los autores asumen que los principales parámetros que influyen en el rebase de las estructuras marítimas son el francobordo, R_c , aspecto ya considerado en aproximaciones anteriores, la altura de ola significativa incidente, H_s , y el rebase medio por unidad de longitud de la estructura, Q . La fórmula que proponen es del tipo:

$$Q_f = A \exp(-BR_f)$$

donde

Q_f rebase adimensional, definido como:

$$Q_f = \frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}};$$

g aceleración debida a la gravedad;

R_f francobordo relativo definido como:

$$R_f = R_c / H_s ;$$

a, b coeficientes que dependen del tipo de estructura marítima y de las condiciones de oleaje y de la batimetría de la zona de estudio.

En 1994 L.Franco, conjuntamente con M. De Gerloni y Van der Meer propusieron la siguiente fórmula de rebase de diques verticales debido a oleaje irregular en aguas profundas:

$$Q_f = 0.192 \exp(-4.295R_f)$$

El inconveniente de esta fórmula era que sólo podía utilizarse en el intervalo $0.9 < R_f < 2.2$. Y esto se convertía en un gran inconveniente al ver reducida su capacidad de estudio de un gran número de las estructuras marítimas existentes.

La fórmula definitiva presentada por C.Franco y L.Franco (1998), no es adecuada para aguas someras o poco profundas, lo cual indica estar fuera del terreno de estudio del que es objeto esta tesina. La fórmula es la presentada a continuación:

$$Q_f = 0.082 \exp \left[\frac{(-3R_f)}{\gamma_{\beta\sigma} \gamma_{geom}} \right]$$

donde

$\gamma_{\beta\sigma}$ coeficiente de ángulo de ataque del oleaje. Este es 0.83 para ángulos de ataque $\beta \leq 20^\circ$. Para ángulos mayores, $\gamma_{\beta\sigma} = 0.83 \cos(20^\circ - \beta)$;

γ_{geom} coeficiente de geometría de la estructura marítima. Para una estructura sin protecciones, el valor del coeficiente es 1.000. Con un botaolas de protección en la coronación de la estructura, el valor se reduce a 0.783. Y si existe un cuenco amortiguador, el valor es de 0.722.

3.7. APROXIMACIÓN DE T.S.HEDGES Y M.T.REIS

En 1998 T.S.Hedges y M.T.Reis, a partir de la base de datos de Owen (1980), proponen un nuevo modelo de regresión para determinar el rebase sobre diques en condiciones de oleaje irregular.

Los autores llegan a la conclusión de que una función representativa del rebase por encima de estructuras marítimas depende de las características de movimiento de partículas de agua (altura de ola, periodo, peralte, etc.), la geometría del dique, las características batimétricas de la zona donde se localiza dicha estructura marítima y de las propiedades del agua.

Los autores sugieren la siguiente ecuación de regresión de rebase debido a oleaje irregular:

$$Q_* = A(1 - R_*)^B \quad \text{para } 0 \leq R_* < 1$$

$$Q_* = 0 \quad \text{para } R_* \geq 1$$

donde

Q_* rebase adimensional definido como:

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{gr_{max}^3}} = \frac{Q}{\sqrt{g(CH_s)^3}} \quad \text{para } 0 < \frac{Q}{\sqrt{g(CH_s)^3}} < 0.0056;$$

R_* francobordo adimensional definido como:

$$R_* = \frac{R_c}{r_{max}} = \frac{R_c}{CH_s} \quad \text{para} \quad 0.14 < \frac{R_c}{CH_s} < 0.90;$$

Q rebase principal por unidad de longitud de la estructura;

g aceleración debida a la gravedad;

r_{max} máximo remonte ($= CH_s$);

C valor definido como el cociente entre el máximo remonte y la altura de ola significativa incidente ($C = \frac{R_{max}}{H_s}$);

H_s altura de ola significativa incidente;

R_c francobordo de la estructura;

A, B coeficientes experimentales.

El coeficiente B está relacionado con un modelo de función $F(t)$ que describe la variación de la posición (vertical) de la superficie libre del agua frente a la estructura.

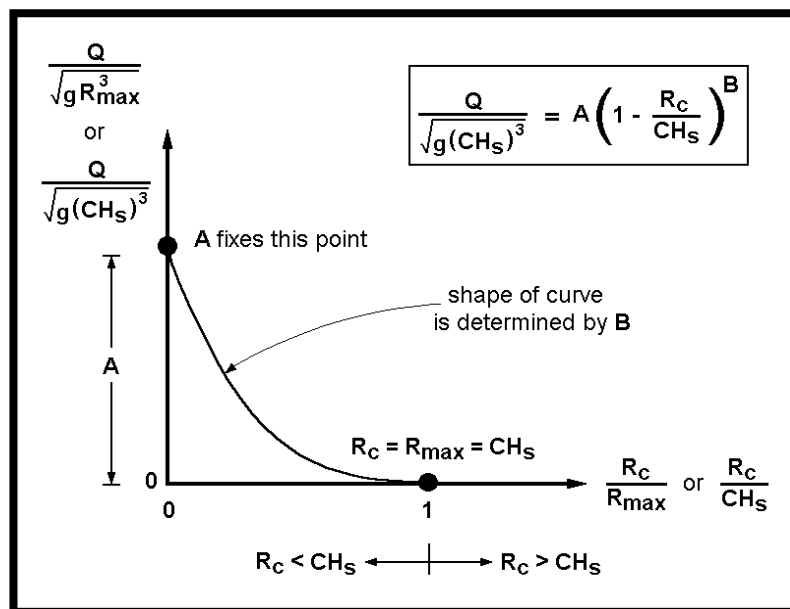


Figura 3.5. Función de relación de parámetros A, B y C.

Por su parte, el coeficiente A representa el rebase adimensional en las condiciones donde el francobordo de la estructura es nulo. La relación entre los coeficientes A , B y C se puede ver en la gráfica de la figura 3.5.

Los coeficientes A y B fueron obtenidos reanalizando los ensayos realizados por Owen y encontrando más valores mediante una regresión por el método de las desviaciones mínimas absolutas.

El coeficiente C fue definido a partir del parámetro de semejanza de surf:

$$C = 2.052\xi_p \quad \text{para } \xi_p < 2$$

$$C = 4.560 - 0.228\xi_p \quad \text{para } \xi_p \geq 2$$

El parámetro de semejanza de surf queda definido como:

$$\xi_p = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{op}}}}$$

donde

θ ángulo del muro de mar de la estructura que forma con la horizontal;

L_{op} longitud de ola en aguas profundas calculado a partir del periodo pico obtenido en el espectro de oleaje.

3.8. ALLSOP

El equipo de Estructuras Marítimas y el Grupo de Costas del HR Wallinford (Reino Unido) han desarrollado nuevas técnicas y conocimientos para la predicción del rebase sobre diques verticales. Estas técnicas y conocimientos, expresados finalmente en teorías y formulaciones empíricas, han sido hallados gracias a los estudios de

investigación y ensayos promovidos por el Ministerio de Agricultura y Pesca (MAFF) del gobierno del Reino Unido.

3.8.1. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE OLAJE INCIDENTE EN EL DIQUE

La identificación del tipo de ola que ataca la estructura todavía no ha sido resuelta de una forma precisa. Todavía aparecen algunas incertidumbres en la definición de las condiciones que conllevan la aparición de olas impactantes. Unas de las más recientes explicaciones teóricas son explicadas seguidamente.

Schmidt (1992) y posteriormente Oumeraci (1994) definieron siete tipos de posibles clasificaciones de rotura de oleaje, basado en términos de la relación $\frac{H_b}{h}$, donde H_b es la altura de ola en rotura, usualmente tomada como la altura máxima de rotura, y h es el calado justo delante del dique vertical (por encima de la berma, si ésta existiera). Pero H_b es un parámetro que a menudo es demasiado complicado predecir con certeza. Así pues, esta clasificación tiene bastantes restricciones debido a su poca fiabilidad para aplicarla en usos prácticos.

Allsop determinó que el resultado obtenido sobre el rebase del oleaje sobre diques verticales dependía de las condiciones de oleaje incidente predominante. En aguas profundas las olas tienden a alcanzar generalmente la estructura en forma de ola reflejante. Pero en aguas someras, donde la altura de las olas viene limitada por la profundidad, éstas tienden a romper directamente sobre el muro vertical. Son las denominadas olas impactantes y que el autor define con un nuevo parámetro, h_* , con el cual se evalúa el tipo de oleaje incidente (reflejante o impactante):

$$h_* = \left(\frac{h}{H_s} \right) \left(\frac{2\pi h}{gT_z^2} \right)$$

- donde h calado al pie de la estructura;
 H_s altura de ola significativa al pie de la estructura;
 g aceleración debida a la gravedad;
 T_z periodo medio del oleaje al pie de la estructura.

Las olas reflejantes predominan para valores $h_* > 0.3$; Para valores $h_* \leq 0.3$ tendremos olas impactantes. En este método no se refleja la posibilidad de diferenciar las olas rotas.

En 1999, Allsop desarrolló un esquema para identificar, según el tipo de dique que se tenga y las condiciones de oleaje previstas, el tipo de rotura de ola más probable que vamos a encontrar. Este esquema (figura 3.6) fue desarrollado durante el proyecto de la Unión Europea de investigación PROVERBS. En el caso de diques verticales (“vertical breakwater”) sólo ofrece la posibilidad de que dos tipos de ola alcancen la estructura: olas reflejantes (“pulsating waves”) y olas impactantes (“impact waves”). Este resultado viene condicionado por los parámetros h_b^* y H_s^* , cuyos intervalos de posibles valores quedan determinados en el mismo esquema.

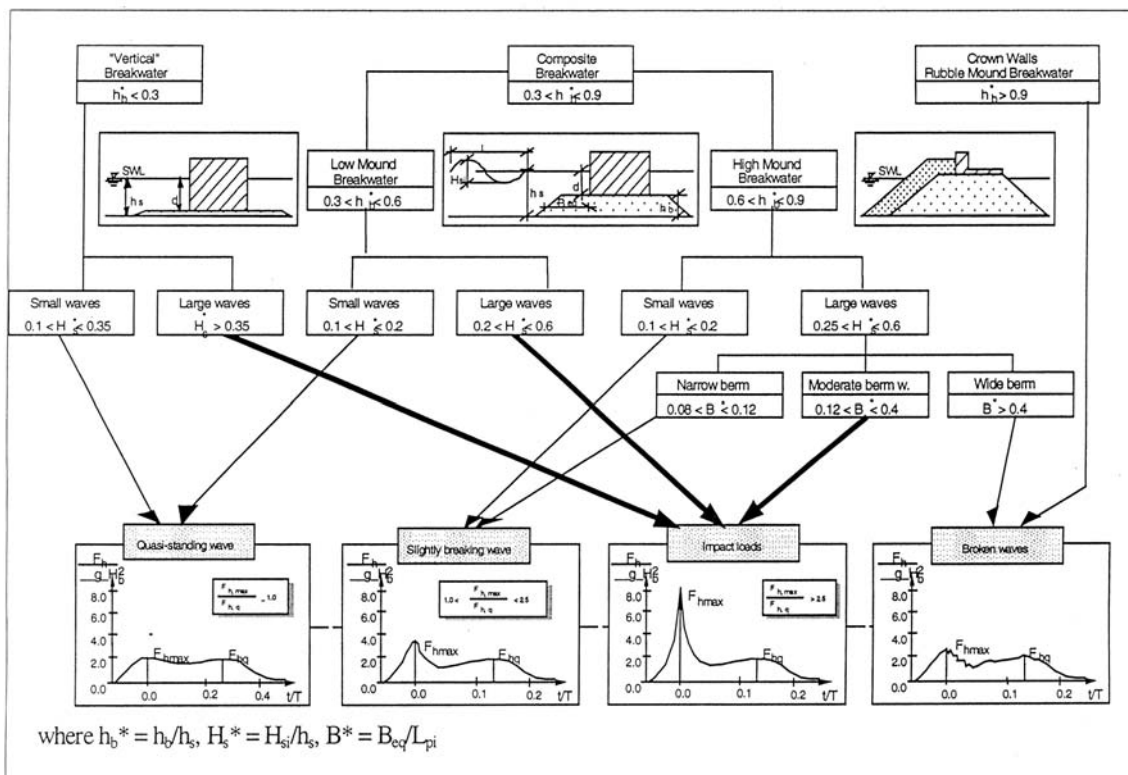


Figura 3.6. Esquema de Allsop (1999).

3.8.2. CAUDALES PRINCIPALES DE REBASE EN DIQUES VERTICALES. INCIDENCIA NORMAL DEL OLEAJE.

Allsop (1995) inició una búsqueda para una nueva formulación para poder calcular el rebase del oleaje en diferentes tipos de diques. La fórmula que propuso fue:

$$\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.03 \exp\left(-2.05 \frac{R_c}{H_s}\right)$$

donde R_c francobordo del dique vertical.

Esta ecuación es válida dentro de los límites del intervalo de francobordo relativo $0.3 < R_c/H_s < 3.2$, y es aplicable tanto en aguas someras como en aguas profundas. Pero observó un comportamiento muy diferente del rebase, dependiendo de si el oleaje incidente sobre la estructura era formado por olas reflejantes o por olas impactantes. Desarrolló dos nuevas ecuaciones de parámetros adimensionales, diferenciando los casos de oleaje incidente reflejante y impactante, a partir de la fórmula de h_* , vista en el apartado de identificación del tipo de oleaje incidente:

$$Q\# = 0.05 \exp\left(-2.78 \frac{R_c}{H_s}\right) \quad \text{para } h_* > 0.3$$

donde $Q\#$ caudal de rebase adimensional, dado por $\frac{Q}{\sqrt{gH_s^3}}$.

Esta ecuación es válida para $0.3 < R_c/H_s < 3.2$, con oleaje reflejante.

$$Q_h = 0.000137 R_h^{-5.24} \quad \text{para } h_* \leq 0.3$$

donde Q_h caudal de rebase adimensional, dado por $\frac{\left(\frac{Q}{\sqrt{gh^3}}\right)}{h_*^2}$;

R_h francobordo relativo, dado por $\left(\frac{R_c}{H_s}\right)h_*$.

La ecuación $Q_h = 0.000137 R_h^{-5.24}$ sólo es válida dentro del intervalo $0.05 < R_h < 1.00$.

3.8.3. CAUDALES PRINCIPALES DE REBASE EN DIQUES VERTICALES COMPUESTOS CON BERMA. INCIDENCIA NORMAL DEL OLEAJE

Muchos diques verticales están protegidos en la parte profunda e su cara externa por una berma. Normalmente se usa este diseño para limitar la altura de ola que alcanza la estructura y evitar así problemas como el rebase, o para evitar la erosión del fondo marino cerca de la pared del dique que pudieran provocar daños o desplazamientos de la estructura marítima. La geometría y el tamaño de la berma pueden variar significativamente, así como las condiciones del oleaje incidente. Allsop (1995) hizo una diferenciación en tres categorías de diques verticales compuestos para posteriormente analizar el rebase en ellos. Estas tres de categorías de diques son:

- a) con una pequeña berma que no tiene efectos significantes sobre el oleaje incidente;
- b) con una berma totalmente sumergida y que tiene efectos en el oleaje incidente;
- c) con una berma emergente.

En este apartado sólo vamos a analizar los diques correspondientes al apartado a y b de la relación anterior. Los diques con un francobordo relativo, $\frac{R_c}{H_s}$, menor que 1.5, pueden ser analizados como simples diques verticales. Y los diques con berma emergente deben ser tratados en la categoría de diques compuestos, método que no va a ser analizado en este trabajo puesto que no es el objetivo.

Se define un nuevo parámetro d_* , que sirve para determinar si el dique tiene una berma calificada como pequeña o grande. Este parámetro d_* , tiene un juego parecido al h_* para determinar el tipo de oleaje incidente. Ahora vamos a determinar la altura de ola respecto al calado existente sobre berma. El caudal de descarga de rebase dependerá si la berma modifica el oleaje incidente y provoca que las olas sea reflejantes o impactantes.

El parámetro d_* se define como:

$$d_* = \left(\frac{d}{H_s} \right) \left(\frac{2\pi h}{gT_z^2} \right)$$

donde

- d calado sobre la berma;
- h calado al pie de la estructura;
- H_s altura de ola significativa al pie de la estructura;
- T_z periodo medio del oleaje incidente.

Para valores de $d_* > 0.3$ se considera que la berma del dique vertical es pequeña y que las olas que alcanzan la estructura lo harán, generalmente, de forma reflejante. En este caso deben seguirse los mismos pasos usados para determinar el rebase en diques verticales (sin berma) alcanzados por olas reflejantes.

Para valores de $d_* \leq 0.3$ se considera que la berma es grande. En este caso la berma afectará el comportamiento inicial del oleaje transformándolo, generalmente, en oleaje impactante. Se recomienda utilizar la siguiente formulación:

$$Q_d = 4.63 \times 10^{-4} R_d^{-2.79}$$

donde Q_d caudal de rebase adimensional, dado por $\frac{\left(\frac{Q}{\sqrt{gd^3}} \right)}{d_*^2}$;

R_d francobordo relativo, dado por $\left(\frac{R_c}{H_s}\right)d_*$.

Esta ecuación es válida para un intervalo $0.05 < R_d < 1.00$.

3.8.4. NÚMERO DE OLAS DE REBASE EN DIQUES VERTICALES. ATAQUE NORMAL

Uno de los eventos más importantes del rebase es el volumen máximo que puede sobrepasar el dique. La definición de un máximo tolerable es lo que nos indicará si estamos del lado de la seguridad, sobre todo para peatones o vehículos que circulen por la parte interna del dique. Un paso intermedio en la predicción del rebase máximo es la estimación del número de olas que rebasan la estructura.

Franco (1994) desarrollo una ecuación, basada en los resultados de los ensayos que realizo para aguas profundas e intermedias. En dichas condiciones, lo más general es que las olas alcancen la estructura en su forma reflejante. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[\left(\frac{1}{0.91} \right)^2 \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \right] \quad \text{para } h_* > 0.3$$

donde N_{ow} número de olas que producen rebase;

N_w número de olas total en la secuencia.

La expresión para determinar el número de olas de rebase sigue una distribución de

Rayleigh. La ecuación $\frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[\left(\frac{1}{0.91} \right)^2 \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \right]$ es válida para un rango de valores

$$0.3 < \frac{R_c}{H_s} < 3.2.$$

Allsop (1995) desarrolló una nueva ecuación para determinar el número de olas de rebase en aguas someras. A diferencia de la expresión propuesta por Franco, que

relacionaba N_{ow} con el francobordo relativo R_c/H_s , en aguas someras se relacionará N_{ow} con R_h , parámetro que aparece en la fórmula $Q_h = 0.000137 R_h^{-5.24}$:

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = 0.031 R_h^{-0.99} \quad \text{para } h_* \leq 0.3$$

3.8.5. REBASE MÁXIMO PUNTUAL EN DIQUES VERTICALES

A partir del número de olas que provocan rebase podemos llegar a predecir un volumen máximo de rebase que se producirá en un evento individual. Franco (1994, 1997) llevó a cabo una serie de ensayos para predecir dichos volúmenes. La distribución de volúmenes, V , de un evento de rebase individual puede ser descrito a través de dos parámetros de una distribución de Weibull:

$$P(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{a} \right)^b \right]$$

donde $P(V)$ probabilidad de no excedencia de un volumen dado, V ;
 b parámetro de forma;
 a parámetro de escala, calculado a partir de b y V_{bar} ;
 V_{bar} volumen de rebase medio por ola de rebase.

El volumen de rebase máximo, V_{max} , en una secuencia de olas de rebase dada, N_{ow} , puede describirse como:

$$V_{max} = a (\ln N_{ow})^{1/b}$$

Para determinar los parámetros a y b tendremos que diferenciar las situaciones de oleaje incidente, ya sea reflejante o impactante. Si las olas son reflejantes:

$$a = 0.74 V_{bar} \quad ; \quad b = 0.66 \quad \text{para } s_{op} = 0.02$$

$$a = 0.90 V_{bar} \quad ; \quad b = 0.82 \quad \text{para } s_{op} = 0.04$$

donde s_{op} inclinación del oleaje, dado por $\frac{2\pi H_{so}}{gT_{po}^2}$;

H_{so} altura de ola significativa en aguas profundas;

T_{po} periodo de ola pico en aguas profundas.

Si obtenemos valores de s_{op} entre 0.02 y 0.04, tendremos que interpolar para hallar los valores correctos de a y b .

Si las olas fueran impactantes, los parámetros a y b serían:

$$a = 0.92 V_{bar} \quad ; \quad b = 0.85$$

Estos valores son únicos puesto que este tipo de oleaje no depende de la inclinación del oleaje, s_{op} .

Para determinar V_{bar} , indiferentemente del tipo de oleaje incidente que tengamos, seguiremos la siguiente ecuación:

$$V_{bar} = \frac{QT_z N_w}{N_{ow}}$$

donde Q caudal medio de rebase ($m^3/s/ml$);

T_z periodo medio de las olas al pie de la estructura.

Si trabajamos con diques verticales con berma sumergida, para determinar el rebase máximo de un evento, distinguiremos dos casos según los valores obtenidos por d_* :

- a) $d_* > 0.3$: se tratará como un dique vertical sujeto a oleaje reflejante;

- b) $d_* \leq 0.3$: se tratará como un dique vertical sujeto a oleaje impactante.