

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

Por Rafael DEL MORAL CARRO

Director del Laboratorio de Puertos

y Rafael ESCUTIA CELDA

Ingeniero de Caminos del Laboratorio de Puertos

EL desarrollo del transporte marítimo de los últimos años, ha ido forzando la capacidad de los barcos hacia un gigantismo que ha obligado a los grandes puertos a buscar nuevas áreas adecuadas a este incremento de calados, al agotarse las áreas protegidas, bien natural o artificialmente, que el hombre había escogido en anteriores décadas.

Este nuevo planteamiento, en áreas costeras profundas hasta ahora no utilizadas, da como consecuencia una gran inseguridad, al ignorar si la extrapolación de las teorías empleadas hasta la fecha, y sancionadas por la práctica, es correcta o no.

La experiencia de importantes averías producidas en diques de grandes profundidades hace sospechar que la extrapolación del tratamiento determinista preconizado por Iribarren en la determinación de las características del oleaje, que él mismo admitía ser una simplificación de la complejidad de la situación real que se da en la naturaleza, no es adecuada. Igualmente, la generalización de sus fórmulas para el cálculo de los pesos de los elementos del manto principal, deducidas mediante oleaje regular, y relacionadas con el punto anterior mediante un simple aumento del 25 % de la altura de cálculo

para salvar el paso del oleaje regular al real irregular, es inadecuada dentro del campo de grandes profundidades a que nos referimos. La frontera que separa ambos campos ya es más difícil de delimitar.

El problema se complica, aún más, por la carencia actual de fuentes de información fiables de datos de oleaje sobre el cual se pueda elaborar una estadística representativa de los fenómenos locales, no teniendo otra alternativa el proyectista que aceptar como buenas unas bases de partida muy discutibles. Las campañas de toma de datos es uno de los objetivos prioritarios que persigue el Laboratorio de Puertos y desde estas líneas hacemos una llamada de atención para concienciar a los portuarios sobre las graves inconvenientes que plantea la pobreza de información básica.

El proyecto definitivo de las obras de abrigo de un puerto es función de las necesidades previstas en su desarrollo y de los condicionantes marítimos.

Elegido el año horizonte para el desarrollo del puerto, mediante una previsión de tráfico podremos conocer las consecuentes necesidades tanto de áreas de agua abrigada como de líneas de atraque, equipo de manipulación, superficies de almacenamiento y vías de comu-

nicación que dentro de una racional explotación portuaria nos den una capacidad de tráfico acorde con la previsión realizada.

Estas necesidades deben quedar reflejadas en unos planos de planta compatibles con los condicionamientos físicos propios del puerto tales como la presencia de cauces que impidan el desarrollo del puerto en determinada dirección, el entorno ciudad-puerto, la batimetría y geotécnica de los posibles emplazamientos de las obras y sobre todo, por las condiciones que impone el mar como agente dominante.

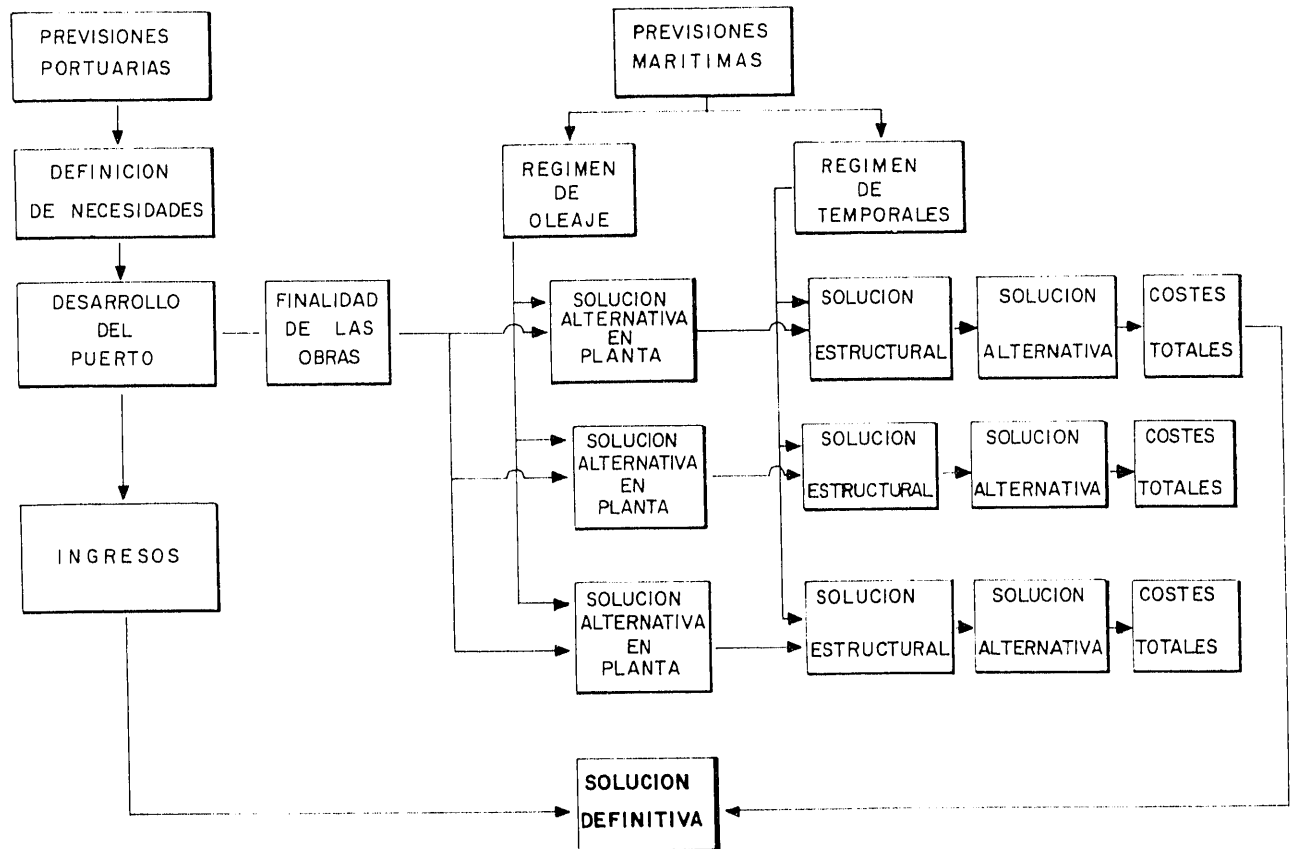
En el análisis de las diversas soluciones alternativas, la acción del mar interviene en dos facetas diferentes. Por un lado será necesario estudiar el régimen de oleaje para definir la situación en planta de los diques de forma que las condiciones de abrigo creadas permitan la operatividad del puerto durante un porcentaje de días suficiente. Fijada la planta de las soluciones alternativas, el siguiente paso es determinar, en función de las condiciones extremas del mar definidas por el régimen de temporales, la solución estructural óptima para cada solución obteniéndose entonces la definición completa de las alternativas y por lo tanto el coste de cada una de ellas que deberá incluir, además de los costes de construcción, las pérdidas previstas por averías en el dique y las debidas al porcentaje de tiempo en el cual las funciones portuarias deberán suspenderse por no cumplirse las condiciones de abrigo requeridas.

La comparación de los costes con los ingresos portuarios, calculados según las hipótesis de partida, será la base para la decisión final.

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

EXPLOTACION Y PLANIFICACION PORTUARIA

OBRAS PORTUARIAS



Este trabajo trata únicamente del proceso a seguir para llegar a la solución estructural óptima, determinada ya la solución en planta. Para ello, es necesario:

1. El cálculo o dimensionamiento de las diversas secciones del dique ante diferentes hipótesis de temporales.

2. Elección de unos criterios que lleven a la obtención de la solución estructural óptima.

El cálculo o dimensionamiento de las secciones de un dique será objeto de otra publicación donde se expondrán los diversos aspectos a considerar en el cálculo, así como los métodos normalmente empleados. Sin embargo, y dada su estrecha relación con el punto segundo, se incluye en esta exposición unas notas necesarias para poder comprender y juzgar los procedimientos seguidos para llegar a la solución óptima.

Por tanto, en este artículo,

que es un resumen avance de una de las publicaciones de la serie patrocinada por la Dirección General de Puertos, se pretende reflejar todos estos problemas, recogiendo la inquietud de multitud de consultas presentadas ante este Laboratorio. Los autores hemos intentado tener en cuenta las tendencias existentes, basándonos en la experiencia acumulada: en la dirección de los ensayos realizados en el Laboratorio de Trondheim (Noruega), para el dique en talud del superpuerto de Bilbao; en el asesoramiento de los realizados en el Danish Hydraulic Institute para el dique vertical de la IV Planta Siderúrgica de Sagunto; en la preparación de las últimas conclusiones del «Rapport Final de la 2^a Commission Internationale pour l'Etude des effets des Lames» (1977) del A.I.P.C.N., así como en los primeros trabajos reali-

zados para la 3.^a «Commission Internationale pour l'etude des effets des Lames», constituida expresamente con este fin.

A lo largo de las sucesivas páginas, hemos querido expresar nuestra prudencia ante todo proceso matemático que, al encajenar sucesivas hipótesis cada una de ellas con errores perfectamente naturales del orden del 10 al 20 %, sin saber hacia dónde se dirigen estos errores, nos puede llevar a conclusiones finales posiblemente separadas de la realidad hasta incluso un 200 %.

Igualmente expresamos nuestra intranquilidad ante la dificultad de generalizar resultados, ya que al considerar todas las variables que realmente influyen en un fenómeno, es necesario multiplicar hasta tal punto los ensayos que hacen inviable el buscar seriamente resultados generales fiables.

COMPORTAMIENTO DE UN DIQUE ANTE EL OLEAJE

CUANDO se somete un dique a la acción de un temporal de intensidad superior a su capacidad resistente, se producen averías que pueden llegar a considerarse como destrucción del dique si la intensidad del temporal alcanza una cierta magnitud. El conocimiento de la evolución de las averías, es decir, del comportamiento del dique frente al oleaje, y consecuentemente, de los métodos apropiados de cálculo, tiene una importancia fundamental para llegar a su correcto dimensionamiento.

Los métodos de cálculo pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos semi-empíricos o empíricos generales.
- Métodos empíricos particulares.

En el primer grupo se incluyen aquellos métodos basados en consideraciones teóricas, y ajustados a través de la experimentación, cuya aplicación puede ser considerada general dentro de una serie de limitaciones dependientes de la amplitud de la experimentación realizada. El inconveniente que presentan estos métodos, independientemente de su mejor o peor exactitud, es consecuencia de la necesidad de la generalización, que obliga a realizar los ensayos de tarado de la formulación en unas condiciones poco reales. Así por ejemplo, los ensayos sobre diques en talud han sido efectuados con un talud indefinido y los correspondientes a diques verticales, sobre un paramento que no permite el rebase. La aplicación de los resultados a los casos particulares, donde el talud no es indefinido, y se corona éste con un espal-

dón reflejante; o al tratarse de un dique vertical, el disponer un botaolas para disminuir el rebase, puede conducir a resultados erróneos. A estas diferencias en cuanto a la forma de la sección, se puede añadir la forma de realización de los ensayos en cuanto al oleaje a que está sometido. Gran cantidad de fórmulas de aplicación general han sido obtenidos a través de ensayos con oleaje regular o monocromático. Este tipo de oleaje es esencialmente diferente al existente en la naturaleza. Desde hace más de una década se han realizado ensayos tendentes a conseguir una fórmula de equivalencia entre oleajes regular e irregular sin resultados definitivos hasta el momento. Por otro lado, el gran número de variables que intervienen en la definición de un temporal en la naturaleza impide la realización de ensayos con oleaje irregular de forma general. Debido a estas deficiencias, sólo es recomendable el empleo de estos métodos a nivel de anteproyecto debiendo recurrir siempre que sea posible a los métodos empíricos particulares para llegar al dimensionamiento definitivo.

Los métodos empíricos particulares consisten en ensayos en modelo reducido de las diversas secciones tipo del dique realizados en las condiciones más próximas posibles a las existentes en la naturaleza. El equipo de que constan los canales de ensayo es capaz de reproducir temporales con las características que se deseen. Con ello se consigue comprobar, previamente a la construcción del dique, el efecto de los posibles temporales y dimensionarlo de forma mucho más

aproximada que con los métodos anteriores.

El desarrollo de las averías en los diques difiere según su tipología. Pueden considerarse dos grandes grupos a efectos de comportamiento: los diques verticales y los diques en talud.

Los primeros están constituidos básicamente por un muro cuyo paramento del lado del mar es vertical construido normalmente mediante bloques o cajones prefabricados. El peso del muro a través del rozamiento con la banqueta de cimentación produce un esfuerzo horizontal resistente que deberá ser capaz de soportar los esfuerzos producidos por el temporal de cálculo. Estos esfuerzos en síntesis son de dos tipos: un esfuerzo horizontal sobre la cara exterior del dique y un esfuerzo vertical ascendente debido a la subpresión generada por el paso de la ola. Cuando las sollicitaciones debidas al oleaje superan un cierto umbral, el dique deja de ser estable produciéndose un desplazamiento de la cuya magnitud depende de la intensidad de aquellas sollicitaciones y de su duración. Aunque podría admitirse, en función de las características del dique, un desplazamiento acumulado máximo de las secciones a partir del cual se considere como avería total, la dificultad en la evaluación del desplazamiento debido a la acción de una sola ola y de los desplazamientos acumulados, producidos por olas contenidas en un mismo temporal o en sucesivos temporales, obliga en la práctica normal, a suponer que la excedencia de las condiciones de cálculo implica la destrucción del dique.

Los diques en talud presentan un comportamiento diferente en razón de su diferente constitución. La destrucción de un dique en talud no es súbita, sino que viene precedida por una serie de averías en el manto de protección en forma de elementos

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

(cantos de escollera, bloques, tetrápodos, etc.) desplazados por el oleaje fuera de la sección o al menos fuera de la zona donde ejercen su función resistente. El desarrollo de las averías depende de la intensidad del temporal y de su duración. Sin embargo, cuando el temporal excede el de iniciación de averías pero su intensidad no es muy elevada, el desarrollo de las averías se detiene alcanzando un estado de equilibrio que puede ser de dos tipos: absoluto y ficticio. En el primer caso, la duración no tiene influencia puesto que la sección es totalmente estable. En el segundo

cionan, en su acepción general, una relación entre la intensidad del temporal, su duración, y los daños acumulados producidos. En las curvas que se muestran a continuación (figura 1) la intensidad del temporal estará representada por la altura de ola significativa, H_s .

La curva 1 representa la curva de daños correspondiente a un oleaje de altura de ola significativa H_{s1} . Los daños crecen a medida que se incrementa la duración, llegando un momento en que dejarían de producirse daños. Los daños máximos producidos son $d_1\%$.

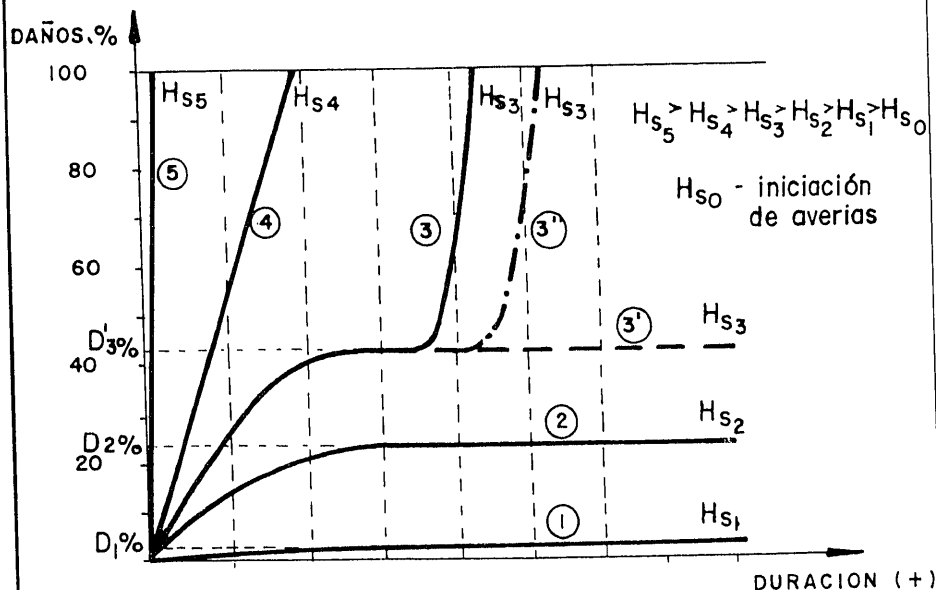


FIG. 1.- CURVAS DE AVERIAS DE UN DIQUE EN TALUD.

caso, la estabilidad puede prolongarse durante un cierto tiempo a partir del cual el desarrollo de las averías continúa. Cuando la intensidad del temporal es suficientemente elevada, el crecimiento de los daños es continuo y función de la duración sin llegar a alcanzar en ningún momento una situación de estabilidad frente al oleaje.

De acuerdo con lo expuesto, el comportamiento del dique podría estar representado por sus curvas de averías que propor-

La curva 2 corresponde a un oleaje de altura H_{s1} . Como puede observarse, el crecimiento de los daños es superior, pero se alcanza igualmente la estabilidad para un nivel de daños $d_2\%$.

Las curvas para la altura H_{s3} corresponden a la fase de estabilidad ficticia. En este momento, el comportamiento de la sección no puede predecirse y por ello se han dibujado tres curvas que muestran diferentes posibilidades.

La curva 3 muestra una fase de estabilidad, pero, a partir de un cierto momento, continúa el incremento de daños alcanzándose la rotura rápidamente.

Para la curva 3', la fase de estabilidad es duradera prolongándose indefinidamente.

La curva 3'' es similar a la curva 3. En este caso la estabilidad se prolonga durante más tiempo, pero la destrucción ha tenido lugar igualmente.

La curva 4, para la altura de ola H_{s4} , muestra un crecimiento casi constante de los daños hasta alcanzar la destrucción total en un plazo de tiempo relativamente breve.

Finalmente, la curva 5 representa la evolución de averías para un temporal H_{s5} que produce la rotura inmediata de la sección.

La determinación de las curvas de averías es importante en cuanto proporciona una información fundamental sobre el comportamiento de la sección y permite realizar una previsión de la posible evolución de los daños en el dique a lo largo de su vida previsible, de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de temporales de diversas duraciones y de la repetición de temporales. Con ello, se podría dimensionar un dique bajo criterios de rotura. Sin embargo, en la práctica, esto no es factible en la mayoría de los casos; las curvas de averías se podían obtener mediante laboriosos ensayos en modelo reducido, pero la translación de resultados a la realidad está imposibilitada por la carencia de datos estadísticos fiables que relacionen temporales de una cierta intensidad con sus duraciones.

En consecuencia, y como conclusión a estos últimos párrafos, se puede decir que el dimensionamiento de un dique vertical es posible hacerlo para condiciones de rotura, mientras que el de un dique en talud sólo para condiciones de iniciación de averías.

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

DIMENSIONAMIENTO DE UN DIQUE

PREVIAMENTE al estudio de las diversas alternativas estructurales de las secciones de un dique hay que realizar una previsión de oleaje donde, como objetivo final, se obtendrá la distribución extremal de temporales o régimen de temporales.

Un régimen de temporales proporciona la probabilidad de excedencia de cada temporal de

una intensidad dada, y simultáneamente —ya que está relacionado con esa probabilidad— el período medio de retorno definido como el intervalo de tiempo medio entre la presentación de dos temporales cuyas intensidades excedan una dada.

La forma típica de presentación de un régimen de temporales se muestra en la figura 2.

donde en ordenadas figura la intensidad de temporal (definida por su H_s máxima) y en abscisas la probabilidad de un temporal no sea excedido, $F(H_s)$. El período medio de retorno, $\bar{T}$, correspondiente a un temporal de intensidad H_s se puede calcular mediante la relación:

$$\bar{T} = \frac{1}{1 - F(H_s)}$$

En definitiva, el régimen de temporales *no* indica cuál deberá ser la altura de ola de cálculo

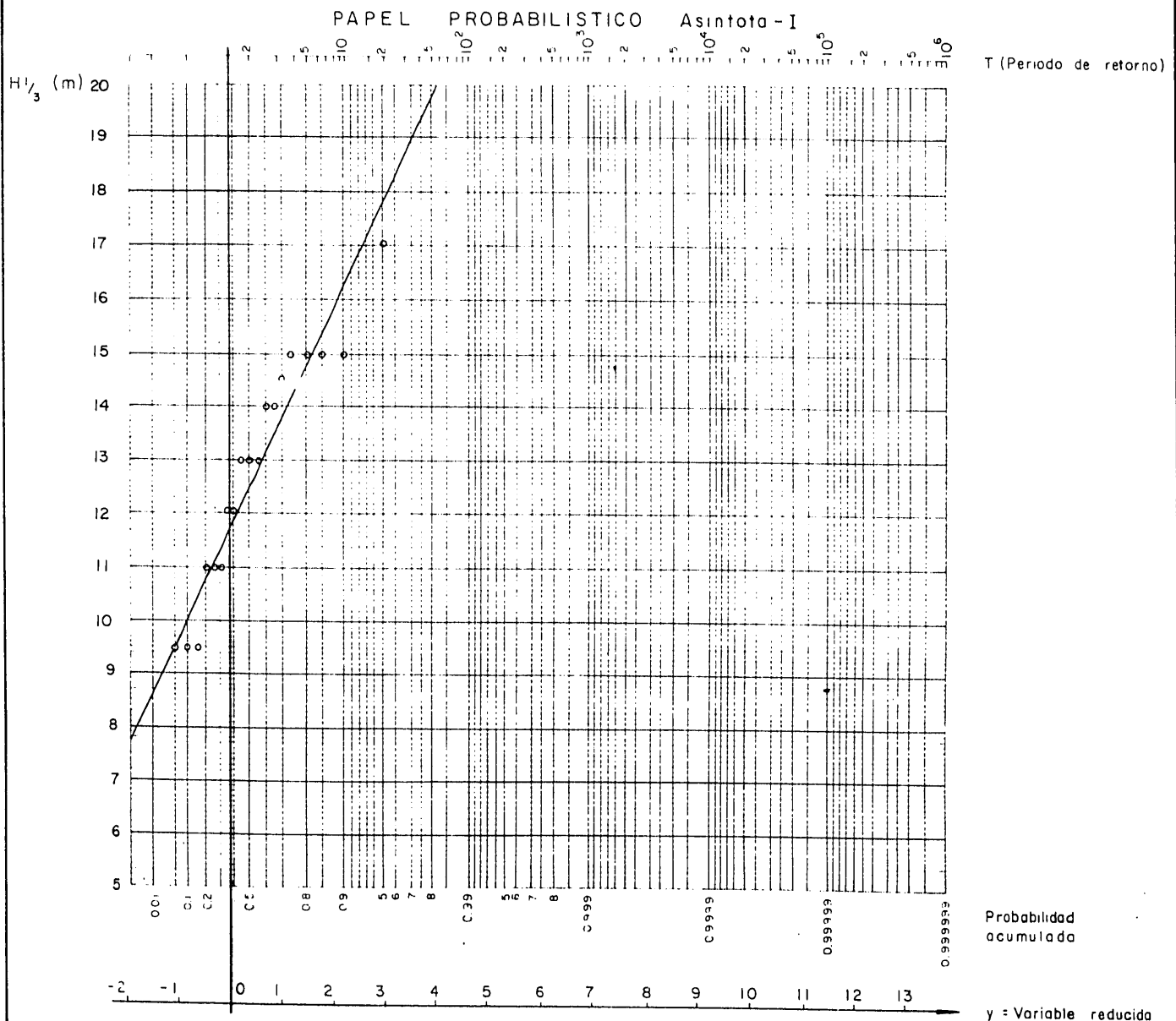


FIG. 2.—REGIMEN DE TEMPORALES

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

para el dique, sino simplemente la probabilidad de excedencia en un año de las condiciones de cálculo o dimensionamiento que hayan sido tomadas.

Iribarren, dando un avance gigantesco en su época, propuso un método determinista para el cálculo de la altura de ola simple obteniéndola mediante la fórmula $H = 1,2 \sqrt[3]{F}$, modificable por los planos de refracción y sujeta a unos ciertos coeficientes de seguridad. Sin embargo, esta postura determinista no es compatible con la realidad, puesto que es evidente, de acuerdo con la naturaleza, que, en general, la ocurrencia de temporales de diversas intensidades es siempre posible. Lógicamente cuanto mayor sea la intensidad del temporal, menor será la probabilidad de que éste ocurra, y viceversa.

Entonces, es incuestionable, que salvo en condiciones muy particulares (como puede ser la limitación de altura de ola por rotura de ésta) es absolutamente imposible calcular una obra marítima de forma que soporte todos los temporales que se puedan presentar durante la vida previsible de la obra. Cualquiera que sea la altura de ola de cálculo en los niveles de dimensionamiento en que nos movemos siempre existe una probabilidad, o un riesgo de que ésta sea superada. Si la altura de ola de cálculo es relativamente pequeña, la probabilidad de que se presente un temporal de altura superior será grande y existirá un riesgo alto de que la obra sea destruida durante su vida. Si aumentamos la altura de ola de cálculo, las probabilidades de destrucción disminuirán, pero el coste de construcción será más elevado que en el caso anterior. Se plantea entonces un problema de decisión: ¿qué altura de ola se debe adoptar como más conveniente para el cálculo?, o lo que es lo mismo, ¿qué periodo de retorno

se debe tomar para fijar la altura de ola de cálculo?

La presente publicación no pretende solucionar el problema de la decisión, sino proporcionar unos elementos de juicio que faciliten la tarea.

Dos han sido los artículos seleccionados relativos al tema:

- CRITERIO DE RIESGO, de León E. Borgman.
- DISEÑO OPTIMO DE UN DIQUE, de J. van de Kreeke y A. Paape.

Borgman, en su artículo, presenta tres modelos para la evaluación del riesgo. La diferencia entre ellos está, exclusivamente, en las hipótesis de partida en cuanto a ocurrencia de sucesos. No obstante, los tres modelos proporcionan la misma información. De ellos, el más interesante a efectos prácticos es el modelo I, ya que los requerimientos básicos admiten, en parte, una respuesta. Este modelo consta de dos apartados claramente diferenciados. En primer lugar, y apoyándose en el régimen de temporales, proporciona la probabilidad o «riesgo» de que un temporal de una cierta intensidad, H_s , sea superado durante la vida previsible de la obra, L . La ecuación que proporciona el «riesgo» es:

$$E_i = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L$$

donde T es el periodo medio de retorno del temporal, cuya intensidad es H_s . Ello permite conocer el riesgo de destrucción o de iniciación de averías de un dique conocidos el régimen de temporales, su vida previsible, y la intensidad del temporal de destrucción del dique o de iniciación de averías según el caso.

Con estos datos, es el criterio del ingeniero que proyecta la obra el que debe decidir qué nivel de riesgos considera admisible teniendo en cuenta:

- Las características tanto físicas como económicas de la estructura.
- La finalidad de la obra.
- La importancia de los bienes defendidos o protegidos.

La parte segunda del modelo proporciona la probabilidad de que dado un valor de daños, éste no sea superado durante la vida de la obra, y, de forma particular, la probabilidad de que los daños sean nulos. Sin embargo, todo el proceso está apoyado en una distribución típica empírica de daños que no ha sido contrastada con una distribución de daños real. Bajo este aspecto, y hasta un mejor conocimiento de la bondad del ajuste o de una nueva función de distribución, la aplicación de esta segunda parte del método no es viable.

Otro criterio de dimensionamiento es el propuesto por Van de Kreeke y Paape. Según ellos, la altura de ola de cálculo óptima es la que corresponde a una estructura para la cual la inversión efectuada sea mínima. Esta inversión es la suma de los costes de construcción y el valor de las pérdidas económicas debidas a avería o rotura de la estructura teniendo en cuenta no sólo el valor de la propia obra sino también los bienes defendidos por ella. De forma gráfica, las curvas de costes y pérdidas económicas adoptan la forma que se muestra en la figura 3.

La aplicación del estudio económico difiere en la obtención de la curva de pérdidas económicas según se trate de un dique vertical o de un dique en talud. Las diferencias son consecuencia de su diferente comportamiento frente al oleaje.

En el caso de un dique vertical, si éste ha sido dimensionado para una altura de ola significativa H_{s0} , cuando ésta es excedida se produce, o se considera que se produce, la destrucción total de la obra. Las pérdidas económicas deberán incluir el coste de reconstrucción del di-

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

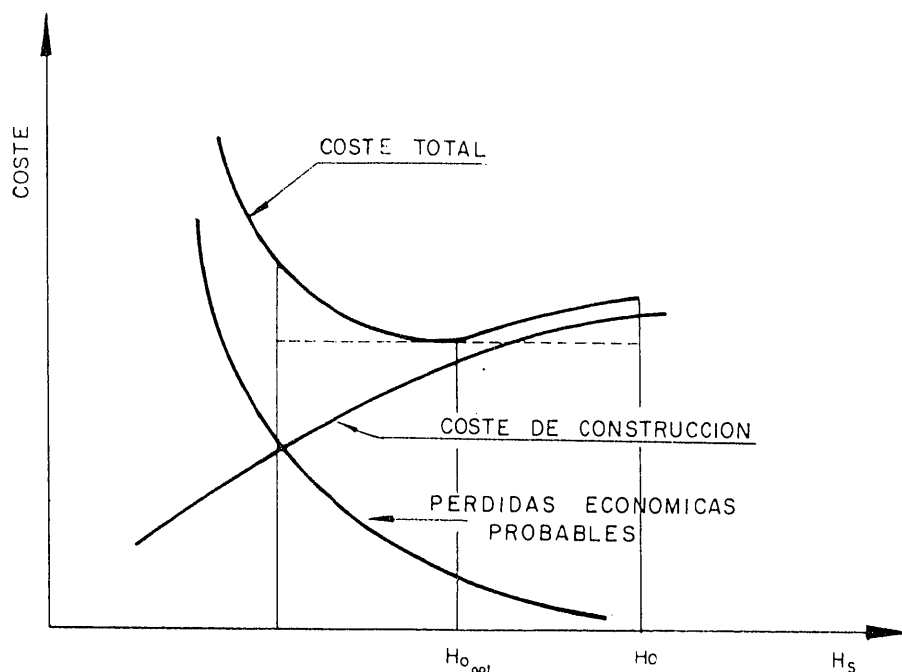


FIG 3.- RELACION COSTES-ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE

que, βP , donde β es un factor de mayoración de costes y las pérdidas en bienes defendidos, B. Este valor puede ser capitalizado aplicándole entonces un factor que depende del interés continuo anual, i , que adopta la forma:

$$\frac{100}{i} (1 - e^{-\frac{il}{100}}),$$

siendo L la vida probable de la obra. La probabilidad de que se produzca la destrucción del dique puede ser obtenida del régimen de temporales calculando la probabilidad de excedencia anual de H_{s0} . En resumen, la curva de costes totales cuyo mínimo hay que determinar adquiere la siguiente expresión:

$$C(H_s) = P(H_s) + \frac{100}{i} (1 - e^{-\frac{il}{100}}).$$

$$Pr(H_s > H_{s0}) [\beta P(H_s) + B]$$

Cuando se trata de un dique en talud el proceso es similar a partir del momento de la rotura,

pero esta situación viene precedida por una fase de averías parciales que hay que considerar. Cuando se producen sólo averías parciales, las pérdidas económicas sólo incluyen los costes de reparación del manto principal del dique, ya que los daños no afectan al resto de la estructura y tampoco a los bienes protegidos. Para el cálculo de estas pérdidas es necesario disponer de las curvas de averías que permiten conocer, dada la presentación de un temporal de una cierta H_s , el porcentaje de daños, d , que registrará la sección. La expresión final del coste total será:

$$C(H_s) = P(H_s) + \frac{100}{i} (1 - e^{-\frac{il}{100}}).$$

$$\cdot \Sigma \Delta Pr(H_s) \Delta W$$

donde:

$$\Delta Pr(H_s) = Pr(H_{s1} \leq H_s < H_{s1+1})$$

$$\Delta W = \frac{d_i}{100} \beta P_M$$

para la fase de averías parciales, siendo $[H_{s1}, H_{s1+1}]$ intervalos de alturas de ola definidos en la zona de averías parciales, d_i el porcentaje de averías medio correspondiente al intervalo y P_M el coste de construcción del manto principal.

Para la fase de rotura del dique:

$$\Delta Pr(H_s) = Pr(H_s > H_{sr})$$

$$\Delta W = \beta P + B$$

siendo H_{sr} la altura de ola significativa del temporal que produce la rotura de dique.

En el caso de que se considere que el interés del capital sea igual a la tasa de incremento de costes, las expresiones anteriores adoptan la forma:

$$C(H_s) = P(H_s) +$$

$$+ L \cdot Pr(H_s > H_{s0}) [\beta P(H_s) + B]$$

$$C(H_s) = P(H_s) +$$

$$+ L \Sigma \Delta Pr(H_s) \cdot \Delta W$$

ANALISIS DE LAS VARIABLES

ESTUDIO ECONOMICO

Los datos de entrada necesarios para realizar el estudio económico de una obra son:

Régimen de temporales. Proporciona la relación entre altura de ola significativa representativa de un temporal y su probabilidad de presentación, obtenida mediante el ajuste estadístico a una serie de puntos.

Las estimas obtenidas a partir de la muestra ajustada a los puntos mediante diversos métodos pueden dar resultados ampliamente variables lo cual implica una variación igualmente amplia en la obtención de la solución óptima. Es, por lo tanto, muy importante conocer de antemano cual es el tipo de distribución que debe emplearse.

Altura de ola de dimensionamiento para fórmulas de estabilidad. Existe una gran disparidad de criterios en cuanto a qué altura de ola característica debe tomarse para el cálculo. Las más usadas son las siguientes:

$H_{1/3}$	$= H_s$
$H_{1/10}$	$= 1,271 H_s$
$H_{1/20}$	$= 1,403 H_s$
$H_{1/100}$	$= 1,666 H_s$
$H_{0.01}$	$= 1,513 H_s$
$H_{m\acute{a}x,N_1}$	$= 1,60 H_s$
$H_{m\acute{a}x,N_2}$	$= 1,90 H_s$
$H_{m\acute{a}x,N_3}$	$= 2,00 H_s$

tomándose frecuentemente los valores de $H_{m\acute{a}x,N}$ para el cálculo de diques verticales y valores menores para el caso de diques en talud.

Para cualquiera de ellas, conociendo su relación con H_s , se puede modificar el régimen de temporales para adecuarlo a esta altura de ola característica.

El problema de elección de la más apropiada para el cálculo es complicado, y más aún, teniendo en cuenta que los esfuerzos producidos sobre diques verticales son función del cuadrado de la altura de ola en el término más significativo y para los diques en talud, del cubo de la misma. Este problema desaparece automáticamente mediante ensayos en canal de oleaje irregular ya que en él se reproducen unas condiciones de oleaje muy similares a las reales siendo suficiente el valor de H_s para definir el oleaje.

Coste de construcción. Para realizar el estudio económico es conveniente definir a lo largo del dique tramos de características similares a los que se pueda asignar la misma sección. Para cada tramo se realizará su estudio económico. Es recomendable obtener los costes de construcción directamente de la sección dimensionada en lugar de emplear una fórmula función de la altura de ola de cálculo que, aunque pueda ser un procedimiento muy rápido, puede conducir a errores que afectarían el resultado del estudio económico.

Evaluación de la curva de averías (diques en talud). Como se indicó anteriormente, la curva de averías interviene en el estudio económico y por lo tanto debe ser determinada con la mayor exactitud. Uno de los errores más frecuentes que se cometen es no considerar, cuando se manejan curvas de averías teóricas, el criterio seguido en la determinación de los porcentajes de daños. Así, por ejemplo, en la curva de averías proporcionada por Iribarren, los porcentajes están referidos al «manto activo» cuya longitud es seis veces la arista

del cubo de volumen equivalente al del elemento tipo del manto principal y su espesor es de una sola capa. Otro de los factores que pueden inducir a error es la dispersión normal que ofrecen las curvas de averías. Es conveniente repetir los ensayos varias veces en las mismas condiciones para adoptar para el estudio económico el valor medio de las curvas. tar para el estudio económico el valor medio de las curvas.

Evaluación de las pérdidas en bienes defendidos. El peso en el resultado final de las pérdidas debidas a daños en los bienes defendidos es tan grande que exige un delicado estudio. En la evaluación se deben considerar:

a) Pérdidas directas en bienes defendidos en el puerto (muelles, equipo terrestre, buques resguardados, etc.)

b) Pérdidas indirectas como consecuencia menos inmediata de la rotura del dique. En este punto se incluyen no sólo la pérdida de ingresos por las diferentes tarifas portuarias durante la reconstrucción del dique sino también y una vez finalizadas las obras la debida a la desviación de tráfico a otros puertos que guarda una cierta inercia y los perjuicios causados a industrias afines del puerto y que de alguna manera dependan de él para su normal funcionamiento.

Vida previsible de la obra. Así como el coste de construcción (P) y las pérdidas en bienes defendidos (B) son datos, exclusivamente, del estudio económico, el régimen de temporales (para la altura de ola característica adecuada) y la vida previsible de la obra son también datos para la determinación del riesgo.

Realizado ya el estudio económico y determinadas las condiciones de cálculo óptimas, tal como veremos en las conclusiones, es conveniente calcular el

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

riesgo de destrucción o de iniciación de averías que implica aquella elección. Si éste es aceptable, se toman como definitivas. Si no es así, se determinan fijando el nivel de riesgo admisible. Si, para el estudio económico, la determinación de P y/o B no ha sido correcta, el error no tendrá influencia en el cálculo del riesgo correspondiente y por tanto, en cierta medida, podrá ser detectado. No ocurre lo mismo con el régimen de temporales y la vida previsible de la obra, ya que al ser comunes a ambos análisis, no tienen posibilidad de contraste.

Por ello, y por la influencia que tiene en el resultado final, la evaluación de la vida previsible de la obra requiere un cuidadoso análisis a través del estudio del papel futuro que desarrollará la obra proyectada en la vida del puerto.

APLICACION DEL CRITERIO DE RIESGO

Los datos necesarios para la obtención de la altura de ola de cálculo son:

- Régimen de temporales.
- Vida previsible de la obra.
- Nivel de riesgo admisible.

Para los dos primeros son válidos los comentarios realizados en la parte correspondiente del estudio económico.

Nivel de riesgo admisible

En su elección, como ya se indicó anteriormente, hay que tener en cuenta:

- Las características de la estructura (rígida, semirrígida o deformable).
- La finalidad de la obra.

— La importancia de los bienes defendidos.

Una estructura deformable admite la posibilidad de averías parciales cuando la altura de ola de cálculo es superada hasta un cierto límite. No ocurre así cuando se trata de obras rígidas, es decir, obras para las cuales la excedencia de la altura de ola de cálculo implica su destrucción total. (El hecho de un desplazamiento admisible tal como se apunta en la exposición del estudio económico de Kreeke y Paape no se considera como avería, puesto que no es susceptible de reparación.) Según esto, es evidente, que en igualdad de condiciones, el nivel de riesgo que se podría admitir para una u otra es diferente; se puede admitir un riesgo más alto para diques de escollera que para diques verticales.

El nivel de riesgo admisible debe ser también reflejo de la importancia de la obra en cuanto al fin para la cual ha sido proyectado. Cabe hacerse la pregunta ¿qué sucedería si dejase de cumplir su función durante un tiempo? La respuesta a esta pregunta no da una idea de los perjuicios que puede causar. No debe tratarse del mismo modo una obra de protección de un puerto del cual depende el funcionamiento de un área industrial que una obra cuya finalidad sea la estabilidad de una playa, por ejemplo.

De igual forma debe ser considerada la importancia de los bienes defendidos, e incluso, en muchos casos admiten una valoración conjunta con el párrafo anterior. El resultado de esta valoración es el que condiciona en mayor medida el nivel de riesgo considerado como admisible.

Recordaremos que para el caso de diques verticales, el riesgo admitido es de rotura, y para el caso de diques en talud, es de iniciación de averías.

COMPARACION DE AMBOS METODOS DE DIMENSIONAMIENTO

Para la comparación de ambos métodos se han realizado unos ejemplos de dimensionamiento de diques verticales y diques en talud. Para clarificar la influencia de las diversas variables que intervienen en el estudio, se realizó éste bajo diferentes hipótesis de vida previsible y bienes defendidos. En el ejemplo de diques verticales se varió ligeramente el régimen de temporales para mostrar la sensibilidad de la solución ante esta variación, y en el ejemplo de diques en talud, la forma de evaluar el coste de construcción del dique.

Hay que señalar que en los ejemplos realizados en la publicación se ha considerado como única variable definitoria de la intensidad de los temporales la altura de ola significativa, sin tener en cuenta otras variables ya especificadas anteriormente. En este artículo sólo se recogen las curvas y los cuadros correspondientes a los resultados finales.

El esquema que se ha seguido en ambos ejemplos es el mismo. Primeramente se realiza el estudio económico obteniéndose las curvas de costes de construcción, de pérdidas económicas probables y de costes totales como suma de las anteriores. Determinados los costes mínimos, y por lo tanto la altura de ola significativa óptima para el cálculo, se calcula el riesgo que implica tal elección. A continuación se realiza el análisis de riesgo donde se determina la altura de ola significativa para el cálculo a través de la adopción de unos niveles de riesgo admisibles. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en uno y otro caso.

Diques verticales

El ejemplo se realizó con dos valores de la vida previsible de la obra: $L=50$ años y $L=20$

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

años, y con dos valores de bienes defendidos: $B=0$ y $B=2 \cdot 10^6$ pts. En el análisis de riesgo, queda también recogida la diferente importancia de la obra, re-

flejada en B , al adoptarse dos niveles de riesgo distintos: 10 % que correspondería a $B=0$ y 2,5 % que correspondería a $B=2 \times 10^6$ pts. Para determinar la

sensibilidad de la solución ante el régimen de temporales, se realizaron los cálculos para dos regímenes de temporales próximos entre sí.

ESTUDIO ECONOMICO

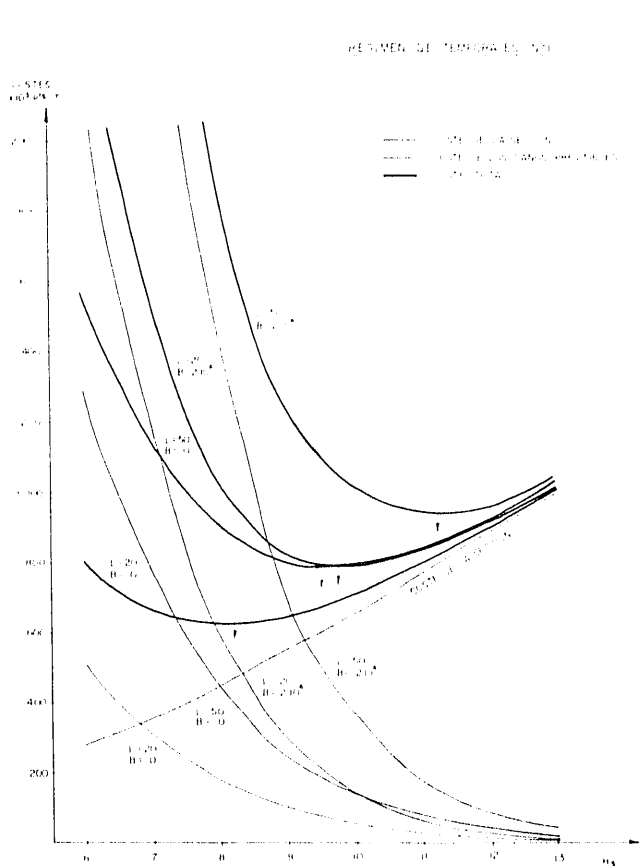


FIG. 4. CURVAS DE COSTES DE CONSTRUCCION, DAÑOS PREVISIBLES Y COSTES TOTALES

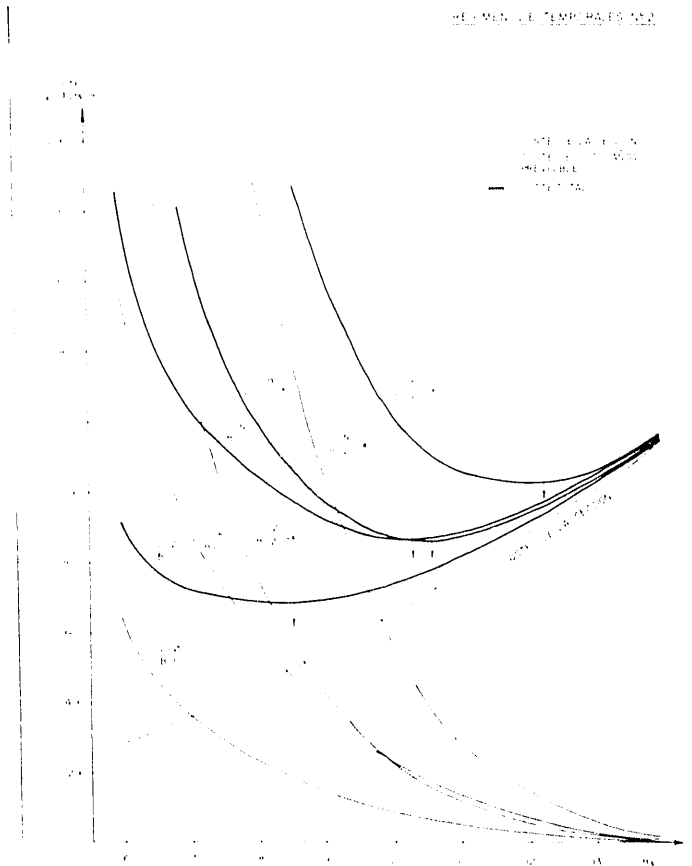


FIG. 5. CURVAS DE COSTES DE CONSTRUCCION, DAÑOS PREVISIBLES Y COSTES TOTALES

RIESGOS DE ROTURA QUE IMPLICA LA ELECCION DE LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE OBTENIDA DEL ESTUDIO ECONOMICO

Régimen de temporales n.º 1

L años	B ptas ml	H _{so} metros	T años	RIESGO 0/0
50	$2 \cdot 10^6$	11,25	1.250	3,92
50	0	9,50	294	15,66
20	$2 \cdot 10^6$	9,75	400	4,88
20	0	8,20	111	16,56

Régimen de temporales n.º 2

L años	B ptas ml	H _{so} metros	T años	RIESGO 0/0
50	$2 \cdot 10^6$	12,25	1.538	3,20
50	0	10,30	370	12,66
20	$2 \cdot 10^6$	10,60	424	4,31
20	0	8,50	105	17,42

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

ANALISIS DE RIESGO

				REGIMEN DE TEMPORALES	
				n.º 1	n.º 2
<i>L</i> años	<i>B</i> ptas ml	<i>RIESGO DE ROTURA</i> %	<i>T</i> años	<i>H_{s.o}</i> metros	<i>H_{s.o}</i> metros
50	2 · 10 ⁶	2,5	1975	11,90	12,60
50	0	10,0	475	10,10	10,60
20	2 · 10 ⁶	2,5	790	10,80	11,50
20	0	10,0	190	8,80	9,30

COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO ECONOMICO Y DEL ANALISIS DE RIESGO

Régimen de temporales n.º 1

<i>L</i> años	<i>B</i> ptas ml	ESTUDIO ECONOMICO		ANALISIS DE RIESGO	
		<i>H_{s.o}</i> (m)	<i>Riesgo</i> (%)	<i>H_{s.o}</i> (m)	<i>Riesgo</i> (%)
50	2 · 10 ⁶	11,25	3,92	11,90	2,5
50	0	9,50	15,66	10,10	10,0
20	2 · 10 ⁶	9,75	4,88	10,80	2,5
20	0	8,20	16,56	8,80	10,0

Régimen de temporales n.º 2

<i>L</i> años	<i>B</i> ptas ml	ESTUDIO ECONOMICO		ANALISIS DE RIESGO	
		<i>H_{s.o}</i> (m)	<i>Riesgo</i> (%)	<i>H_{s.o}</i> (m)	<i>Riesgo</i> (%)
50	2 · 10 ⁶	12,25	3,20	12,60	2,5
50	0	10,30	12,66	10,60	10,0
20	2 · 10 ⁶	10,60	4,31	11,50	2,5
20	0	8,50	17,42	9,30	10,0

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

Dique de escollera

Las variaciones de las hipótesis de partida son : $L=50$ años y $L=20$ años, y $B=0$ y $B=4 \cdot 10^6$ pts. En relación con estos valo-

res de los bienes defendidos se adopto para el análisis de riesgo unos niveles de 15% y 30% respectivamente. El ejemplo se realizó para dos formas de evaluación de costes de construc-

ción: «estimación I» basada en una fórmula de cálculos de costes y «estimación II» donde se calculaban los costes directamente de la sección dimensionada.

ESTUDIO ECONOMICO

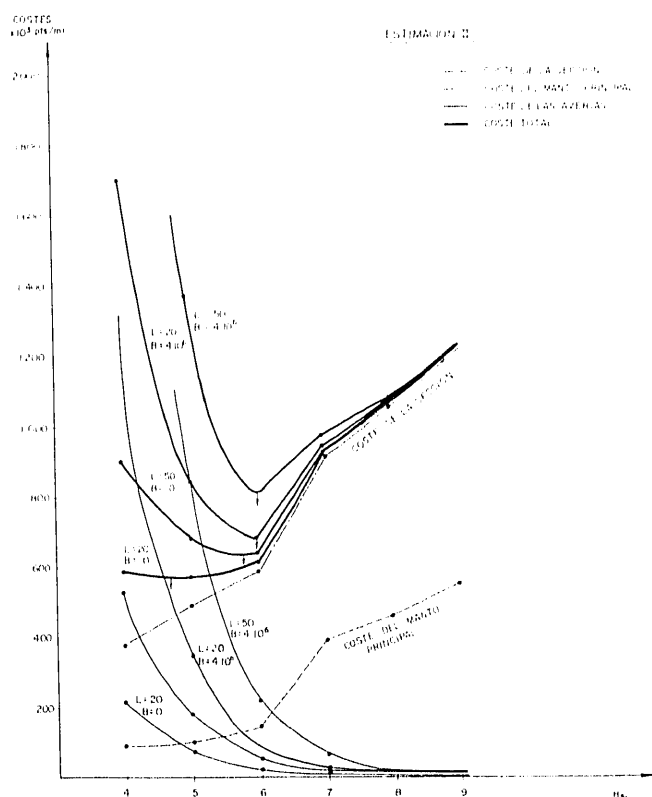


FIG. 7 - CURVAS DE COSTES DE CONSTRUCCION, DAÑOS PREVISIBLES Y COSTES TOTALES

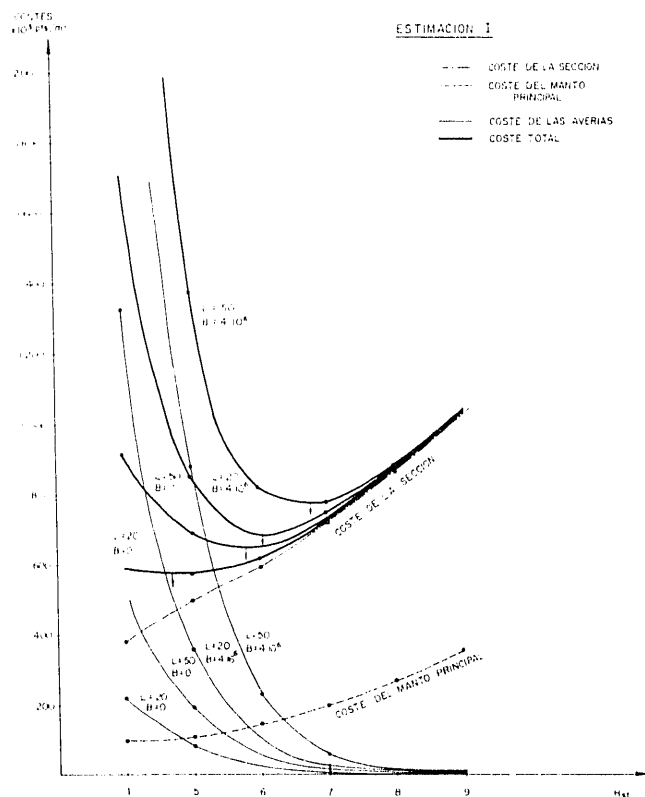


FIG. 6 - CURVAS DE COSTES DE CONSTRUCCION, DAÑOS PREVISIBLES Y COSTES TOTALES

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

RIESGO DE INICIACION DE AVERIAS QUE IMPLICA LA ELECCION DE LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE OBTENIDA DEL ESTUDIO ECONOMICO

L Años	B pts. ml.	ESTIMACION I			ESTIMACION II		
		$H_{SI}(m)$	T (años)	Riesgo(%)	$H_{SI}(m)$	T (años)	Riesgo(%)
50	$4 \cdot 10^6$	6,76	114	35,66	6,00	58	58,15
50	0	5,80	48	64,73	5,80	48	64,73
20	$4 \cdot 10^6$	6,05	61	28,34	6,00	58	29,42
20	0	4,70	18	67,27	4,70	18	67,27

ANALISIS DE RIESGO

L años	B pts. ml.	RIESGO %	T años	H_{SI} m
50	$4 \cdot 10^6$	15	308	7,87
50	0	30	141	7,00
20	$4 \cdot 10^6$	15	123	6,85
20	0	30	57	5,97

COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO ECONOMICO Y DEL ANALISIS DE RIESGO

L	B	ESTUDIO ECONOMICO				ANALISIS DE RIESGO	
		ESTIMACION I		ESTIMACION II			
años	pts. ml.	H _{SI} (m)	Riesgo(%)	H _{SI} (m)	Riesgo(%)	H _{SI} (m)	Riesgo(%)
50	4 · 10 ⁶	6,76	35,66	6,00	58,15	7,87	15
50	0	5,80	64,73	5,80	64,73	7,00	30
20	4 · 10 ⁶	6,05	28,34	6,00	29,42	6,85	15
20	0	4,70	67,27	4,70	67,27	5,97	30

COMENTARIOS GENERALES

Como consecuencia de los ejemplos expuestos se pueden hacer una serie de observaciones.

La aplicación correcta del estudio económico no es sencilla. En él intervienen una gran cantidad de variables que tomando valores diferentes dentro de la realidad modifican sensible-

mente la altura de ola significativa de cálculo, y por lo tanto la sección definitiva. Otro factor expuesto anteriormente, no reflejado en los ejemplos, es el interés que se podía aplicar al capital. En los ejemplos se ha considerado que éste igualaba la tasa de alza de costes, pero si aplicamos el estudio económico, tal como viene reflejado en multitud de publicaciones, donde únicamente se considera el interés aplicado al capital, los valores mínimos de costes totales, y por lo tanto, los niveles de cálculo se desplazan hacia la izquierda de los gráficos con lo cual se abaratan los costes de construcción pero aumentan los riesgos.

En definitiva, el método permite, manejando las variables de forma siempre razonable, a través del estudio económico, llegar a justificar cualquier solución dentro de unos límites más o menos amplios.

En el caso de que dos proyectistas realicen el mismo proyecto, es muy probable que empleando ambos el estudio económico alcancen resultados bastante diferentes, resultados que por otro lado estarían respaldados por consideraciones siempre justificables.

Un criterio que proporciona más transparencia a la justificación de la solución adoptada es el análisis de riesgo. En él, una vez definida la vida probable de la obra, todas aquellas consideraciones están refundidas en una: el nivel de riesgo que se considera admisible para la obra. Por ello, es siempre conveniente después de realizar el estudio económico calcular cuál es el riesgo que implica la solución óptima obtenida, porque no hay que olvidar que la destrucción de la obra proyectada, hecho probable si el riesgo es alto, la convierte en la menos económica de todas, puesto que el coste final llegará a ser tres o cuatro veces el coste inicial de construcción.

DETERMINACION DE LA ALTURA DE OLA DE CALCULO

Aún suponiendo que los datos de partida sean absolutamente ciertos, ¿por qué razón el estudio económico *no* proporciona la mejor solución? La respuesta está en el hecho de que el estudio económico es válido cuando se aplica a la construcción de un número elevado de obras de las mismas características, como, por ejemplo, podría ser una fábrica de viguetas y se intenta dimensionar la vigueta más económica (independientemente de las normas oficiales de seguridad). Aplicando el estudio económico, de todas las viguetas fabricadas de acuerdo con la más económica, algunas se romperían, pero las pérdidas ocasionadas por su rotura estarían compensadas por el ahorro de material en las viguetas que no han roto, siendo la suma total de costes mínima de acuerdo con el estudio económico. Esto es cierto en este caso porque tenemos una muestra suficientemente amplia para que se pueda asegurar que las leyes estadísticas que se han manejado en el estudio económico se van a cumplir.

Trasladando estos razonamientos al campo de las obras marítimas, el estudio económico podría ser plenamente válido si dimensionáramos conjuntamente un número *N* (suficientemente grande) de diques en las mismas condiciones. Del estudio económico obtendremos las alturas de ola de cálculo correspondientes a los diques más económicos, a las cuales corresponderá un riesgo determinado de averías. A lo largo de la vida previsible de las obras, es probable que algún dique sufra averías o incluso en algún caso es posible que se produzca la rotura. De acuerdo con el estudio económico, la suma de costes de construcción más los derivados de la reparación y reconstrucciones será menor que en el caso de que se haya realizado para otras alturas (siem-

pre en el supuesto de que las bases de partida sean ciertas). Ello significa que el ahorro conseguido en la construcción de las secciones compensa sobradamente las inversiones que haya que realizar en las reparaciones o reconstrucciones, o, en otras palabras, la cantidad ahorrada en unos puertos servirá para financiar las averías registradas en otros. Entonces en el conjunto de diques dimensionados, de acuerdo con el estudio económico, podemos establecer dos grupos: el correspondiente a los diques que serán averiados o destruidos, y el grupo de los diques que no sufrirán averías y que indirectamente financiarán los costes de reparación de los del primer grupo.

En la práctica real, el estudio se aplica exclusivamente para dimensionar las obras de abrigo de un puerto, aunque el estudio económico se desarrolla exactamente igual que si se aplicara a un número *N* de diques. Si las obras que hoy proyectamos, finalizada posteriormente su vida previsible, se encuadran dentro del segundo grupo, habrían sido las más económicas, e incluso más de lo esperado del estudio económico, puesto que no contribuirán a la reparación de averías en otros diques. Sin embargo, si el dique pertenece al primer grupo, no contaremos, producido el desastre, con el ahorro teórico de los pertenecientes al segundo, con lo cual el dique será el menos económico de todos. En resumen, el resultado del estudio económico nos deja en una situación de desconocimiento de qué es lo que le puede ocurrir a lo largo de su vida previsible.

Este razonamiento al que se ha llegado viene avalado por la tesis doctoral de E. Copeiro, que abarcando un problema más general sobre «análisis extremal sobre variables meteorológicas», llega por caminos distintos e independientemente a esta misma conclusión.

Llegado este momento, la utilidad del análisis de riesgo es clara; de él obtenemos la probabilidad o riesgo de que durante la vida de la obra ésta pueda sufrir averías o ser destruida, es decir, la probabilidad de que se encuadre en el primer grupo o en el segundo. Si el riesgo de avería o destrucción es grande acudiremos a una solución más conservadora que la teóricamente más económica. De acuerdo con esto, podríamos llegar al mismo punto adoptando previamente unos niveles de riesgo admisibles y dimensionar para ellos nuestra sección. El concepto de riesgo es más claro que el obtenido del estudio económico, aunque mucho más problemático en el momento de tomar decisiones especialmente en este campo donde no existen directrices orientadoras.

De acuerdo con lo expuesto, la conclusión final es la siguiente: el estudio económico de una sección es útil para proporcionar un orden de magnitud del nivel al cual deberá ser dimensionada, pero consideramos que es siempre necesario apoyarse en el análisis de riesgo para definir la solución definitiva, solución a la cual se puede llegar directamente mediante este último criterio. ●

BIBLIOGRAFIA

- A. I. P. C. N.: Rapport Final de la Commission Internationale pour l'Etude des Effets des Lames. Anejo al Boletín número 25 (Vol. III/1976).
- BORGMAN, León: Risk Criteria. A. S. C. E., 1963. WW3.
- IRIBARREN, Ramón: Fórmula para el cálculo de los diques de escolleras naturales o artificiales. XXI. C. I. N. Estocolmo, 1965.
- LE MEHAUTE, Bernard: Similitude in Coastal Engineering. A. S. C. E., 1976. WW3.
- VAN DE KREEKE, J., y PAAPE, A.: On Optimum Breakwater Design Coastal Engineering, 1964. Cap. 34.
- SHORE PROTECTION MANUAL: C. E. R. C., 1973.