

# Diques verticales

Apuntes de Clase

María Clavero & Miguel Ortega-Sánchez

Grado en Ingeniería Civil

ETSI Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada



# Índice general

---

Índice general	III
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Procedimiento de cálculo</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. Método de cálculo . . . . .	6
2.3. Selección de la formulación: criterio de rotura de la ola . . . . .	7
2.4. Fórmula de Goda (1973) . . . . .	10
2.5. Fórmula de Takahashi et al. (1994) . . . . .	12
2.6. Coeficientes de seguridad . . . . .	14
2.7. Rebase . . . . .	15
2.8. Caudal de rebase . . . . .	15
2.9. Porcentaje de olas que rebasan . . . . .	16



---

## Capítulo 1

# Introducción

---

En primer lugar, dada la sección tipo de un dique vertical, se van a enumerar todos los modos de fallo que se pueden producir en un dique vertical (se asume que el cuerpo central está compuesto por cajones):

1. Deslizamiento del cajón sobre la banqueteta.
2. Vuelco rígido del cajón.
3. Hundimiento de la cimentación.
4. Deslizamiento de la banqueteta respecto al terreno.
5. Extracción de piezas de la berma de pie.
6. Deslizamiento local del terreno.
7. Deslizamiento profundo del terreno.
8. Erosión superficial del lecho por acción del oleaje.
9. Filtración del terreno a través de la banqueteta de enrase.
10. Filtración del terreno de la banqueteta de enrase por la berma de pie.
11. Licuefacción del terreno.
12. Rebase.

Teniendo en cuenta sus efectos, los modos de fallo anteriores se pueden englobar de la siguiente forma:

- (1) y (2) - implican pérdida de equilibrio estático.
- (3), (8), (9) y (10) - este modo de fallo supone deformación.
- (4), (6), (7) y (11) - agotamiento resistente de la sección.
- (5) - pérdida de equilibrio estático.
- (12) - operatividad.

Se aprecia que un dique vertical puede tener numerosos modos de fallo (en la figura 1.1 se muestran algunos de ellos). En la asignatura sólo vamos a ver a fondo el cálculo **para condiciones extremas de los modos de fallo (1) deslizamiento y (2) vuelco rígido adscritos a los E.L.U.** Sobre el resto sólo se harán una serie de comentarios, que se pueden entender como de *buena práctica*.

De forma general, sobre un dique vertical pueden actuar los siguientes agentes (considérese una sección genérica como la mostrada en la figura 1.2):

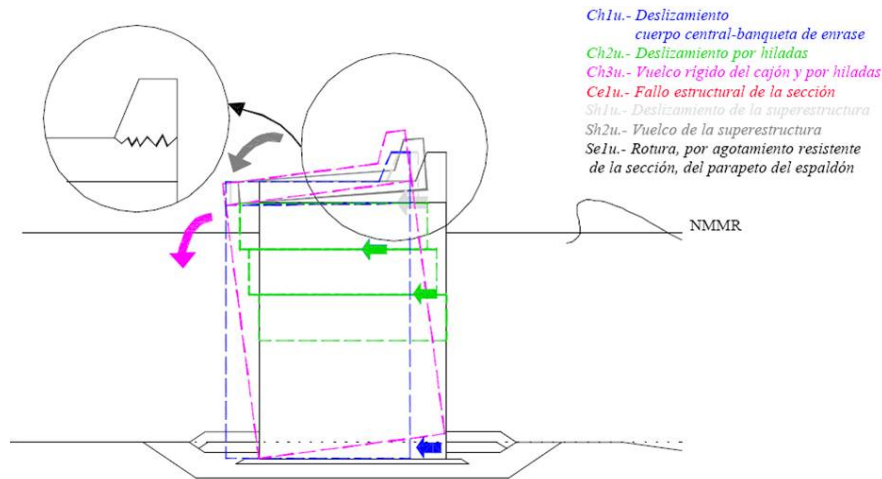
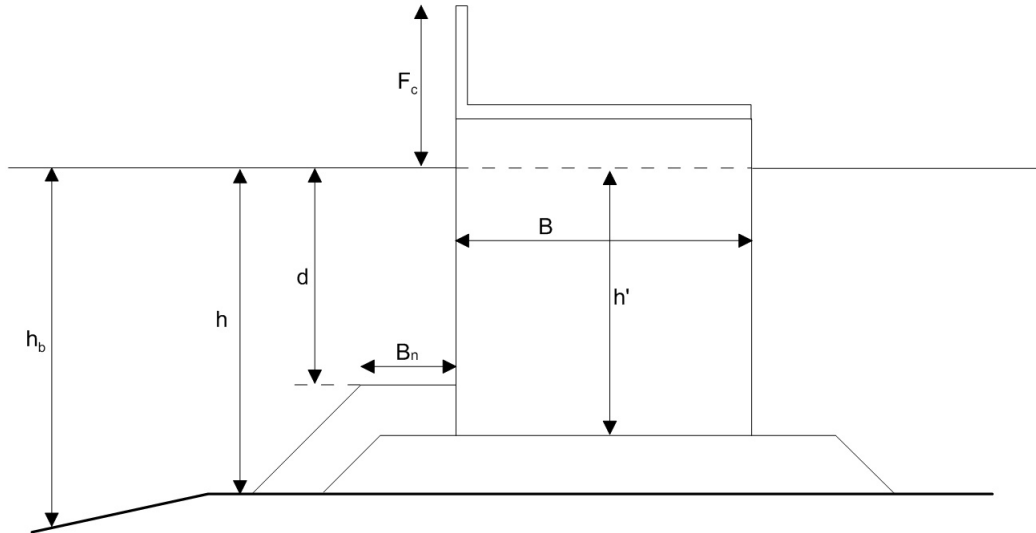


Figura 1.1: Modos de fallo de un dique vertical.

1. Columna estática de agua. Se mide respecto a la bajamar máxima viva equinocial (BMVE).
2. Marea astronómica,  $\eta_{MA}$ . Su valor depende de la zona, en España la carrera de marea en el Mediterráneo es del orden de 0.3-0.6 m, mientras que en el atlántico puede llegar a superar los 4 m.
3. Marea meteorológica,  $\eta_{MM}$ . Se debe al viento y al gradiente de presiones  $\nabla p$ . Este gradiente suele estar asociado al paso de una borrasca.
4. Oleaje (ha sido descrito en profundidad durante la primera parte del curso).
5. Tsunami (su consideración depende de la zona).
6. Tiro de amarras (cuando los barcos se encuentran amarrados a muelle, ejercen unos esfuerzos sobre los bolardos que se transmiten al dique y que deben ser tenidos en cuenta en el cálculo).
7. Otros agentes de uso y explotación (dependerá de cada puerto o instalación).
8. Terreno, que sólo se considera para la cimentación, es decir, se emplea el coeficiente de rozamiento, pero no se consideran los esfuerzos que el terreno puede ejercer sobre la estructura.

El tipo de fallo rígido (vuelco o deslizamiento) **ocurre debido a la sollicitación mayor o máxima de todas las olas del estado de mar**. Es decir, si se produce el fallo será consecuencia de la ola mayor. Ello implica que dependerá del número de olas que compongan el estado de mar, es decir, no será igual la ola mayor de un estado de mar compuesto por 10 olas que otro compuesto por 1000. ¿Cómo se procedería? Se puede asumir que si el número de olas  $N$  que se considera es superior a 5000, en ese caso la ola mayor más probable (moda de las olas mayores) viene caracterizada por  $H_{\max} = 1,8H_s$  y su periodo asociado,  $\bar{T}_z$ . Ello se debe a que en general la relación entre la altura de ola máxima y la altura de ola significativa viene dada por la relación  $H_{\max}/H_s \simeq 0,706\sqrt{\ln N_0}$ , siendo  $N_0$  el número de olas del registro. Dado que un registro de 5000 olas se considera representativo, los valores de altura de ola máxima se estima que rondarán entre 1.6 y 2 veces la altura de ola significativa, de donde se selecciona el valor de 1.8 conforme a criterios de distintos expertos en la temática.

En estas condiciones se puede asumir que el dique está sollicitado por un tren de ondas monocromático caracterizado por  $H_{\max} = 1,8H_s$  y su periodo medio asociado,  $\bar{T}_z$ . Asimismo, en general se asume que se dan condiciones de reflexión perfecta.



**Figura 1.2:** Esquema geométrico de una sección tipo de un dique vertical.

#### Comentario 1.

La motivación de emplear el periodo medio y no el de pico radica en que las mayores alturas de ola se suelen presentar con periodos medios y no de pico.

Por tanto, a modo de resumen, se va a analizar la estabilidad frente a modos de fallo deslizamiento y vuelco adscritos a ELU para un tren de ondas monocromático caracterizado por  $H_I = 1,8H_s$ ,  $T = T_z$  y  $\theta = \theta_{\text{media}}$ .

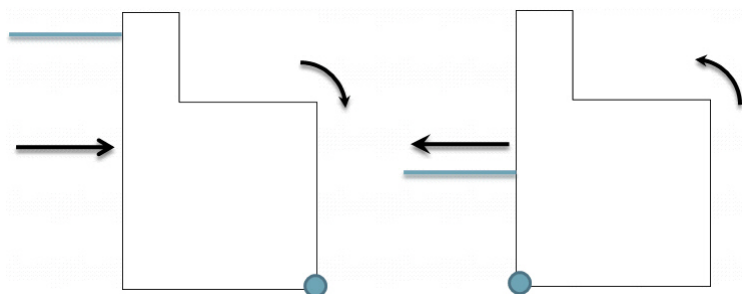




## 2.1. Introducción

A continuación se va a proceder a detallar el cálculo de los diques verticales. Conviene recordar que uno de los requisitos esenciales del correcto diseño de los diques verticales es evitar que la ola rompa sobre el dique, se debería formar una onda estacionaria o parcialmente estacionaria. En caso de que la ola rompa, se producen presiones de impacto que producen mayores esfuerzos sobre el dique. Para tener en cuenta ambos efectos se definen diferentes formulaciones que luego se comentarán.

Asumiendo que se produce reflexión perfecta sobre el dique, se pueden producir dos situaciones extremas: (1) cresta de la onda estacionaria sobre el paramento vertical y (2) seno de la onda estacionaria sobre el paramento vertical (figura 2.1).



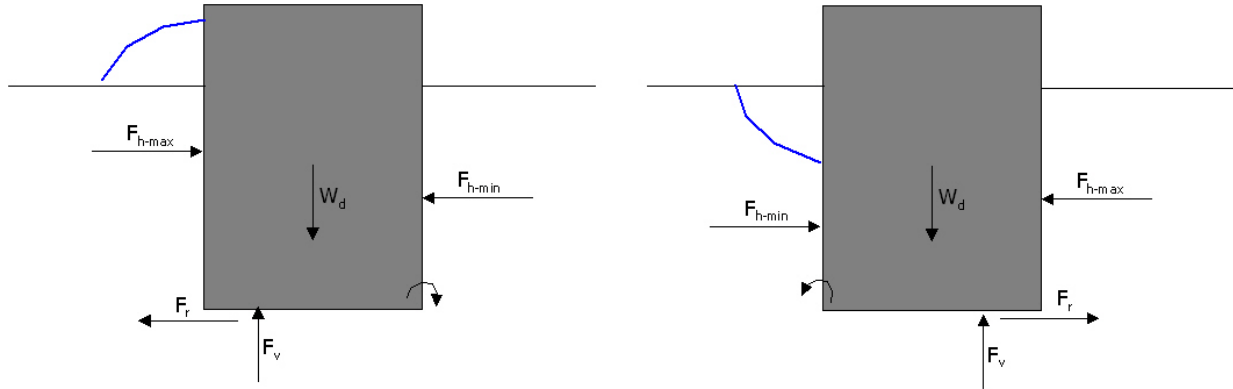
**Figura 2.1:** Situaciones extremas (nivel máximo y mínimo) para las que debe garantizarse la estabilidad del dique.

En el primer caso se producen unas presiones totales sobre el dique que son superiores a las presiones hidrostáticas, mientras que en el segundo caso las presiones son menores. El dique debe ser calculado para las dos condiciones extremas, aunque con frecuencia sólo se calcula para la cresta por considerarse que es una situación más desfavorable.

En los cálculos que se describen a continuación se va a hacer una hipótesis fundamental: *se va a asumir que si la altura a sotamar es menor que 0.2 veces la altura de ola incidente, en ese caso se desprecia la oscilación a sotamar*. Desde un punto de vista físico supone asumir que se considera una sección lo suficientemente alejada del morro ( $> 6L$ ) para despreciar la difracción ( $k_d < 0,2$ ). Cuando no se puede aplicar esta hipótesis es necesario considerar las presiones de una onda progresiva en el cálculo del dique.

Así pues, finalmente se tiene un dique que por barlomar está solicitado por un tren de ondas estacionario o parcialmente estacionario, mientras que por barlomar está solicitado sólo por nivel del mar, es decir, se asume que no hay ola y se desprecian las presiones dinámicas.

Una vez visto esto, conviene destacar que se dan dos situaciones desfavorables, una asociada a la presencia de la cresta y otra del seno sobre el paramento vertical. Ello proporciona dos esquemas de situaciones desfavorables al vuelco y deslizamiento que se muestran en los siguientes esquemas (figura 2.2).



**Figura 2.2:** Esquema de fuerzas asociado a cada una de las situaciones extremas.

Según lo expuesto en las figuras, es necesario evaluar las distintas fuerzas verticales y horizontales que actúan sobre la sección, a partir de las cuales se estiman asimismo los momentos que ejercen dichas fuerzas sobre la sección respecto a su punto más desfavorable. Asimismo, hay que considerar que una parte de la sección puede estar sumergida.

Con todo esto se muestra muy sencillo establecer las ecuaciones de verificación (métodos de nivel I). La resultante de las fuerzas horizontales será

$$F_H = f_H^B - f_H^S \quad F_V = W_e + W_s - f_v$$

Con el valor de la fuerza vertical, el rozamiento será proporcional a su valor, de forma que se tendrá

$$R = \mu F_V$$

Finalmente, con los datos anteriores se puede evaluar el coeficiente de seguridad al vuelco y al deslizamiento, que se definirá como el cociente entre los términos favorables al no fallo y los desfavorables al fallo. El planteamiento es similar para el caso del coeficiente de seguridad al vuelco. En España se suele imponer un valor de 1.5, aunque a veces con 1.2 es suficiente.

## 2.2. Método de cálculo

A continuación se van a describir las diferentes teorías que se emplean para el cálculo de los diques verticales. Este cálculo se basa en estimar las presiones y subpresiones que se ejercen sobre el dique vertical, cuyos valores dependerán de la forma que tenga la onda de incidir sobre el paramento. Por ello, según esta forma de incidir, existen distintos métodos de cálculo. A continuación se describen dichos métodos y cómo seleccionar el adecuado para cada caso. Uno de los factores que más influye es la rotura de la ola, ya que de eso dependerán como sean las presiones sobre la estructura.

Para el cálculo de las presiones sobre los diques verticales (y a partir de ellas realizar el dimensionamiento) se dispone de tres teorías principales:

1. Cálculo por Teoría Lineal (ya estudiado en la asignatura)

2. Cálculo usando la Teoría de Goda (1973)
3. Cálculo usando la Teoría de Takahashi et al. (1994)

Cada una tiene unas limitaciones, y el emplear una u otra se basa en la rotura de ola e influencia de la berma de la estructura.

### 2.3. Selección de la formulación: criterio de rotura de la ola

En este apartado se exponen los criterios para seleccionar el método de cálculo de los diques verticales. Para ello se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Rotura de la ola por fondo

Como se vió en el tema de rotura de la ola, se pueden dar 3 casos: ondas progresivas, estacionarias y parcialmente estacionarias. En los diques verticales la onda que se forma se encuentra en uno de los dos últimos casos, que además son los más restrictivos para la rotura, por lo que serán los que se usen.

- a) Si la estructura se encuentra en profundidades reducidas, el criterio de rotura se puede expresar como

$$\frac{H_I}{h} \approx 0,69$$

Según el valor del cociente (mayor o menor), la ola rompe o no rompe.

- b) Si la estructura no se encuentra en profundidades reducidas, es probable que se encuentre en profundidades intermedias. En ese caso el criterio de rotura se puede expresar como

$$\left(\frac{H_I}{L}\right)_{\max} = 0,11 \tanh kh$$

Es decir, se compara el valor  $H_I/L$  con  $0,11 \tanh kh$  para la zona de estudio dada, y se tiene:

- Si  $H_I/L > 0,11 \tanh kh$ , la ola rompe.
- Si  $H_I/L < 0,11 \tanh kh$ , la ola no rompe.

#### Comentario 2.

La expresión para la rotura

$$\left(\frac{H_I}{L}\right)_{\max} = 0,11 \tanh kh$$

es supuesto una onda estacionaria. Si se forma una onda parcialmente estacionaria sobre el paramento, tal y como se expuso en el tema 2, el criterio de rotura sería (Dwata y Kiyono)

$$\left(\frac{H_I}{L}\right)_{\max} = \left[0,11 + 0,03 \frac{1 - K_R}{1 + K_R}\right] \tanh kh$$

Según que  $|R|$  tome los valores 0 o 1, se tiene  $0,14 \tanh kh$  o  $0,11 \tanh kh$ , que son los valores extremos de onda progresiva y estacionaria.

Por tanto, según los criterios anteriores, se pueden dar o no las condiciones para que la ola rompa sobre el dique vertical por profundidad.

Del análisis anterior se concluye que **si la ola rompe, se emplea la teoría de Takahashi et al. (1994) para el cálculo de las presiones sobre el dique**. Ello se debe a que si la ola rompe, se producen fuertes presiones de impacto sobre el dique vertical cuyo cálculo preciso se recoge en la formulación de Takahashi. Como en este caso la ola llega rota al dique por profundidad, es decir, la ola rompe claramente antes del dique y llega rota, **la altura de ola de cálculo que se emplea es la de rotura por fondo**.

En caso de que la ola no rompa por fondo, pasamos al siguiente punto (puede ser que la ola rompa por presencia de la berma).

## 2. Influencia de la berma.

Supuesto que no se dan las condiciones para que la ola rompa por profundidad, puede darse el caso de que la ola rompa sobre la estructura debido a la presencia de la berma, cuyo efecto es disminuir la profundidad de agua, induciendo así a la rotura. Los factores que influirán en dicha posible rotura son la profundidad y anchuras relativas de la berma a pie de dique. Esto viene determinado por el valor de los parámetros  $(h - d)/h$  y  $B_b/L$ , siendo  $h$  la profundidad a pie de dique,  $d$  la profundidad sobre la berma,  $B_b$  la anchura de la berma y  $L$  la longitud de onda. Así, se tiene

- Si  $(h - d)/h \simeq 0$ , en ese caso  $d \sim h$ , lo que indica que la berma no influye en la profundidad. Así pues, se establece que conforme menor sea el valor de  $(h - d)/h$ , menor será la influencia de la berma y menos probabilidades hay de que rompa la ola. Se concluye que si  $(h - d)/h < 0,3$ , no influye la berma en la rotura de la ola. Si los valores son superiores, influirá en la rotura y puede llegar a producirla.
- Supuesto que la berma induce la rotura según el criterio anterior, el que realmente se produzca dependerá de la anchura relativa de la misma, ya que si la berma es muy estrecha no dará tiempo a que la ola rompa. Si  $B_b/L \simeq 0$ , en ese caso no hay distancia para que la rotura de ola se produzca (la berma es demasiado estrecha). Así pues, se establece que si  $B_b/L < 0,01$ , la ola no rompe. En caso contrario, la ola puede romper sobre el dique ya que la berma tendría la longitud suficiente para ello.

Así pues, para que se produzca la rotura de la ambos criterios se deben cumplir de forma simultánea, en cuyo caso la ola rompería (figura 2.3).

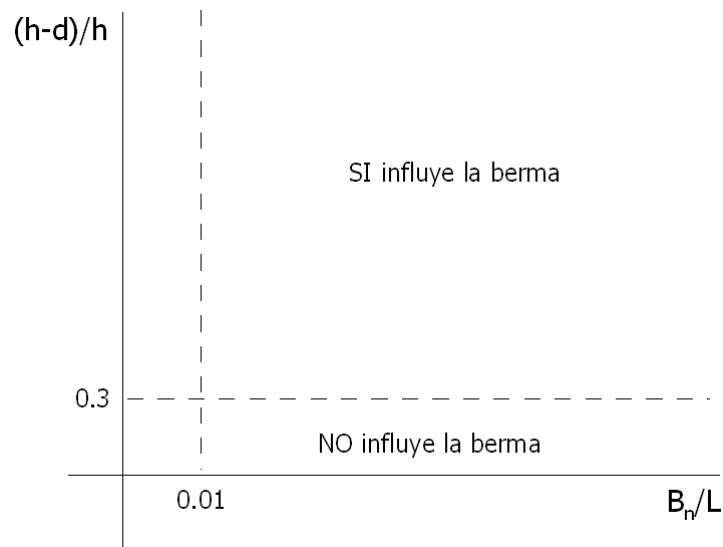
Del análisis anterior se concluye que **si la berma induce la rotura de la ola, se emplea la teoría de Takahashi et al. (1994) para el cálculo de las presiones sobre el dique**. Los motivos son los mismos, aunque hay una diferencia respecto al caso de que la ola rompa por fondo: en este caso lo que sucede es que la ola está rompiendo justo a la altura del dique, es como si estuviese rompiendo directamente sobre el paramento. En ese caso, la formulación de Taka incluye dicho efecto, por lo que la altura de cálculo que hay que usar es la  $1,8H_I$ .

En caso de que no rompa por presencia de la berma, pasamos al siguiente punto.

## 3. Gráfico general.

Si la berma no influye ni induce la rotura de la ola, en ese caso se entra en el gráfico, del que se obtiene la teoría que se debe emplear (figura 2.4). No se puede usar directamente el gráfico porque no incluye el efecto de la berma.

A continuación se resumen los pasos que, desde un punto de vista genérico, es necesario seguir para conocer el comportamiento de la ola en su interacción con el dique y seleccionar la teoría para el cálculo.

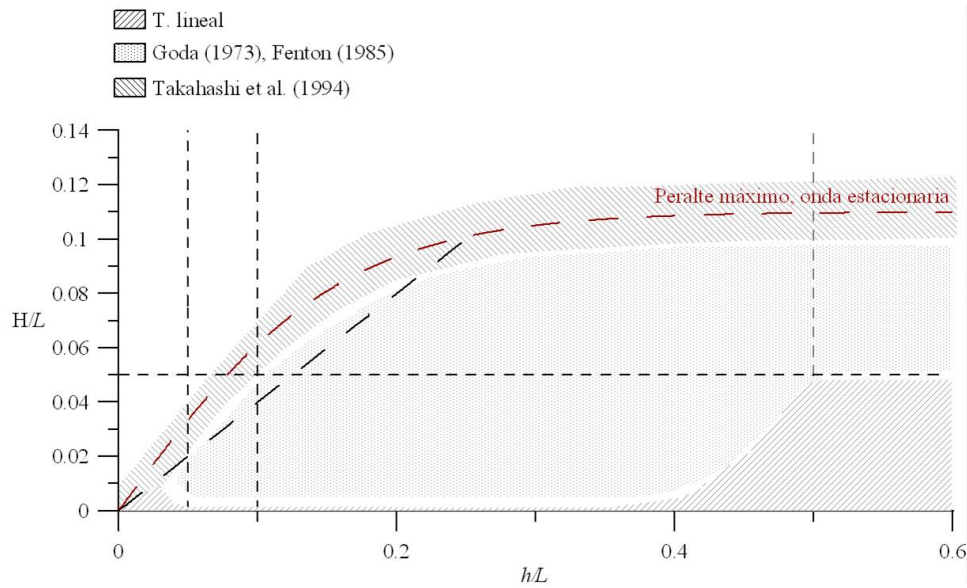


**Figura 2.3:** Influencia de la berma en la rotura de la onda.

### Resumen 3.

1. Se parte de conocer unos datos de oleaje en profundidades indefinidas (p. ej. boya de oleaje, datos de Puertos del Estado, etc.).
2. A partir de esos datos se elabora el régimen extremal de oleaje, que permite seleccionar la altura de ola significativa que se corresponde con un cierto periodo de retorno.
3. Dado el periodo de retorno, se selecciona dicha altura de ola, de forma que se sabe que la ola de cálculo vendrá caracterizada por  $H_I = H_{\max} = 1,8H_s$  y su periodo y dirección medias asociados.
4. La ola de cálculo (caracterizada por los parámetros anteriores) se propaga hasta la zona de estudio.
5. Se comprueba la rotura de ola por profundidad. Si rompe, se calculará el dique empleando el método de Takahashi et al. (1994). En caso contrario, se analiza si puede romper por presencia de la berma. Si lo hace, se calcula nuevamente con Takahashi et al. (1994). Sino lo hace se calcula con la teoría que se obtenga de entrar en el gráfico general.

A continuación pasamos a describir las teorías que se emplean para el cálculo.



**Figura 2.4:** Teorías a emplear para el cálculo del dique vertical.

## 2.4. Fórmula de Goda (1973)

Se asumen conocidos los valores de altura de ola máxima, periodo y dirección de propagación (obtenidos según el esquema anterior). Se define el ángulo  $\beta$  como la dirección de propagación, cuyos valores serán

- Si  $\theta > 15^\circ$ , entonces  $\beta = \theta - 15^\circ$ .
- Si  $\theta < 15^\circ$ , entonces  $\beta = \theta$

Así pues,  $\beta$  se define de forma que el ángulo sea lo más normal posible. Con frecuencia, si su valor se encuentra entre  $\pm 20^\circ$  se toma directamente  $0^\circ$ , quedando del lado de la seguridad.

La figura 2.5 muestra el esquema de presiones sobre el paramento del dique vertical. Es importante tener claras las distintas distancias a considerar. En concreto,  $\eta_*$  se define como la máxima cota hasta la que actúa la presión dinámica,  $h$  se define a pie de dique y  $h_b$  se mide a una distancia del dique de 5 veces la altura de ola significativa. En caso de ser el fondo plano,  $h = h_b$ , en caso contrario tendrán distinto valor.

Así pues, teniendo en cuenta lo anterior, el cálculo de las presiones se realiza como

- Cota que alcanza la presión debida a la onda

$$\eta_* = 0,75 (1 + \cos \beta) H_{\max}$$

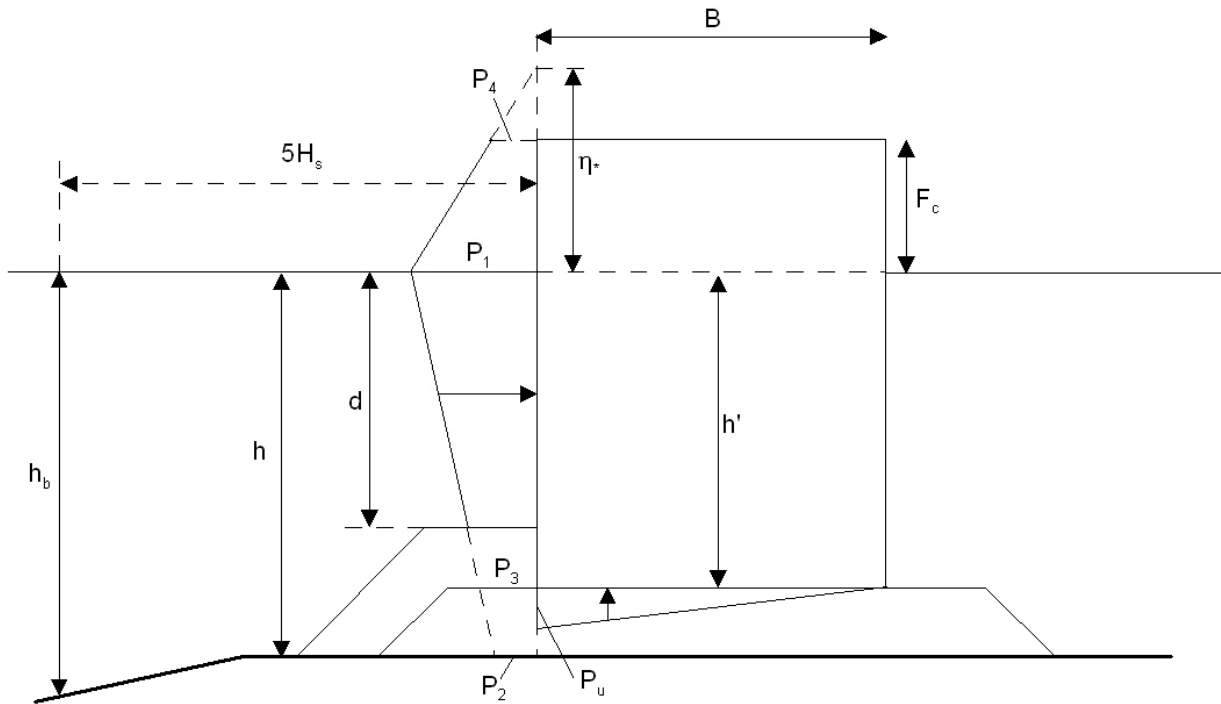


Figura 2.5: Esquema de presiones sobre el paramento (Fórmula de Goda)

- Presiones sobre el paramento vertical

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta) \gamma_w H_{\max}$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh kh}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$p_4 = \begin{cases} p_1 \left(1 - \frac{F_c}{\eta_*}\right) & \text{si } \eta_* > F_c \\ 0 & \text{si } \eta_* < F_c \end{cases}$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)\alpha_1 \alpha_3 \gamma_w H_{\max}$$

Aunque se incluye el valor de  $p_2$ , no es necesario para el cálculo de las fuerzas debidas a la onda. Los valores de los distintos coeficientes  $\alpha_i$  son:

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi \frac{h}{L}}{\sinh(4\pi \frac{h}{L})} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi \frac{h}{L})} \right]$$

## 2.5. Fórmula de Takahashi et al. (1994)

Una vez vista la fórmula de Goda, la de Takahashi es similar, presentando más parámetros relacionados con la berma. Se tendría

- Cota que alcanza la presión debida a la onda

$$\eta_* = 0,75(1 + \cos \beta) H_{\max} \lambda_1$$

- Presiones sobre el paramento vertical

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha^* \lambda_2 \cos^2 \beta) \gamma_w H_{\max}$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh kh}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \gamma_w H_{\max}$$

Los valores de los distintos parámetros son:

- Los valores de  $\lambda_i$  dependen de la tipología de dique (ej. dique vertical liso, dique ranurado, etc.). En nuestro caso, se tomarán  $\lambda_i = 1$ .



- Los coeficientes  $\alpha_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  serán

$$\alpha_1 = 0,6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi \frac{h}{L}}{\sinh(4\pi \frac{h}{L})} \right]^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\}$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi \frac{h}{L})} \right]$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{h_c^*}{\eta^*} \quad \text{siendo} \quad h_c^* = \min\{\eta^*, F_c\}$$

- Quedaría el valor de  $\alpha^*$ , que será

$$\alpha^* = \max\{\alpha_2, \alpha_I\} \quad \text{siendo} \quad \alpha_I = \alpha_{I0} \alpha_{I1}$$

$$\alpha_{I0} = \begin{cases} \frac{H_{\max}}{d} & \text{si } H_{\max} \leq 2d \\ 2 & \text{si } H_{\max} > 2d \end{cases}$$

$$\alpha_{I1} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & \text{si } \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{\frac{1}{2}}} & \text{si } \delta_2 > 0 \end{cases}$$

Finalmente, los valores de  $\delta_i$  serán

$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \delta_{11} & \text{si } \delta_{11} \leq 0 \\ 15 \delta_{11} & \text{si } \delta_{11} > 0 \end{cases}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4,9 \delta_{22} & \text{si } \delta_{22} \leq 0 \\ 3 \delta_{22} & \text{si } \delta_{22} > 0 \end{cases}$$

siendo

$$\delta_{11} = 0,93 \left( \frac{B_b}{L} - 0,12 \right) + 0,36 \left( \frac{h-d}{h} - 0,6 \right) \quad (2.1)$$

$$\delta_{22} = -0,36 \left( \frac{B_b}{L} - 0,12 \right) + 0,93 \left( \frac{h-d}{h} - 0,6 \right) \quad (2.2)$$

Para la estimación de  $\alpha_{I1}$  se puede emplear directamente la siguiente figura 2.6. Se trata de un ábaco en el que entrando con el valor de  $(h-d)/h$  y  $B_b/L$ , se interpola entre las distintas curvas y se obtiene el valor de  $\alpha_{I1}$ . Posteriormente se multiplica por  $\alpha_{I0}$  y se obtiene el valor de  $\alpha_I$ .

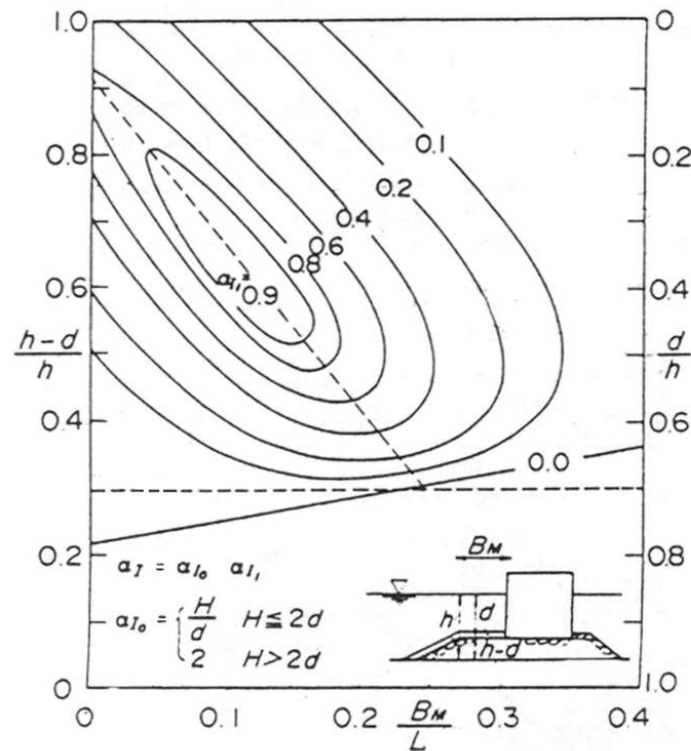


Figura 2.6: Valor del coeficiente  $\alpha_{I1}$ .

## 2.6. Coeficientes de seguridad

Finalmente, una vez estimadas las presiones se calcularían las fuerzas y momentos, a partir de los cuales se pueden calcular los coeficientes de seguridad al vuelco y al deslizamiento. A modo de ejemplo se indican los valores de la fuerza horizontal debida a las presiones, y de su momento.

La fuerza horizontal resultante será

$$f_H = \frac{1}{2}(p_1 + p_3)h' + \frac{1}{2}(p_1 + p_4)h_c^*$$

El momento debido a las presiones respecto al punto más desfavorable será

$$M_p = \frac{1}{6}(2p_1 + p_3)h'^2 + \frac{1}{2}(p_1 + p_4)h'h_c^* + \frac{1}{6}(p_1 + 2p_4)h_c^{*2}$$

Conocidas todas las fuerzas (favorables y desfavorables al fallo) y sus momentos (favorables y desfavorables) al fallo, se establecen los coeficientes de seguridad al vuelco y al deslizamiento.

- Deslizamiento:

$$C_s = \frac{F_R}{F_H} = \frac{\mu(W_s - F_V)}{F_H} > 1,2$$

- Vuelco:

$$C_s = \frac{M_W}{M_V + M_H}$$

donde el numerador son los momentos estabilizadores (peso) y el denominador los momentos volcadores.

Es importante dejar claro que el planteamiento del equilibrio de fuerzas suele establecerse para una sección tipo del dique, sobre la que se asumen una serie de hipótesis. Así, se asume que la incidencia es normal sobre el dique, con lo que las cargas a lo largo de todo el dique están en fase. Si la incidencia no es normal, las cargas no estarían en fase, y en planta el dique estaría sometido a diferentes cargas según la sección considerada. Por ello, se asume que la sección tipo es representativa de una longitud  $L$  de dique cuyo comportamiento sea estructuralmente uniforme. Caso particular, como ya se comentó, son los morros.

## 2.7. Rebase

En las secciones anteriores se ha mostrado el procedimiento de cálculo para dimensionar la sección conforme a los criterios de no fallo frente al vuelco y deslizamiento. A continuación se muestra como estimar el rebase, que es un modo de fallo adscrito a ELO.

El rebase se produce cuando el agua inunda el trasdos del dique, lo que puede afectar (en su caso) tanto a la seguridad de las personas como a la operatividad del muelle u otros elementos existentes. Para su estimación se va a seguir el trabajo de Franco y Franco (1999).

## 2.8. Caudal de rebase

- Los principales parámetros que influyen en el rebase de una estructura son el francobordo,  $F_c$ , la altura de ola significante,  $H_s$ , y el caudal de descarga por unidad de longitud, también denominado caudal medio de rebase,  $q$ .
- Se asume que estas variables se relacionan mediante una expresión adimensional de la forma

$$Q = a \exp(-bR)$$

donde  $Q$  es el caudal de descarga adimensional definido como  $Q = q/\sqrt{gH_s^3}$  y  $R$  es el francobordo relativo definido como  $R = F_c/H_s$ .  $a$  y  $b$  son parámetros que dependen de la forma de la estructura y de como se comporte el oleaje en su interacción con la misma.

- Así pues, si se conocen los valores de  $a$  y  $b$  se puede obtener el valor de  $Q$  y, a partir de él, dimensionar el francobordo para garantizar unas ciertas condiciones de rebase.

### Comentario 4.

Dado que el rebase es un ELO y no un ELU, se trabaja con la altura de ola significante y el periodo de pico, y no con la altura de ola máxima y el periodo medio.

- Según los resultados de los ensayos de laboratorio que llevaron a cabo Franco y Franco (1999), los valores de  $a$  y  $b$  serían los que se indican en la siguiente expresión

$$Q = 0,082 \exp \left[ -\frac{3}{\gamma_{\theta\sigma}\gamma_{\text{geom}}} R \right]$$

- El parámetro  $\gamma_{\text{geom}}$  depende de la geometría del botaolas. Cuando el paramento del dique es recto y vertical, toma valor **unidad** (casi siempre). Si el frontal es curvo su valor es distinto (se consulta en el artículo).
- El parámetro  $\gamma_{\theta\sigma}$  depende del ángulo de incidencia del oleaje, tomando los siguientes valores:

$$\gamma_{\theta\sigma} = \begin{cases} \cos \theta & 0 \leq \theta \leq 37^\circ \\ 0,79 & \theta > 37^\circ \end{cases} \quad (2.3)$$

- Así pues, dado el ángulo de incidencia del oleaje (conoceríamos  $\gamma_{\theta\sigma}$ ), conocido el valor de  $\gamma_{\text{geom}}$ , y dado el francobordo y la altura de ola se puede estimar el caudal que rebasa.
- Asimismo, dado un cierto caudal limite que no se desea que sea rebasado, se puede calcular el francobordo necesario para satisfacer dicha condición.

## 2.9. Porcentaje de olas que rebasan

Otra forma de abordar el cálculo del rebase es estimando el porcentaje de olas que rebasan, que se define como

$$P_{ow} = \frac{N_{ow}}{N_w}$$

siendo  $N_w$  el número total de olas, y sea  $N_{ow}$  el número total de olas que rebasan.

Este porcentaje se relaciona con el francobordo relativo a través de la ecuación

$$P_{ow} = \frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[ - \left( \frac{1}{c} \frac{F_c}{H_{si}} \right)^2 \right]$$

donde  $c$  es un coeficiente empírico, cuyo valor es  $c = 0,91\gamma_{P_{ow}}$ , siendo  $\gamma_{P_{ow}} = 0,875 - 0,0025\beta$ .