

---

**NORMA CUBANA**

**NC**

972-1: 2013

---

**PRESA — PROTECCIÓN CONTRA EL OLEAJE — PARTE 1:  
PARÁMETROS DEL OLEAJE — COTAS DE CORONA Y DE  
CORONACIÓN**

**Dam — Protection against wave action — Part 1: Wave parameters — Dam's crest  
level and highest level**

---

ICS: 93.160

1. Edición    Diciembre 2013  
**REPRODUCCIÓN PROHIBIDA**

Oficina Nacional de Normalización (NC) Calle E No. 261 El Vedado, La Habana. Cuba.  
Teléfono: 830-0835 Fax: (537) 836-8048; Correo electrónico: [nc@ncnorma.cu](mailto:nc@ncnorma.cu); Sitio  
Web: [www.nc.cubaindustria.cu](http://www.nc.cubaindustria.cu)



Cuban National Bureau of Standards

## NC 972-1: 2013

### Prefacio

La Oficina Nacional de Normalización (NC) es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba y representa al país ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización.

La elaboración de las Normas Cubanas y otros documentos normativos relacionados se realiza generalmente a través de los Comités Técnicos de Normalización. Su aprobación es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en las evidencias del consenso.

#### La Norma Cubana NC 972:

- Ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización NC/CTN 106 de Recursos Hidráulicos, integrado por representantes de las siguientes entidades:

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos  
Instituto de Planificación Física  
Oficina Nacional de Normalización  
Empresa de Investigaciones y Proyectos  
Hidráulicos Habana

Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría  
Ministerio de la Construcción  
Aguas de La Habana

- Consta de las siguientes partes bajo el título general de *Presa – Protección contra el oleaje*:
  - *Parte 1: Parámetros del oleaje – Cotas de corona y de coronación*
  - *Parte 2: Revestimiento del talud*
  - *Parte 3: Parapetos*
  - *Parte 4: Estribos – Muros*
  - *Parte 5: Columnas – Vigas*

#### Esta Parte 1:

- Está basada en un proyecto elaborado por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Sustituye a la NC 48-18: 1983 *Ingeniería hidráulica – Presa – Cálculo del efecto de la ola para protección de taludes – Especificaciones de proyecto*, la cual ha sido técnicamente revisada y actualizada. De dicha norma, la presente toma en consideración todos los elementos aplicables.
- Relaciona en su Introducción los cambios principales con respecto a la citada NC 48-18: 1983.
- Incluye los Anexos A y B informativos.

### © NC, 2013

**Todos los derechos reservados. A menos que se especifique, ninguna parte de esta publicación podrá ser reproducida o utilizada en alguna forma o por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo las fotocopias, fotografías y microfilmes, sin el permiso escrito previo de:**

**Oficina Nacional de Normalización (NC)**

**Calle E No. 261, El Vedado, La Habana, Habana 4, Cuba.**

**Impreso en Cuba.**

## ÍNDICE

0 INTRODUCCIÓN.....	4
1 OBJETO.....	5
2 REFERENCIAS NORMATIVAS .....	5
3 TÉRMINOS Y DEFINICIONES .....	5
4 LISTA DE SÍMBOLOS.....	7
5 PRINCIPIOS GENERALES .....	9
6 DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE CÁLCULO DEL VIENTO .....	10
8 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL OLEAJE .....	17
9 DETERMINACIÓN DEL BORDO LIBRE Y DE LAS COTAS DE CORONA Y DE CORONACIÓN .....	26
ANEXO A (INFORMATIVO) EJEMPLOS DE REVESTIMIENTOS, CORONAS Y CORONACIONES DE PRESAS.....	32
ANEXO B (INFORMATIVO) EJEMPLOS DE APLICACIÓN .....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	48

**0 Introducción**

**0.1** En los aspectos concernientes a la presente Parte 1 de la NC 972, los cambios principales de esta edición con respecto a la NC 48-18 a la cual sustituye son los siguientes:

**0.2** Las definiciones de “Talud”, “Revestimiento”, “Corona”, “Borde libre”, “Cortina” y “Fetch” han sido modificadas.

**0.3** Se añaden nuevas definiciones sobre los parámetros de las olas y las cotas características de las presas, necesarias para su proyección contra el embate de las mismas.

**0.4** Se añade una Lista de símbolos.

**0.5** El tratamiento de los vientos de cálculo ha sido modificado.

**0.6** El tratamiento de los *fetch* de cálculo ha sido modificado.

**0.7** El método para la determinación de los parámetros del oleaje ha sido modificado.

**0.8** El método para la determinación del bordo libre y de las cotas de corona y de coronación de las presas ha sido modificado.

**0.9** Se añaden ejemplos reales de revestimientos del talud de aguas arriba.

**0.10** Se añaden ejemplos de aplicación.

**0.11** Se añade una lista de Fuentes Bibliográficas.

**0.12** Se han realizado varias mejoras de redacción.

**PRESA — PROTECCIÓN CONTRA EL OLEAJE —  
PARTE 1: PARÁMETROS DEL OLEAJE — COTAS DE CORONA Y DE CORONACIÓN**

## 1 Objeto

La Norma Cubana NC 972 establece las especificaciones para el cálculo de los parámetros del oleaje en los embalses de las presas, el cálculo de las cotas de coronación y de las cotas de las coronas de las presas de materiales locales y el cálculo de los efectos del oleaje sobre sus taludes de aguas arriba, así como para el diseño del revestimiento de protección de los taludes, el diseño de los parapetos en las coronas de las presas y el diseño de los muros y otras estructuras que estén sujetas a los efectos del oleaje en los embalses. La Norma se aplica por igual a los proyectos de nuevas presas y a la revisión y remodelación de las presas ya construidas.

La presente *Parte 1* establece las especificaciones para el cálculo de los parámetros del oleaje en los embalses de las presas y el cálculo de las cotas de las coronas y las coronaciones de las presas de materiales locales.

## 2 Referencias normativas

El siguiente documento de referencia es indispensable para la aplicación de esta norma. Para la referencia no fechada se aplica la última edición del documento de referencia (incluyendo cualquier enmienda).

NC 48-03 Ingeniería hidráulica — Riego y drenaje — Términos y definiciones.

## 3 Términos y definiciones

A los fines de este documento se aplican los términos y definiciones establecidos en la NC 48-03, incluyendo los siguientes:

**3.1 Ola gravitatoria forzada debida al viento:** Ola provocada por la acción continuada del viento y cuya formación se debe fundamentalmente a la aceleración de la gravedad.

**3.1.1 Ola libre (o de marejada):** Ola que persiste después que cesa el viento que la provocó.

**3.1.2 Ola regular:** Ola que forma parte de grupos donde los elementos permanecen invariables.

**3.1.3 Ola irregular:** Ola que forma parte de grupos cuyos elementos varían de forma aleatoria.

**3.1.4 Ola progresiva (o con desplazamiento):** Ola que se desplaza por la superficie del agua.

**3.1.5 Ola estacionaria:** Ola que permanece fija en la superficie del agua.

**3.1.6 Ola trocoidal:** Ola cuyo perfil sigue el de una trocoide o curva descrita por un punto de una circunferencia al rodar sobre una línea recta.

**3.2 Elementos (principales) de la ola:** Altura, longitud y período de la ola.

**3.2.1 Altura de la ola:** Elevación de la cima de la ola sobre la sima vecina de su perfil.

**3.2.2 Longitud de la ola:** Distancia horizontal entre las cimas de dos crestas contiguas del perfil de la ola.

**3.2.3 Período de la ola:** Intervalo de tiempo entre el paso de dos cimas contiguas por una vertical dada.

**3.2.4 Grado de expansión de la ola:** Relación entre la longitud y la altura de la ola.

**3.3 Perfil (principal) de la ola:** Línea de intersección entre la superficie del agua alterada por el oleaje y un plano vertical dirigido a lo largo de la ola (Ver Figura 1).

**3.3.1 Cresta de la ola:** Parte de la ola que se localiza por encima de la línea media del perfil.

**3.3.2 Cima de la ola:** Punto más alto de la cresta de la ola.

**3.3.3 Depresión de la ola:** Parte de la ola que se localiza por debajo de la línea media del perfil.

**3.3.4 Sima de la ola:** Punto más bajo de la depresión de la ola.

**3.3.5 Línea media del perfil de la ola:** Línea que intercepta un registro de las oscilaciones de una ola de forma tal, que las áreas totales que se localicen por encima y por debajo de esta línea resulten iguales entre sí. En una ola regular la línea media se localiza al nivel de la semisuma de las elevaciones correspondientes a la sima y la cima de la ola.

**3.4 Tren (sistema) de olas:** Serie de olas consecutivas que tienen igual origen.

**3.4.1 Frente de ola:** Línea que en una superficie sometida a oleaje pasa por las cimas de las crestas de la ola.

**3.4.2 Rayo de la ola:** Línea perpendicular a un frente de ola en un punto dado del mismo.

**3.4.3 Celeridad de la ola:** Velocidad de desplazamiento de la cresta de una ola progresiva en la dirección de su propagación por la superficie de un agua en reposo.

**3.5 Evento de cálculo:** Evento que ocurre una vez en un número dado de años y se caracteriza por una velocidad, una dirección y sentido, un recorrido y una duración tales del viento, que en un punto dado provoca la formación de una ola con los valores máximos de sus elementos.

**3.5.1 Velocidad de cálculo del viento (para la determinación de los parámetros de la ola):** Velocidad del viento sobre la superficie del agua en el embalse.

**3.5.2 Recorrido o *fetch*:** Distancia a lo largo de la cual actúa el viento sin interrupciones ni cambios apreciables en su dirección y sentido, ni reducción apreciable de su velocidad.

**3.5.3 Nivel representativo de cálculo del agua:** Nivel que se establece tomando en cuenta las variaciones anuales y estacionales de los niveles en el embalse y la que se deba a la formación del propio evento de cálculo.

**3.6 Cortina (de la presa):** Obra que se construye sobre un río para interrumpir, almacenar o desviar sus aguas.

**3.6.1 Corona (de la cortina de la presa):** Plano superior de la cortina, que forma una franja comprendida entre los bordes de sus taludes de aguas arriba y de aguas abajo.

**3.6.2 Coronación de la presa;** Punto más alto de la sección de la cortina de la presa.

**3.6.3 Bordo libre:** Altura que media entre el nivel representativo de cálculo del agua en el embalse y la coronación de la presa; en el caso general está formada por la sobreelevación por empuje, la altura de trepado y el sobrebordo o reserva de seguridad.

**3.6.4 Sobreelevación por empuje:** Incremento que recibe el nivel estático del agua en el embalse bajo el empuje sostenido del viento al actuar hacia la presa.

**3.6.5 Altura de trepado:** Altura máxima que se produce a partir del nivel de sobreelevación por empuje, cuando la ola rompe y asciende por el talud de aguas arriba de la presa, por un parapeto construido sobre la corona o por el paramento de un muro vertical o muy inclinado construido en el embalse.

**3.6.6 Sobrebordo o reserva de seguridad:** Altura que por seguridad se adiciona a la cota de trepado obtenida por el cálculo, para establecer la cota de coronación de la presa.

**3.6.7 Talud de aguas arriba:** Plano de la sección de la cortina que desciende hacia el embalse.

**3.6.8 Coeficiente de inclinación del talud de aguas arriba:** Cotangente trigonométrica del ángulo de inclinación del talud de aguas arriba con respecto al horizonte.

**3.6.9 Revestimiento (del talud de aguas arriba):** Obra que se ejecuta para reforzar y mantener en equilibrio el material del talud de aguas arriba de una presa contra la acción del oleaje.

**3.6.10 Enrocamiento (del talud de aguas arriba):** Revestimiento del talud de aguas arriba formado por piedras gruesas o por rocas seleccionadas adecuadamente.

**3.6.11 Parapeto:** Elemento estructural que consiste en un muro vertical de paramento recto o curvo, y que en muchos casos se construye sobre la corona para interrumpir la ola, rechazarla o reorientarla de nuevo hacia el embalse.

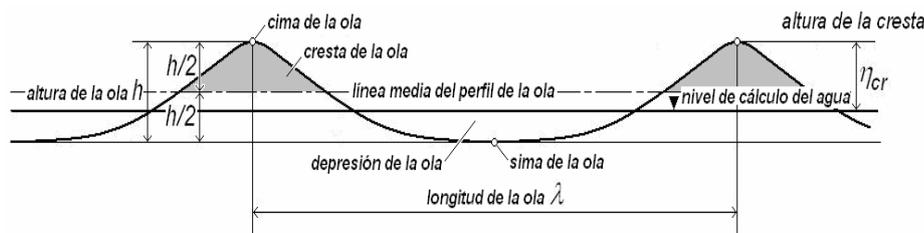


Figura 1 — Elementos del perfil de una ola regular trocoidal

#### 4 Lista de símbolos

En la presente NC 972-1 y por extensión en las demás partes de la NC 972, se emplean los símbolos de la siguiente Tabla 1.

Tabla 1 — Lista de símbolos

$a$	- sobrebordo o reserva de seguridad (m)
$[BL]$	- bordo libre (m)
$d$	- dimensión (longitud) característica de los bloques con forma de hexápodos (m)
$e$	- dimensión (lado de la sección transversal) de los bloques con forma de hexápodos (m)
$F$	- recorrido o <i>fetch</i> del viento (km)
$F_{eq}$	- valor equivalente del recorrido o <i>fetch</i> en los embalses de configuración compleja (km)
$F_{max}$	- valor máximo del recorrido o <i>fetch</i> del viento (km)
$F_o$	- valor del <i>fetch</i> central del viento en los embalses de configuración compleja (km)
$g$	- aceleración en caída libre ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
$H$	- profundidad de cálculo del agua en el embalse (m)
$H_{presa}$	- altura (máxima) de la presa (m)
$h$	- altura de la ola (m)
$h_m$	- altura de la ola media (de 50%) de un tren de olas (m)
$h_{m(pr)}$	- altura de la ola media (de 50%) de un tren de olas en aguas profundas (en m)
$h_{p\%}$	- altura de la ola de probabilidad $p$ (en m) en un tren de olas (m)

- $h_{1\%}$  - altura de la ola de probabilidad  $p$  igual a 1% en un tren de olas (m)  
 $h_{2\%}$  - altura de la ola de probabilidad  $p$  igual a 2% en un tren de olas (m)  
 $h_{p\%(pr)}$  - altura de la ola de probabilidad  $p$  en un tren de olas en aguas profundas (m)  
 $h_{1\%(pr)}$  - altura de la ola de probabilidad  $p$  igual a 1% en un tren de olas en aguas profundas (m)  
 $h_{trep\%}$  - altura de trepado con una probabilidad distinta de 1% (m)  
 $h_{trep1\%}$  - altura de trepado con una probabilidad de 1% (m)  
 $K_{p\%}$  - factor de probabilidad de la altura de la ola (adim.)  
 $K_{1\%}$  - factor de probabilidad de la altura de la ola de probabilidad  $p$  igual a 1% (adim.)  
 $K_{trep\%}$  - factor de probabilidad de la altura de trepado (adim.)  
 $K_{cor}$  - coeficiente de forma de la corona (sin parapeto o con parapeto recto o curvo) (adim.)  
 $K_{imperme}$  - coeficiente de impermeabilidad del revestimiento del talud (adim.)  
 $K_{ola}$  - coeficiente de interacción entre la ola y el talud (adim.)  
 $k_{rug}$  - coeficiente generalizado de rugosidad del revestimiento del talud (adim.)  
 $k_W$  - coeficiente que depende de la velocidad del viento y del coeficiente del talud (adim.)  
 $k_{\Delta}$  - coeficiente que depende de la rugosidad relativa del revestimiento (adim.)  
 $k_{\theta}$  - coeficiente que depende del ángulo que forman el *fetch* central y la perpendicular a la cortina (adim.)  
 $k_w$  - coeficiente que depende de la velocidad de cálculo del viento (adim.)  
 $L_{presa}$  - longitud de la presa (km)  
 $m$  - coeficiente de inclinación del talud de aguas arriba de la presa (adim.)  
 $n$  - número de orden de los rayos de cálculo del *fetch* equivalente en los embalses de configuración compleja (adim.)  
 $P$  - peso de un bloque con forma de hexápodo (ton)  
 $p$  - probabilidad de cálculo de la ola (%)  
 $R_{p\%}$  - relación de probabilidad, igual al cociente  $K_{p\%}/K_{1\%}$  (adim.)  
 $T_W$  - duración del viento de cálculo (s)  
 $W$  - velocidad del viento (m/s)  
 $W_Z$  - velocidad del viento registrado a la altura  $z$  sobre la superficie del agua (m/s)  
 $W_C$  - velocidad de circulación de los vientos en el ciclón (m/s)  
 $W_T$  - velocidad de traslación del ciclón (m/s)  
 $z$  - altura de registro del viento (m)  
 $\Delta$  - dimensión característica del revestimiento del talud (m)  
 $\Delta H$  - sobreelevación por empuje (m)  
 $(\Delta H)_o$  - valor auxiliar para el cálculo de la sobreelevación por empuje (m)  
 $\eta_{cr}$  - altura de la cresta de la ola (m)  
 $\lambda_m$  - longitud de la ola media (de 50%) (m)  
 $\lambda_{m(pr)}$  - longitud de la ola media (de 50%) en aguas profundas (m)  
 $\theta$  - ángulo entre el *fetch* central y la perpendicular a la cortina (grados)  
 $\tau_m$  - período de la ola media (de 50%) de un tren de olas (s)  
 $\tau_{m(pr)}$  - período de la ola media (de 50%) de un tren de olas en aguas profundas (s)  
NAM - nivel normado de aguas máximas del embalse (msnm)  
NAN - nivel de aguas normales del embalse (msnm)  
NC - nivel normado de comprobación del embalse (msnm)  
NPMP - nivel del embalse con el paso de la avenida de Precipitación Máxima Probable (msnm)

## 5 Principios generales

Las olas se pueden formar en los embalses de las presas como consecuencia de movimientos tectónicos, del desprendimiento de macizos de las márgenes, de la apertura o el cierre excesivamente rápido de las compuertas de una obra de alivio o de derivación, o de otros factores. No obstante, las olas se generan en los embalses principalmente por la acción de vientos que al circular veloz y persistentemente sobre la superficie del agua generan frentes de olas que avanzan rápidamente, o se enrumban por las configuraciones muchas veces alargadas de estos cuerpos de agua y actúan a lo largo de tramos suficientemente extensos de los mismos, hasta ocasionar la formación de trenes de olas de considerables dimensiones. Si estos frentes de olas o trenes de olas impactan contra los taludes de las presas y otras estructuras de los embalses, pueden provocar graves daños en los mismos y hasta su total destrucción, y si no se toman las provisiones necesarias llegan incluso a sobrepasar, erosionar y hacer colapsar las cortinas de las presas de materiales locales.

Las olas se caracterizan por su altura, su longitud, su período y el cociente entre los dos primeros, o grado de expansión, así como por la acción mecánica que pueden ejercer sobre las superficies sólidas contra las cuales actúen. Estos parámetros dependen en lo fundamental de la velocidad del viento, de su duración continuada y de la longitud de su recorrido o *fetch*, así como de la configuración del embalse, de sus dimensiones en planta y sobre todo de la profundidad del agua en el mismo, ya que si su lecho se localiza suficientemente cerca de la superficie puede influir considerablemente en el desarrollo y el comportamiento del oleaje y atenuar las dimensiones y valores de sus parámetros.

Las características que pueden presentar las olas dan lugar a diversas clasificaciones, cuyos tipos principales se han definido sucintamente en 3.1 a 3.1.6. Por otra parte, sólo bajo condiciones idealizadas las olas pueden conservar inalterables sus características. En las condiciones reales, por el contrario, bajo la acción de los vientos y de las rachas que los acompañan, y como resultado de la circulación turbulenta y el cambio incesante en las presiones locales que tienen lugar en el seno del líquido, nacen una multitud de ondulaciones que se propagan en todas direcciones a partir de sus puntos de origen y que se entrecruzan con las que se han iniciado de igual manera en otros puntos de la superficie del agua. Como resultado de su superposición o interferencia, los movimientos oscilatorios de las partículas se hacen cada vez más complejos y las olas que se divisan en los espejos de los embalses adoptan un aspecto y un comportamiento claramente irregular. De aquí se desprende que la configuración de la superficie del oleaje producido por una tormenta puede representarse como la interrelación de un conjunto de componentes espectrales simples que se combinan entre sí como oscilaciones armónicas de carácter aleatorio.

Sobre estas bases, los enfoques actuales en el tratamiento de los sistemas de olas se fundamentan en una combinación de análisis estadísticos probabilísticos de datos experimentales colectados con sistematicidad en embalses y otros cuerpos de agua reales o en modelos físicos de grandes dimensiones, y de una concepción teórica espectral del oleaje que se basa en la hipótesis de que las distintas componentes de las olas pueden ser descritas con los métodos hidrodinámicos que se ha logrado desarrollar en los casos de las olas de muy pequeña amplitud.

Lo expuesto evidencia lo complejo del problema, y explica por qué en el tratamiento práctico del mismo se ha hecho necesario introducir el empleo de funciones de distribución que como se ha confirmado reiteradamente se comportan de forma estable, aún si los datos de que se alimentan han sido tomados, por ejemplo, con iguales profundidades relativas, pero en embalses y otros cuerpos de agua totalmente distintos entre sí. El hecho de que con independencia de lo desordenado que pueda parecer el comportamiento del oleaje en una superficie sometida a la acción del viento, el carácter estocástico de ese comportamiento irregular esté sujeto a determinadas leyes probabilísticas, y que los parámetros de ese oleaje irregular posean estacionalidad, es decir, que las características de los sistemas de olas prácticamente no varíen en el tiempo mientras los factores externos permanezcan constantes, ha permitido establecer dependencias muy confiables para las relaciones que se establecen entre los valores que los parámetros mencionados anteriormente pueden alcanzar con una probabilidad dada, y los valores medios que caractericen a dichos parámetros en un sistema de olas, y basar en estas dependencias recomendaciones sustentadas para la

adopción de la probabilidad de ocurrencia que resulte más adecuada para el cálculo de uno u otro parámetro del oleaje o del diseño de las obras que se necesite proteger.

En relación con este último aspecto, la experiencia de la construcción y explotación de las presas ha sentado principios ampliamente reconocidos en los que se fundamentan la determinación de las cotas de las coronas de las presas y de las cotas más altas de sus cortinas (su coronación) y el diseño de los revestimientos de sus taludes de aguas arriba, sobre los cuales las olas rompen y se mueven en forma de flujos fuertemente aireados tras impactar contra los mismos. Dada la complejidad de incorporar estructuras u otros recursos capaces de disipar el oleaje en el propio embalse, o lo costoso de construir taludes más acostados (a veces con inclinación variable), que extienden la sección de las cortinas e incrementan por lo tanto sus volúmenes, la vía más realista y asequible para proteger las presas contra el oleaje consiste en aplicar revestimientos apropiados a aquellos taludes que en cada caso garanticen la estabilidad requerida, y caracterizar con la mayor confiabilidad posible cuáles serán los parámetros de los flujos de agua que se formarán en presencia de dichas inclinaciones y revestimientos.<sup>(1)</sup>

La presente Norma implementa estos principios y métodos de cálculo y de diseño en una forma clara y coherente que permite realizar análisis exhaustivos de los distintos ángulos del problema y alcanzar resultados que se pueden aplicar de forma confiable en la práctica moderna del diseño y la explotación de las presas.

## 6 Determinación de las velocidades de cálculo del viento

### 6.1 Procedimiento usual

La selección del viento de cálculo que se emplee para caracterizar el oleaje en los embalses se fundamenta usualmente en el análisis estadístico de los valores medios y máximos de los vientos registrados en las estaciones climáticas o meteorológicas cercanas al cierre de la presa, y de la dirección y duración de los mismos; en el examen de la relación que se establezca entre la ocurrencia de dichos vientos durante el año y el régimen de niveles del embalse, así como en la categoría de la presa. En este contexto, generalmente se supone que con la formación en el embalse del nivel NAN de aguas normales se deba esperar un viento con una probabilidad de ocurrencia de 2% en las presas de categorías I y II, y con una probabilidad de 4% en las presas de categorías III y IV, y que la formación del nivel NAM de aguas máximas se acompañará con un viento de 50% de probabilidad entre los que se registren durante el período de formación más frecuente de ese nivel en la presa. En ausencia de datos, se adoptan velocidades de 45 m/s y de 20 m/s - 22 m/s en uno u otro caso, respectivamente.

Tomando además en cuenta el frenado de las capas inferiores del viento por su rozamiento contra la superficie del agua, como valor de cálculo  $W$  (en m/s) se adopta el que ocurre a una altura de 10 m sobre dicha superficie, que ha sido tabulado y se puede expresar por el ajuste:

$$W = \left( \frac{10}{z} \right)^{0,13} W_z \quad (1)$$

donde

$W_z$  (en m/s) es el viento medido a la altura  $z$  (en m), cuando ésta varía entre 2 m y 20 m.

<sup>(1)</sup> Cuando en su sección transversal las presas ya incorporen a lo largo de su talud de aguas arriba pantallas de hormigón, hormigón armado u otro material destinado a minimizar los flujos de filtración, o cuando su prisma de aguas arriba se construya de escollera, no se requerirá proceder al revestimiento adicional de la superficie del talud. En estos casos, sin embargo, los métodos que se exponen en la Norma se aplicarán igualmente a la caracterización del flujo sobre estos taludes, a la determinación de los efectos que ejercerá sobre los mismos y al establecimiento de las cotas requeridas de corona y de coronación.

## 6.2 Procedimiento de la Norma

### 6.2.1 Velocidades de circulación de los organismos ciclónicos

El procedimiento usual se ha establecido por la experiencia de diseños y análisis llevados a cabo mayormente en regiones continentales o muy extensas y con variaciones relativamente graduales y estables del régimen de los vientos, y valores moderados de sus extremos máximos. A diferencia de lo anterior, en circunstancias como las del territorio cubano, situado en la trayectoria obligada de una gran parte de los organismos ciclónicos que se originan en esta región del planeta, son los eventos ciclónicos, cada vez más frecuentes e intensos y acompañados con rachas de excepcional violencia, la fuente esencial de los mayores vientos que generan el oleaje en los embalses. Por los meses en que ocurren y las abundantes precipitaciones que producen, el impacto de estos fenómenos coincide generalmente con la formación de los mayores niveles del agua en los embalses. Por otra parte, su génesis y su comportamiento temporal y espacial hacen que los vientos que ellos originan difícilmente puedan englobarse en un mismo tratamiento estadístico con los vientos alisios, los vientos diarios de origen convectivo o con vientos de otra índole, muy inferiores en valor y en persistencia.

La caracterización establecida internacionalmente para la velocidad media de los vientos de circulación en los organismos ciclónicos se ha recogido en las Tablas 2 y 3. Al realizar aquí la conversión de km/h a m/s se han introducido convenientes aproximaciones y redondeos.

**Tabla 2 — Tipos de organismos ciclónicos**

Tipo	Vientos sostenidos	
	km/h	m/s
Depresión tropical	Menores de 63	Menores de 15
Tormenta tropical	Entre 63 y 119	Entre 15 y 30
Huracán tropical	Mayores de 119	Mayores de 30

**Tabla 3 — Categorías de los huracanes tropicales, según la escala Saffir & Simpson**

Categoría	Nivel de daños	Vientos sostenidos	
		km/h	m/s
1	Bajo	119 a 153	30 a 40
2	Moderado	154 a 177	40 a 50
3	Extremo	179 a 209	50 a 60
4	Extenso	211 a 249	60 a 70
5	Catastrófico	Más de 249	Más de 70

### 6.2.2 Valores de cálculo de las velocidades de circulación de los vientos ciclónicos

Sobre esta línea base, y considerando el estado del arte sobre el tema, la presente Norma estipula que para realizar los cálculos del oleaje en los embalses que se construyen o explotan en condiciones meteorológicas como las que imperan en el territorio cubano, y de los parámetros constructivos y de explotación de las presas que de ellos dependen, las velocidades de circulación del viento se tomen de la Tabla 4, según la categoría de la presa, el nivel representativo de cálculo del agua en el embalse y el tipo de configuración del embalse, que se definirá en 7.1 y 7.2. Con ello, según un criterio refrendado por la práctica, los vientos asociados al nivel NAN de aguas normales se inscriben en los rangos correspondientes a los huracanes tropicales de las categorías I y II, y los asociados al nivel NAM de aguas máximas se ubican por debajo de los primeros y caracterizan las depresiones y las tormentas tropicales, mientras que tanto con la formación del nivel NC de comprobación de la probabilidad normada, como con la formación del nivel NPMP que se provocará con la evacuación de la avenida de Precipitación Máxima Probable (PMP), se supone la ausencia de vientos, y por lo tanto de oleaje en el embalse.

**Tabla 4 — Valores de cálculo de la velocidad de circulación  $W_C$  y de traslación  $W_T$  (en m/s) de los vientos ciclónicos para la determinación de los parámetros del oleaje, según la categoría de la presa, el nivel representativo de cálculo del agua en el embalse y la configuración del embalse**

Categoría de la presa	Nivel representativo de cálculo					
	NAN		NAM		NC	NPMP
	$W_C$ (m/s)	$W_T$ (m/s)	$W_C$ (m/s)	$W_T$ (m/s)		
I	45 a 50	4,5 a 5,0	25 a 30	2,5 a 3,0	0	0
II	40 a 45	4,0 a 4,5	20 a 25	2,0 a 2,5	0	0
III	35 a 40	3,5 a 4,0	15 a 20	1,5 a 2,0	0	0
IV	30 a 35	3,0 a 3,5	10 a 15	1,0 a 1,5	0	0

**Nota.** En cada rango indicado de velocidades el mayor valor se tomará en los embalses de configuración simple y el menor valor en los embalses de configuración compleja, caracterizados en el acápite 7.

### 6.2.3 Valores de cálculo de las velocidades de traslación de los ciclones

Además de tomar en cuenta la velocidad media de circulación de los vientos que se registran en los ciclones, se debe valorar el rumbo de donde éstos proceden, en relación con la localización de los embalses y la disposición en ellos de las presas, así como la velocidad de traslación  $W_T$  de los ciclones al impactar contra los primeros. En los cálculos esta velocidad se determinará con la relación  $W_T=0,1W_C$ , que en el caso de los ciclones tropicales cuya formación se asocia en la Tabla 4 al establecimiento de los niveles NAM de aguas máximas y NAN de aguas normales en los embalses, conduce, como se indica en la misma tabla, a velocidades que varían entre 1 m/s y 5 m/s (4 km/h y 18 km/h) y coinciden cercanamente con las que se han registrado con la ocurrencia de esos eventos.

### 6.2.4 Esquema de cálculo de la orientación de las trayectorias de los ciclones

El esquema de cálculo de la Figura 2 se ha concebido para obtener resultados que estén siempre del lado de la seguridad, y muestra que con independencia de la orientación particular que presente un embalse, siempre resulta posible que la trayectoria de un ciclón lo lleve a pasar por las inmediaciones del mismo de un modo tal, que aquél reciba directamente la acción de los vientos de circulación, que en los ciclones del hemisferio norte giran contra el sentido de las manecillas del reloj. Por otra parte, en el caso del territorio cubano, los ciclones lo atraviesan siguiendo trayectorias cuyas direcciones se localizan por lo general dentro de un ángulo aproximado de  $90^\circ$ , con el rumbo Norte como bisectriz. Esto conduce a que del esquema, donde se han incluido ocho orientaciones posibles del embalse, se desprenda inmediatamente que si este último se orienta hacia el Noreste, hacia el Norte o hacia el Noroeste, podrá experimentar completamente la acción adicional de la velocidad de traslación  $W_T$  del ciclón, por lo que en estos casos la velocidad total de cálculo del viento deberá tomarse como la suma  $W=W_C+W_T^{(2)}$ . En los casos en que el embalse se oriente hacia el Este o hacia el Oeste, la suposición de que el organismo ciclónico se desplace por una de las trayectorias límites, es decir, del Suroeste al Noreste en el primer caso o del Sureste al Noroeste en el segundo, hará que el embalse reciba la mayor acción adicional posible de la velocidad de traslación en estas circunstancias, que se expresará como una componente igual a  $0,7W_T$  y hará que los cálculos del oleaje se realicen con una velocidad  $W=W_C+0,7W_T$ . Por debajo del ecuador del esquema, si los embalses se orientan hacia el Sureste o hacia el Suroeste, la adopción de las mismas trayectorias límites y en el mismo orden que en los dos casos anteriores, hará que en ambas circunstancias se anule la formación de una velocidad de traslación de sentido inverso a la de circulación, y que se cumpla simplemente que  $W=W_C$ . Por último, cuando el embalse se oriente francamente hacia el Sur, no se podrá obviar el surgimiento de una velocidad de traslación que se oponga a la formación de oleaje contra la presa, pero esta velocidad se reducirá a una componente mínima de  $0,7W_T$  si se asume que el ciclón se moverá siguiendo una u otra de las trayectorias límites señaladas anteriormente, con lo que se llega a  $W=W_C-0,7W_T$ .

<sup>(2)</sup> La pequeña relación entre  $W_T$  y  $W_C$  permite que en el esquema se obvie el tratamiento vectorial de las velocidades y la deriva que ello supone en la dirección y sentido de la velocidad resultante.

En el escenario cubano los ciclones se han desplazado también con alguna frecuencia en trayectorias que cursan de Este a Oeste e incluso de Oeste a Este, cubriendo tramos de variable longitud. Al acometer los cálculos del oleaje en un embalse situado en una localidad donde se haya registrado esta u otra circunstancia peculiar, convendrá hacerlo implementando los mismos principios que se expusieron anteriormente.<sup>(3)</sup>

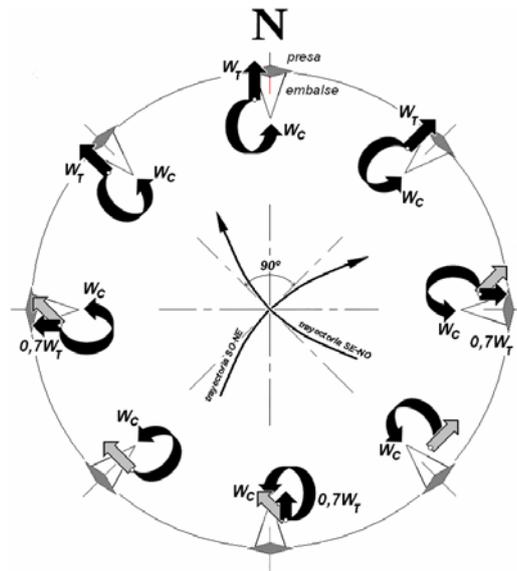


Figura 2 — Esquema de cálculo del impacto de los ciclones contra los embalses ( $W_C$ : velocidad de circulación;  $W_T$ : velocidad de traslación)

## 7 Determinación del recorrido o fetch

### 7.1 Embalses de configuración simple

A escala local los vientos, en especial los huracanados, pueden variar de rumbo de forma aleatoria dentro de un abanico más o menos amplio de rumbos cercanos entre sí. Dado un rumbo predominante del viento de cálculo, se puede considerar que éste podrá oscilar alrededor del mismo dentro de un ángulo que puede llegar a ser de  $45^\circ$  y delimita un octante en la rosa de los vientos. Sin embargo, como hipótesis fundamental de cálculo, en los embalses relativamente simples como el de la Figura 3, con configuraciones alargadas aproximadamente regulares, se considerará que el mencionado ángulo se reducirá al mínimo y con cada nivel representativo de cálculo del agua en el embalse se tomará como *fetch* de cálculo el valor  $F=F_{max}$ , es decir, el que posea la mayor longitud que se pueda establecer entre el borde de la presa y la margen opuesta visible del embalse con ese nivel, al tiempo que en consonancia con lo expuesto anteriormente se asociará al mismo el valor  $W$  del viento de cálculo que resulte de aplicar el esquema de la Figura 2 a la dirección y la orientación en planta del embalse.

Así, en el ejemplo de embalse de configuración simple de la Figura 3, con el nivel NAM de aguas máximas de 96,9 msnm la dirección del *fetch* de cálculo  $F=F_{max}=7,22$  km coincide con la del eje del embalse, que es de NE a SO, por lo que según el esquema de la Figura 2 la velocidad  $W$  de cálculo del viento deberá tomarse simplemente como la velocidad de circulación del ciclón, es decir como  $W=W_C$ .

<sup>(3)</sup> Lo expuesto anteriormente demuestra además que al paso de un ciclón por las inmediaciones de una presa se pueden crear condiciones para que se formen olas orientadas hacia la cola del embalse, y que estas olas pueden acompañarse de remansos por surgencia en el río tributario e incluso avanzar río arriba hasta el punto en que su energía se disipe al encuentro contra la corriente.

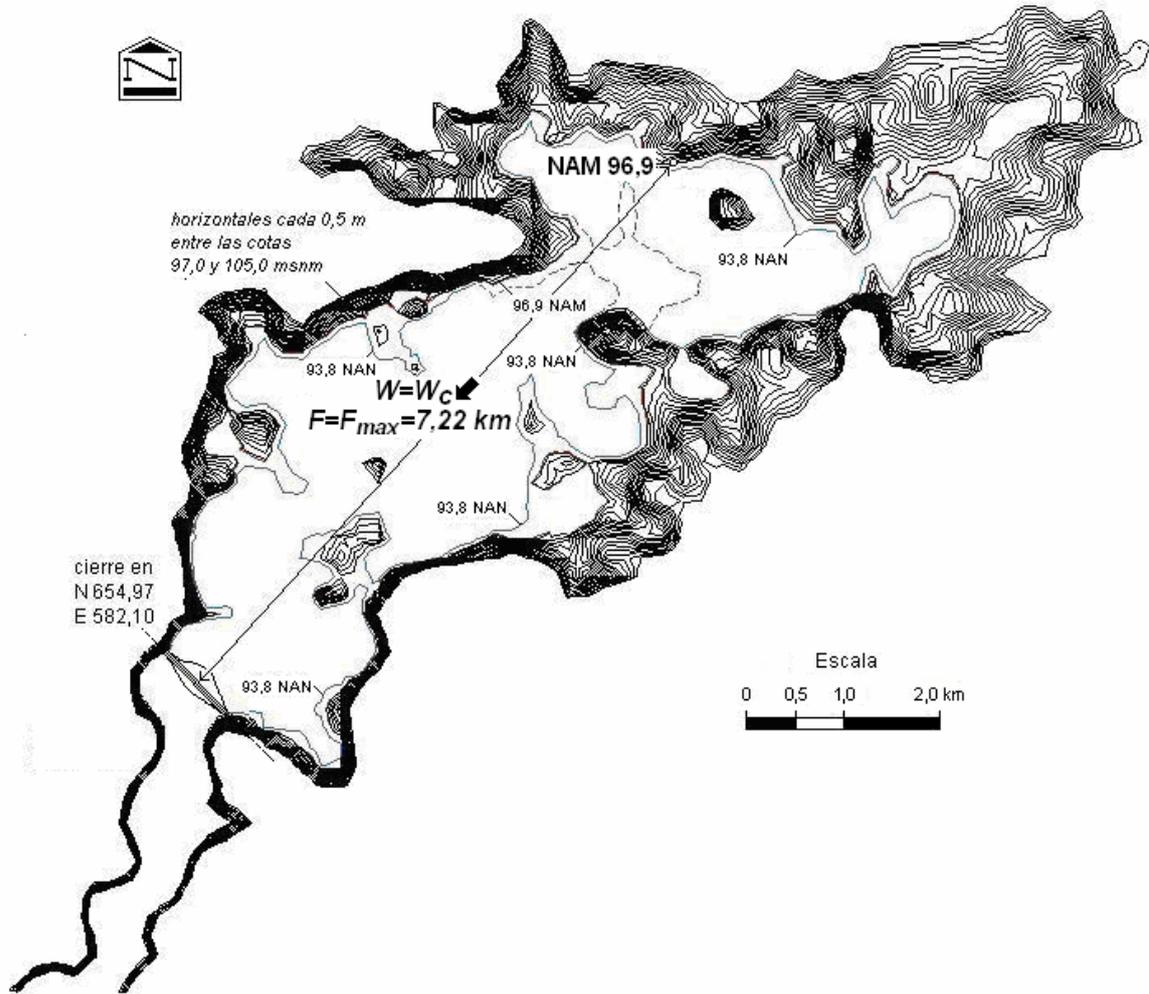


Figura 3 — Ejemplo de determinación del *fetch* en un embalse de configuración simple

## 7.2 Embalses de configuración compleja

Al contrario de lo anterior, y con carácter de excepción, en los embalses relativamente amplios que presenten configuraciones complejas, caracterizadas por la presencia de considerables irregularidades en sus márgenes, se considerará que el abanico de vientos podrá alcanzar la amplitud máxima de  $45^\circ$ , y que la combinación entre esta circunstancia y las mencionadas irregularidades afectará el campo de oleaje y creará interferencias que influirán en la altura de las olas que se propaguen en las diferentes direcciones. Los valores resultantes de las alturas de cálculo de las olas que se generarán en estas condiciones, así como los demás parámetros asociados a las mismas, se obtendrán con cada nivel representativo de cálculo del agua en el embalse con un *fetch* igual a  $F=F_{eq}$ , donde  $F_{eq}$  es el valor del *fetch* equivalente, que se establecerá aplicando la siguiente expresión para desarrollar el procedimiento que se representa en la Figura 4:

$$F_{eq} = \frac{\sum_{n=-3}^{n=3} F_n \cos(7,5^\circ n)}{\sum_{n=-3}^{n=3} \cos(7,5^\circ n)} = \frac{F_0 \cos 0^\circ + (F_{-1} + F_{+1}) \cos 7,5^\circ + (F_{-2} + F_{+2}) \cos 15,0^\circ + (F_{-3} + F_{+3}) \cos 22,5^\circ}{\cos 0^\circ + 2 \cos 7,5^\circ + 2 \cos 15,0^\circ + 2 \cos 22,5^\circ} =$$

$$= \frac{F_0 + 0,99(F_{-1} + F_{+1}) + 0,97(F_{-2} + F_{+2}) + 0,92(F_{-3} + F_{+3})}{6,76} \quad (2)$$

Para ello el ángulo de  $45^\circ$  se dividirá en ángulos parciales de  $7,5^\circ$  de amplitud y los *fetch* medidos a lo largo de los rayos que se extiendan desde el punto de cálculo en la presa hasta sus intersecciones con las márgenes opuestas, se proyectarán sobre la línea del *fetch* central  $F_0$ . Tras determinar así el valor  $F_{eq}$  del *fetch* equivalente, se hallará el cociente  $F_{eq}/F_0$  entre dicha longitud y la longitud del *fetch* central.

Como requisito para aplicar el procedimiento se considerará que una configuración es compleja únicamente si en ella se cumple la condición  $F_{n \text{ min}}/F_{n \text{ max}} \leq 0,5$  en un sector reducido que se extienda desde  $-15^\circ$  hasta  $+15^\circ$  a los lados del rayo central, mientras que de lo contrario, en cualquier caso se adoptará como *fetch* de cálculo el valor  $F=F_0$ . Adicionalmente se exigirá que para que un saliente en planta de las márgenes sea capaz de interrumpir el desarrollo de un rayo, ocupe dentro del mencionado sector reducido de amplitud  $30^\circ$  una dimensión angular que sea igual o mayor que  $7,5^\circ$ , o que aún con una dimensión algo menor que ésta, se caracterice por la presencia en su superficie de elevaciones tan considerables del terreno, que sean capaces manifiestamente de interrumpir el desarrollo del viento a lo largo de esa dirección. Por último, si el cociente  $F_{eq}/F_0$  que se obtenga con este cálculo resulta inferior a  $0,7$ , para determinar los parámetros de las olas, la sobreelevación por empuje y la altura de trepado se adoptará para el *fetch* un valor límite mínimo igual a  $F=0,7F_0$ , lo que responde al criterio de evitar que en las alturas de cálculo de las olas se introduzcan reducciones que sean mayores de  $15\%$ , aproximadamente. La determinación de los parámetros de las olas y de las magnitudes que intervengan en el revestimiento del talud y en la coronación de la presa se llevará a cabo empleando la velocidad  $W$  del viento de cálculo que resulte de aplicar el esquema de la Figura 2 a la dirección y orientación del embalse.

De este modo, en el embalse de configuración compleja de la Figura 4 la formación del nivel NAN de aguas normales de  $34,85$  msnm conduce a que la relación  $F_{-1}/F_0=4,40/9,30=0,47$  satisfaga el requisito  $F_{n \text{ min}}/F_{n \text{ max}} \leq 0,5$ . La parte del saliente de la margen derecha comprendido entre los rayos  $n=+3$  y  $n=+2$  tiene una amplitud angular mayor de  $7,5^\circ$ , pero al no incluirse en el sector reducido de amplitud  $30^\circ$  no interrumpe el desarrollo del rayo  $n=+3$ ; el extremo de ese mismo saliente queda incluido en el sector reducido de  $30^\circ$  pero no alcanza una amplitud angular mayor de  $7,5^\circ$ , por lo que no interrumpe el rayo  $n=+2$ ; la parte del saliente de la margen izquierda que está comprendida entre los rayos  $n=-3$  y  $n=-2$  tiene una amplitud angular mayor de  $7,5^\circ$ , pero al no incluirse en el sector reducido de  $30^\circ$  no interrumpe el desarrollo del rayo  $n=-2$ . Sin embargo, el extremo de este mismo saliente queda incluido en el sector reducido de  $30^\circ$  y al mismo tiempo alcanza una amplitud angular mayor de  $7,5^\circ$ , por lo que interrumpe el rayo  $n=-1$ . El cálculo arroja un *fetch* equivalente de  $F_{eq}=6,87$  km y una relación  $F_{eq}/F_0=6,87/9,30=0,74$  que no es inferior a la mínima admisible de  $0,7$ , por lo que en los cálculos de los parámetros de la ola y de su altura de trepado se podrá considerar como *fetch*  $F$  el valor calculado de  $6,87$  km. Como el embalse resulta orientado aproximadamente hacia el NNO, de acuerdo con el esquema de la Figura 2 el viento de cálculo se tomará como la suma  $W=W_c+W_t$  de los vientos de circulación y de traslación del ciclón que fije la Tabla 4 para el nivel característico NAN del embalse (ver el Ejemplo de aplicación del acápite 11).

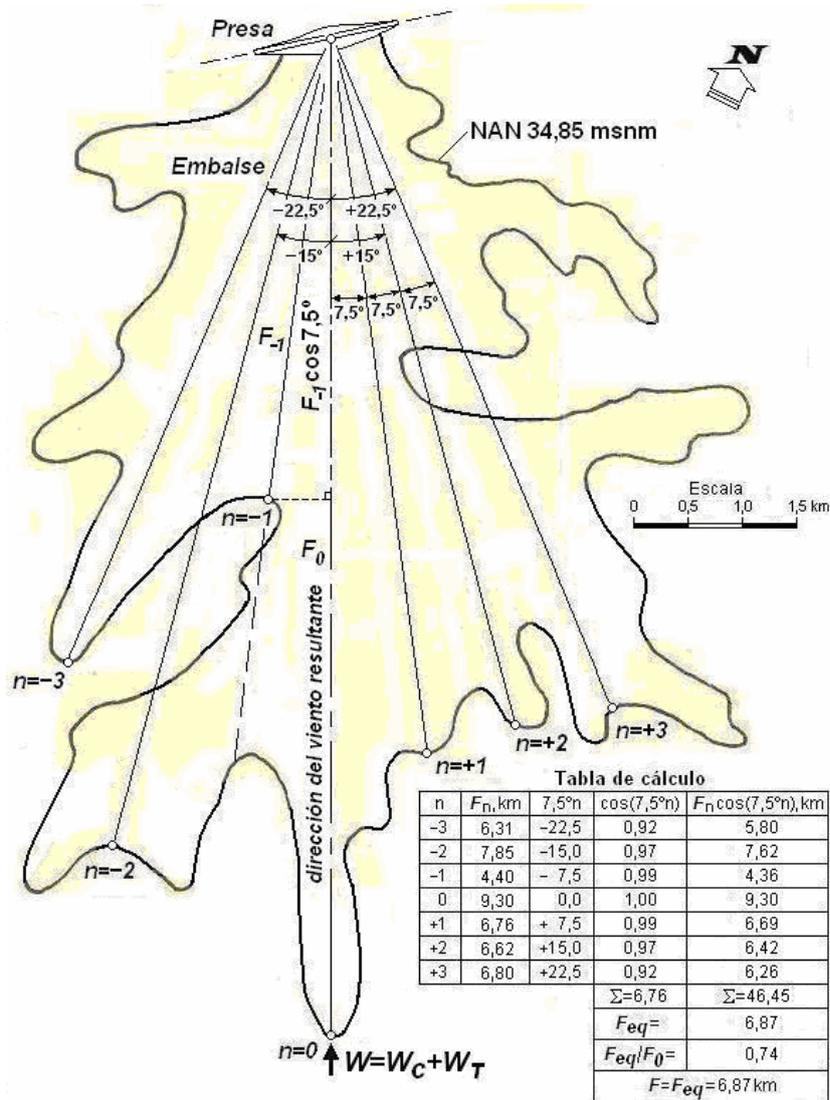


Figura 4 — Ejemplo de determinación del *fetch* en un embalse de configuración compleja

### 7.3 Embalses de configuración peculiar

Por último, en los embalses con accidentes topográficos que pongan la presa a evidente resguardo de las olas, el *fetch* de cálculo se establecerá aplicando los principios anteriores, y los cálculos del oleaje en la zona del espejo de agua que resulte beneficiada por esta circunstancia se realizarán con valores de velocidad que sean iguales a las dos terceras partes de los que se obtengan con el esquema de la Figura 2. En condiciones aún más peculiares los esquemas de cálculo se ajustarán lo más posible a las consideraciones anteriores y se hará uso de buen juicio y previsión para que los resultados que se obtengan descansen invariablemente del lado de la seguridad.

## 8 Determinación de los parámetros del oleaje

### 8.1 Determinación de la altura de la ola media en aguas profundas

Los parámetros del oleaje que se puede crear en un embalse se establecen determinando inicialmente la altura  $h_m$  de la ola media (de 50% de probabilidad) del tren de olas, con el gráfico doblemente logarítmico en coordenadas adimensionales de la Figura 5. Para ello se calcula el argumento o *fetch* relativo  $gF/W^2$  (con la velocidad del viento  $W$  en m/s, el *fetch*  $F$  en km<sup>(4)</sup>) y el valor  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup> de la aceleración en caída libre), y asumiendo que en el embalse prevalecen las condiciones de aguas profundas se entra con este valor en el gráfico hasta cortar la curva superior de trazo grueso y leer sobre el eje vertical la altura relativa  $gh_m/W^2$ , de la cual se despeja el valor buscado de la altura de la ola media en aguas profundas  $h_{m(pr)}=h_m$  (en m).

El argumento  $gF/W^2$  se emplea únicamente si en el eje horizontal del gráfico su valor se sitúa a la izquierda de la ubicación que alcance en el eje inferior el valor del argumento  $gT_w/W$ , donde  $T_w$  representa la duración (en s) del viento de cálculo. De lo contrario, será este segundo argumento el que se emplee para determinar la altura relativa de la ola. En los océanos y los mares ningún obstáculo se interpone al avance del viento y la duración  $T_w$  se adopta como 64800 s y 57600 s (18 h y 16 h), respectivamente; en los lagos y embalses muy extensos se ha convenido en considerarla igual a 21600 s (6 h), y en los embalses medianos y pequeños su valor de cálculo se puede reducir a 14400 s (4 h) ó 10800 s (3 h). Con las estipulaciones de la Norma, las mayores duraciones se adoptarán con los vientos asociados a los huracanes y por lo tanto, según la Tabla 4, en los cálculos con los niveles NAN de aguas normales, y las menores duraciones se adoptarán con los vientos que ocurren durante las depresiones y tormentas y que en la Tabla 4 se vinculan a los cálculos con niveles NAM de aguas máximas en los embalses.<sup>(5)</sup>

El empleo de la curva superior del gráfico se puede sustituir ventajosamente por el del ajuste:

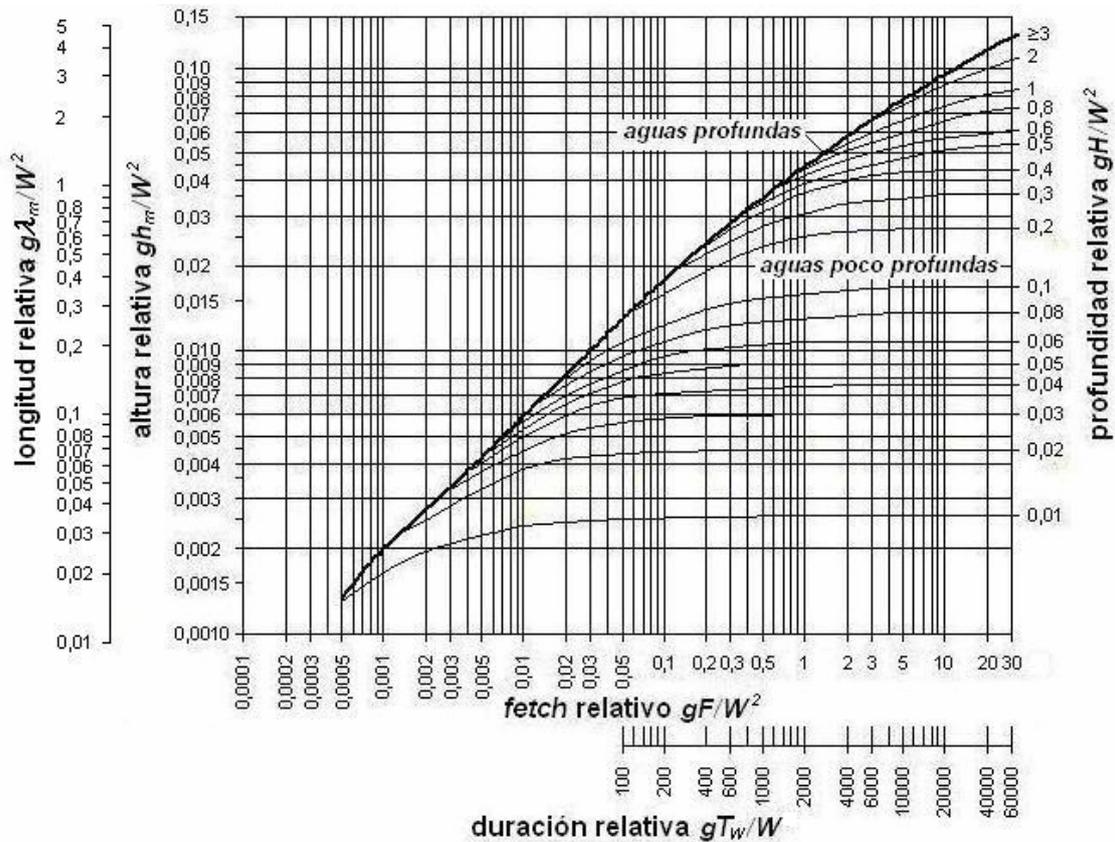
$$\frac{gh_{m(pr)}}{W^2} = 0,002011 + 0,000960 \left( \ln \frac{gF10^3}{W^2} \right) + 0,000085 \left( \ln \frac{gF10^3}{W^2} \right)^2 + 0,000099 \left( \ln \frac{gF10^3}{W^2} \right)^3 \quad (3)$$

que cuando se requiera adoptar el segundo argumento conserva la misma estructura si  $\frac{gF10^3}{W^2}$  se sustituye

por  $0,5 \frac{gT_w}{W}$ . Las Tablas 5 y 6 se han confeccionado empleando estas fórmulas.

<sup>(4)</sup> En los embalses con configuraciones complejas del acápite 7.2,  $F$  representa el *fetch* "equivalente".

<sup>(5)</sup> Con la relación existente entre ambos argumentos, el criterio expuesto para definir cuál debe ser el que se emplee para el cálculo equivale a establecer que en los embalses donde se cumpla la condición  $F \leq WT_w/2000$  (con  $F$  en km,  $W$  en m/s y  $T_w$  en s) el oleaje alcanzará a invadir totalmente la distancia  $F$ , por lo que a partir de entonces la altura  $h_m$  de la ola media del tren de olas se mantendrá constante, con un valor que en condiciones de aguas profundas dependerá únicamente de la velocidad  $W$  del viento que le de origen, mientras que en los embalses donde se cumpla la condición  $F > WT_w/2000$  el valor de  $h_m$  crecerá hasta tanto no haya transcurrido el tiempo  $T_w$  y la ola haya alcanzado su altura definitiva. Con las duraciones de  $T_w$  expuestas más arriba, el paso de la primera a la segunda condición tendrá lugar únicamente en los embalses de muy grandes dimensiones, por lo que en los de mediana y pequeña extensión será el valor actuante del *fetch* el que junto con la velocidad del viento dicte completamente el comportamiento del oleaje, cuando éste se produzca en condiciones de aguas profundas.



$F$  en km,  $T_w$  en s,  $W$  en m/s,  $h_m$  en m,  $\lambda_m$  en m,  $H$  en m,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

Figura 5 — Gráfico de determinación de la altura  $h_m$  y la longitud  $\lambda_m$  de las olas medias (50%) (en aguas profundas: curva de trazo grueso; en aguas poco profundas: curvas de trazo fino)

Tabla 5 — Altura relativa de la ola media en aguas profundas  $gh_{m(pr)}/W^2$ , según el fetch relativo  $gF/W^2$  (empléese únicamente si  $F \leq WT_w/2000$ ) ( $h_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_w$  en s,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )

$gF/W^2$	$gh_{m(pr)}/W^2$										
		0,0010	0,0020	0,010	0,0059	0,10	0,018	1,0	0,045	10	0,095
		0,0015	0,0024	0,015	0,0072	0,15	0,021	1,5	0,052	15	0,107
		0,0020	0,0028	0,020	0,0083	0,20	0,024	2,0	0,058	20	0,116
		0,0025	0,0030	0,025	0,0093	0,25	0,027	2,5	0,062	25	0,123
		0,0030	0,0033	0,030	0,0102	0,30	0,029	3,0	0,066	30	0,129
		0,0035	0,0035	0,035	0,0109	0,35	0,030	3,5	0,069		
		0,0040	0,0038	0,040	0,0117	0,40	0,032	4,0	0,072		
		0,0045	0,0040	0,045	0,0124	0,45	0,034	4,5	0,075		
0,00050	0,0014	0,0050	0,0042	0,050	0,0130	0,50	0,035	5,0	0,078		
0,00055	0,0014	0,0055	0,0044	0,055	0,0136	0,55	0,036	5,5	0,080		
0,00060	0,0015	0,0060	0,0046	0,060	0,0142	0,60	0,038	6,0	0,082		
0,00065	0,0016	0,0065	0,0048	0,065	0,0147	0,65	0,039	6,5	0,084		
0,00070	0,0017	0,0070	0,0049	0,070	0,0152	0,70	0,040	7,0	0,086		
0,00075	0,0017	0,0075	0,0051	0,075	0,0157	0,75	0,041	7,5	0,088		
0,00080	0,0018	0,0080	0,0053	0,080	0,0162	0,80	0,042	8,0	0,089		
0,00085	0,0019	0,0085	0,0054	0,085	0,0166	0,85	0,043	8,5	0,091		
0,00090	0,0019	0,0090	0,0056	0,090	0,0171	0,90	0,044	9,0	0,093		
0,00095	0,0020	0,0095	0,0057	0,095	0,0175	0,95	0,044	9,5	0,094		

**Tabla 6 — Altura relativa de la ola media en aguas profundas  $gh_{m(pr)}/W^2$ , según la duración relativa del viento  $gT_w/W$  (empléese únicamente si  $F > WT_w/2000$ ) ( $h_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_w$  en s,  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>)**

$gT_w/W$	$gh_{m(pr)}/W^2$	$gT_w/W$	$gh_{m(pr)}/W^2$	$gT_w/W$	$gh_{m(pr)}/W^2$
100	0,013	1000	0,035	10000	0,078
150	0,016	1500	0,041	15000	0,088
200	0,018	2000	0,045	20000	0,095
250	0,020	2500	0,049	25000	0,102
300	0,021	3000	0,052	30000	0,107
350	0,023	3500	0,055	35000	0,112
400	0,024	4000	0,058	40000	0,116
450	0,025	4500	0,060	45000	0,120
500	0,027	5000	0,062	50000	0,123
550	0,028	5500	0,064	55000	0,126
600	0,029	6000	0,066	60000	0,129
650	0,030	6500	0,068		
700	0,030	7000	0,069		
750	0,031	7500	0,071		
800	0,032	8000	0,072		
850	0,033	8500	0,074		
900	0,034	9000	0,075		
950	0,034	9500	0,076		

## 8.2 Determinación del período de la ola media en aguas profundas

Tras establecer la altura relativa  $gh_{m(pr)}/W^2$  de la ola media en aguas profundas, su período relativo  $g\tau_{m(pr)}/W$  se determina por el ajuste:

$$\frac{g\tau_{m(pr)}}{W} = 18,85 \left( \frac{gh_{m(pr)}}{W^2} \right)^{0,62} \quad (4)$$

y de aquí se despeja el valor absoluto del período  $\tau_{m(pr)}$  (en s).

## 8.3 Determinación de la longitud de la ola media en aguas profundas

La longitud  $\lambda_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas se calcula (en m) por la relación teórica:

$$\lambda_{m(pr)} = \frac{g\tau_{m(pr)}^2}{2\pi} \quad (5)$$

por lo que empleando las relaciones anteriores, su valor relativo se expresa con la fórmula:

$$\frac{g\lambda_{m(pr)}}{W^2} = 56,55 \left( \frac{gh_{m(pr)}}{W^2} \right)^{1,24} \quad (6)$$

que se ha graficado en la Figura 6. Las Tablas 7 y 8 contienen al mismo tiempo la relación directa entre la longitud relativa de la ola en aguas profundas  $g\lambda_{m(pr)}/W^2$  y el *fetch* relativo  $gF/W^2$  (válida si  $F \leq WT_w/2000$ ), así como la relación entre la longitud relativa y la duración relativa  $gT_w/W$  (válida si  $F > WT_w/2000$ ). Por último, utilizando la relación funcional (6), en el gráfico de la Figura 5 se ha construido a la izquierda del eje vertical de alturas relativas la escala adicional de longitudes relativas  $g\lambda_{m(pr)}/W^2$  que resulta asociada a la anterior, así como al *fetch* relativo y a la duración relativa. Esto permite realizar determinaciones rápidas de la longitud de la ola media, que después pueden ser precisadas con la fórmula, el gráfico y las tablas que se

acaban de exponer. El gráfico de la Figura 5 adquiere así la condición de un gráfico resumen que relaciona todos los factores más importantes involucrados en el problema.

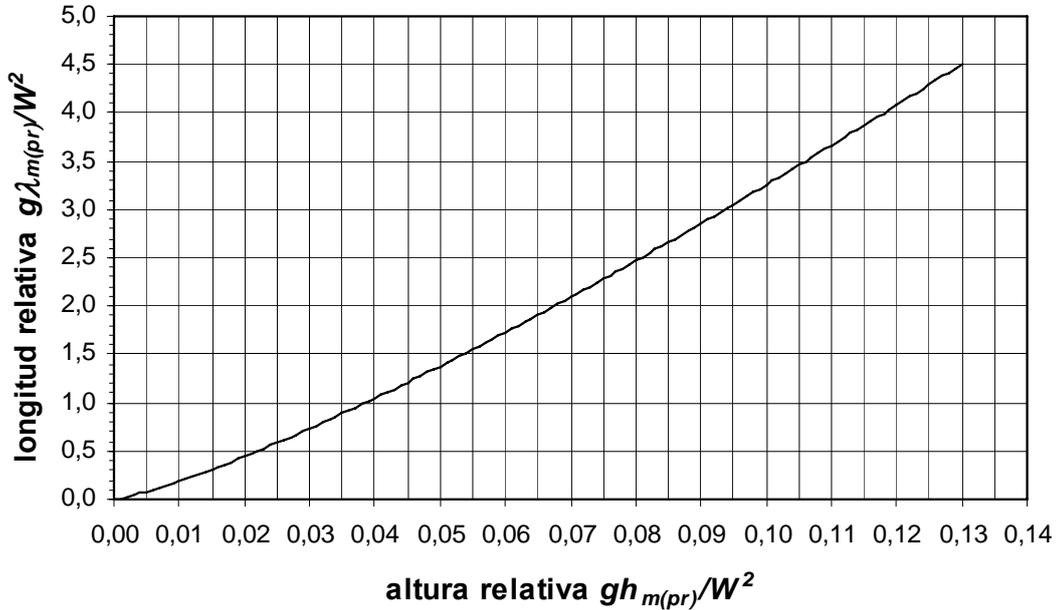


Figura 6 — Relación entre la longitud relativa  $g\lambda_{m(pr)}/W^2$  y la altura relativa  $gh_{m(pr)}/W^2$  de la ola media (50%) en aguas profundas

Tabla 7 — Longitud relativa de la ola media en aguas profundas  $g\lambda_{m(pr)}/W^2$ , según el fetch relativo  $gF/W^2$  (empléese únicamente si  $F \leq WT_w/2000$ ) ( $\lambda_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_w$  en s,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )

$gF/W^2$	$g\lambda_{m(pr)}/W^2$										
		0,0010	0,026	0,010	0,097	0,10	0,386	1,0	1,220	10	3,070
		0,0015	0,032	0,015	0,125	0,15	0,481	1,5	1,457	15	3,544
		0,0020	0,038	0,020	0,149	0,20	0,560	2,0	1,645	20	3,912
		0,0025	0,043	0,025	0,171	0,25	0,629	2,5	1,804	25	4,217
		0,0030	0,047	0,030	0,191	0,30	0,690	3,0	1,942	30	4,480
		0,0035	0,052	0,035	0,210	0,35	0,745	3,5	2,065		
		0,0040	0,056	0,040	0,227	0,40	0,795	4,0	2,177		
		0,0045	0,060	0,045	0,243	0,45	0,842	4,5	2,279		
0,00050	0,016	0,0050	0,064	0,050	0,259	0,50	0,886	5,0	2,373		
0,00055	0,017	0,0055	0,067	0,055	0,274	0,55	0,927	5,5	2,461		
0,00060	0,018	0,0060	0,071	0,060	0,288	0,60	0,966	6,0	2,543		
0,00065	0,019	0,0065	0,074	0,065	0,302	0,65	1,003	6,5	2,621		
0,00070	0,020	0,0070	0,078	0,070	0,315	0,70	1,038	7,0	2,694		
0,00075	0,021	0,0075	0,081	0,075	0,328	0,75	1,071	7,5	2,764		
0,00080	0,022	0,0080	0,085	0,080	0,340	0,80	1,103	8,0	2,831		
0,00085	0,023	0,0085	0,088	0,085	0,352	0,85	1,134	8,5	2,894		
0,00090	0,024	0,0090	0,091	0,090	0,363	0,90	1,164	9,0	2,955		
0,00095	0,025	0,0095	0,094	0,095	0,375	0,95	1,192	9,5	3,014		

**Tabla 8 — Longitud relativa de la ola media en aguas profundas  $g\lambda_{m(pr)}/W^2$ , según la duración relativa del viento  $gT_w/W$  (empléese únicamente si  $F > WT_w/2000$ ) ( $\lambda_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_w$  en s,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )**

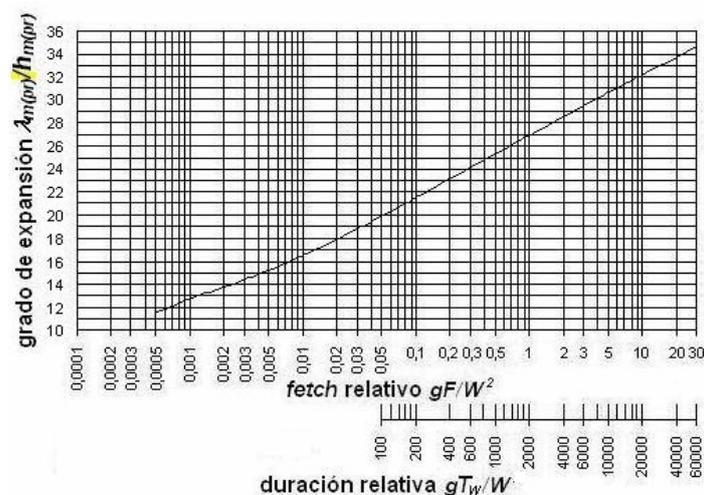
$gT_w/W$	$g\lambda_{m(pr)}/W^2$	$gT_w/W$	$g\lambda_{m(pr)}/W^2$	$gT_w/W$	$g\lambda_{m(pr)}/W^2$
100	0,259	1000	0,886	10000	2,373
150	0,328	1500	1,071	15000	2,764
200	0,386	2000	1,220	20000	3,070
250	0,436	2500	1,346	25000	3,325
300	0,481	3000	1,457	30000	3,544
350	0,522	3500	1,556	35000	3,738
400	0,560	4000	1,645	40000	3,912
450	0,596	4500	1,728	45000	4,071
500	0,629	5000	1,804	50000	4,217
550	0,660	5500	1,875	55000	4,353
600	0,690	6000	1,942	60000	4,480
650	0,718	6500	2,005		
700	0,745	7000	2,065		
750	0,771	7500	2,122		
800	0,795	8000	2,177		
850	0,819	8500	2,229		
900	0,842	9000	2,279		
950	0,864	9500	2,327		

#### 8.4 Determinación del grado de expansión de la ola media en aguas profundas

De la expresión (6) se puede obtener otra para el grado de expansión de la ola media en aguas profundas  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$ , necesario en varias aplicaciones:

$$\frac{\lambda_{m(pr)}}{h_{m(pr)}} = 56,55 \left( \frac{gh_{m(pr)}}{W^2} \right)^{0,24} \quad (7)$$

Combinando este resultado con las relaciones anteriores se han confeccionado el gráfico de la Figura 7 y las Tablas 9 y 10, que describen y cuantifican la dependencia entre este parámetro y los argumentos  $gF/W^2$  y  $gT_w/W$ , que se emplearán del modo definido anteriormente.



**Figura 7 — Grado de expansión  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$  de las olas medias (50%) en aguas profundas**

**Tabla 9 — Grado de expansión  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas, según el fetch relativo  $gF/W^2$  (empléese únicamente si  $F \leq WT_W/2000$ ) ( $\lambda_{m(pr)}$  en m,  $h_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_W$  en s,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )**

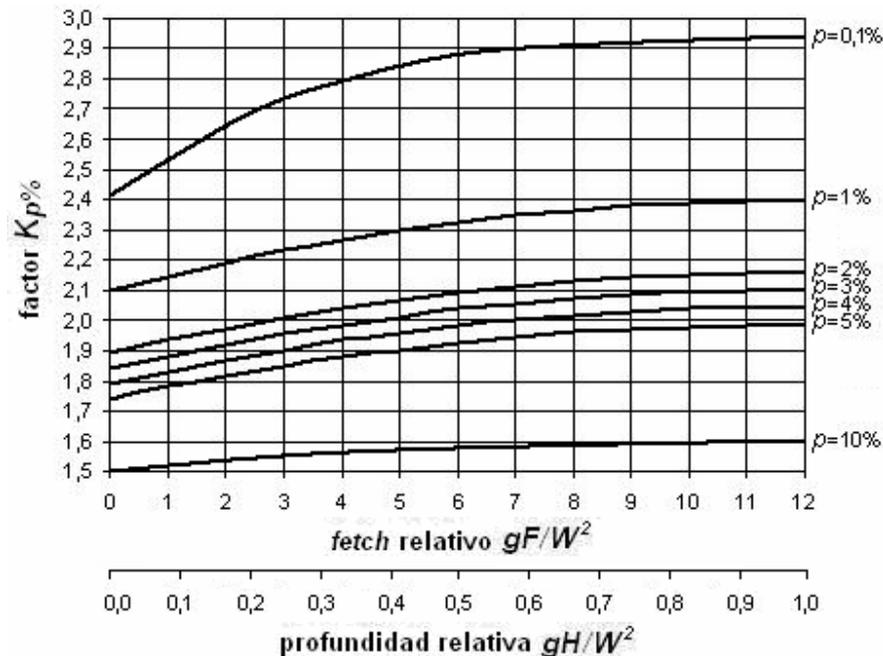
$gF/W^2$	$\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$										
		0,0010	12,74	0,010	16,49	0,10	21,53	1,0	26,91	10	33,08
		0,0015	13,32	0,015	17,31	0,15	22,48	1,5	27,85	15	33,72
		0,0020	13,74	0,020	17,91	0,20	23,15	2,0	28,52	20	34,22
		0,0025	14,07	0,025	18,39	0,25	23,67	2,5	29,03	25	34,62
		0,0030	14,35	0,030	18,79	0,30	24,10	3,0	29,45	30	33,08
		0,0035	14,60	0,035	19,14	0,35	24,46	3,5	29,80		
		0,0040	14,82	0,040	19,44	0,40	24,78	4,0	30,10		
		0,0045	15,01	0,045	19,70	0,45	25,05	4,5	30,37		
0,00050	11,59	0,0050	15,20	0,050	19,94	0,50	25,30	5,0	30,61		
0,00055	11,77	0,0055	15,36	0,055	20,16	0,55	25,52	5,5	30,83		
0,00060	11,93	0,0060	15,52	0,060	20,36	0,60	25,72	6,0	31,03		
0,00065	12,07	0,0065	15,67	0,065	20,54	0,65	25,91	6,5	31,21		
0,00070	12,20	0,0070	15,80	0,070	20,71	0,70	26,08	7,0	31,37		
0,00075	12,31	0,0075	15,93	0,075	20,87	0,75	26,24	7,5	31,53		
0,00080	12,41	0,0080	16,05	0,080	21,02	0,80	26,39	8,0	31,67		
0,00085	12,50	0,0085	16,17	0,085	21,16	0,85	26,54	8,5	31,81		
0,00090	12,59	0,0090	16,28	0,090	21,29	0,90	26,67	9,0	31,94		
0,00095	12,67	0,0095	16,38	0,095	21,42	0,95	26,79	9,5	32,06		

**Tabla 10 — Grado de expansión de la ola media en aguas profundas  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$ , según la duración relativa del viento  $gT_W/W$  (empléese únicamente si  $F > WT_W/2000$ ) ( $\lambda_{m(pr)}$  en m,  $h_{m(pr)}$  en m,  $F$  en km,  $W$  en m/s,  $T_W$  en s,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ )**

$gT_W/W$	$\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$	$gT_W/W$	$\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$	$gT_W/W$	$\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$
100	19,94	1000	25,30	10000	30,61
150	20,87	1500	26,24	15000	31,53
200	21,53	2000	26,91	20000	32,18
250	22,05	2500	27,43	25000	32,68
300	22,48	3000	27,85	30000	33,08
350	22,84	3500	28,21	35000	33,43
400	23,15	4000	28,52	40000	33,72
450	23,43	4500	28,79	45000	33,98
500	23,67	5000	29,03	50000	34,22
550	23,90	5500	29,25	55000	34,43
600	24,10	6000	29,45	60000	34,62
650	24,29	6500	29,63		
700	24,46	7000	29,80		
750	24,62	7500	29,96		
800	24,78	8000	30,10		
850	24,92	8500	30,24		
900	25,05	9000	30,37		
950	25,18	9500	30,50		

**8.5 Determinación de la altura de las olas de distintas probabilidades en aguas profundas**

La altura  $h_{p\%(pr)}$  (en m) de las olas que se forman con una probabilidad dada  $p$  (en %) en un tren de olas en aguas profundas, se obtiene multiplicando la altura  $h_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas obtenida anteriormente por el factor de probabilidad  $K_{p\%}$ . El valor de este factor se determina con los valores  $p$  (en %) de la probabilidad y del fetch relativo  $gF/W^2$ , por el gráfico de la Figura 8.



**Figura 8 — Factor de probabilidad  $K_{p\%}$  de la altura de las olas**  
(en aguas profundas: según el *fetch* relativo; en aguas poco profundas: según el *fetch* relativo o la profundidad relativa)

En el relevante caso de probabilidad  $p=1\%$ , la variación del factor  $K_{1\%}$  con el *fetch* relativo  $gF/W^2$  se puede expresar mediante el ajuste:

$$\text{si } \frac{gF}{W^2} \leq 12: \quad K_{1\%} = 2,1 + 0,05 \left( \frac{gF}{W^2} \right) - 0,0021 \left( \frac{gF}{W^2} \right)^2 \quad (8)$$

$$\text{si } \frac{gF}{W^2} \geq 12: \quad K_{1\%} = 2,40 = \text{const} \quad (9)$$

mientras que con otras probabilidades de interés práctico comprendidas entre  $p=2\%$  y  $p=5\%$  la relación de probabilidad  $R_{p\%} = K_{p\%}/K_{1\%}$  entre los factores correspondientes a las mismas y a  $p=1\%$  se expresa como:

$$R_{p\%} = 0,90 - 0,02375(p\% - 2\%) \quad (10)$$

La mitad izquierda de la Tabla 11 se ha confeccionado con estas dependencias.

Como se verá más adelante, en otras circunstancias se requiere hacer similar determinación usando como argumento el valor relativo  $gH/W^2$  de la profundidad  $H$  del embalse. La relación entre el coeficiente  $K_{1\%}$  y este otro argumento se indica también en el gráfico de la Figura 8, se deduce del ajuste formado por las expresiones (8) y (9) y resulta igual a:

$$\text{si } \frac{gH}{W^2} \leq 1,0: \quad K_{1\%} = 2,1 + 0,6 \left( \frac{gH}{W^2} \right) - 0,3024 \left( \frac{gH}{W^2} \right)^2 \quad (11)$$

$$\text{si } \frac{gH}{W^2} \geq 1,0: \quad K_{1\%} = 2,40 = \text{const} \quad (12)$$

Empleando estas fórmulas y la variación establecida para la relación de proporcionalidad  $R_{p\%}$ , se ha confeccionado la mitad inferior de la Tabla 11.

**Tabla 11 — Factor de probabilidad  $K_{p\%}$  de la altura de las olas, según el fetch relativo  $gF/W^2$  (mitad superior) y según la profundidad relativa  $gH/W^2$  (mitad inferior)**

Fetch relativo $gF/W^2$	Probabilidad $p$ (en %)				
	1%	2%	3%	4%	5%
	Relación de probabilidad $R_{p\%}$				
	1	0,900	0,876	0,853	0,829
0	2,10	1,89	1,84	1,79	1,74
1	2,15	1,93	1,88	1,83	1,78
2	2,19	1,97	1,92	1,87	1,82
3	2,23	2,01	1,96	1,90	1,85
4	2,27	2,04	1,99	1,93	1,88
5	2,30	2,07	2,01	1,96	1,90
6	2,32	2,09	2,04	1,98	1,93
7	2,35	2,11	2,06	2,00	1,95
8	2,37	2,13	2,07	2,02	1,96
9	2,38	2,14	2,09	2,03	1,97
10	2,39	2,15	2,09	2,04	1,98
11	2,40	2,16	2,10	2,04	1,99
$\geq 12$	2,40	2,16	2,10	2,04	1,99

Profundidad relativa $gH/W^2$	Probabilidad $p$ (en %)				
	1%	2%	3%	4%	5%
	Relación de probabilidad $R_{p\%}$				
	1	0,900	0,876	0,853	0,829
0,0	2,10	1,89	1,84	1,79	1,74
0,1	2,16	1,94	1,89	1,84	1,79
0,2	2,21	1,99	1,93	1,88	1,83
0,3	2,25	2,03	1,97	1,92	1,87
0,4	2,29	2,06	2,01	1,95	1,90
0,5	2,32	2,09	2,04	1,98	1,93
0,6	2,35	2,12	2,06	2,00	1,95
0,7	2,37	2,13	2,08	2,02	1,97
0,8	2,39	2,15	2,09	2,03	1,98
0,9	2,40	2,16	2,10	2,04	1,98
$\geq 1,0$	2,40	2,16	2,10	2,04	1,99

### 8.6 Determinación de la altura de la cresta de las olas en aguas profundas

Para diseñar obras de protección de las márgenes, llevar a cabo cálculos estructurales y otros fines, se requiere conocer adicionalmente la altura  $\eta_{cr}$  que alcanzará la cresta de la ola (en m), es decir, la elevación de su punto más alto sobre el nivel del agua (ver la Figura 1). El valor relativo  $\eta_{cr}/h_{p\%}$  de este parámetro se establece en general con el gráfico de la Figura 9 en función del cociente  $h_{p\%}/g\tau_m^2$  y de la profundidad relativa  $H/\lambda_{m(pr)}$ , donde la profundidad  $H$  se ha referido a la longitud  $\lambda_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas determinada anteriormente. En el caso de aguas profundas que se ha venido analizando hasta aquí, en el gráfico se adopta el valor extremo  $H/\lambda_{m(pr)}=0,5$ , al tiempo que en el cociente  $h_{p\%}/g\tau_m^2$  el período  $\tau_m$  representa el de la ola media en aguas profundas, es decir,  $\tau_m=\tau_{m(pr)}$ , que deberá determinarse con el ajuste

(4) a partir de la velocidad  $W$  de cálculo y del valor conocido de la altura  $h_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas.

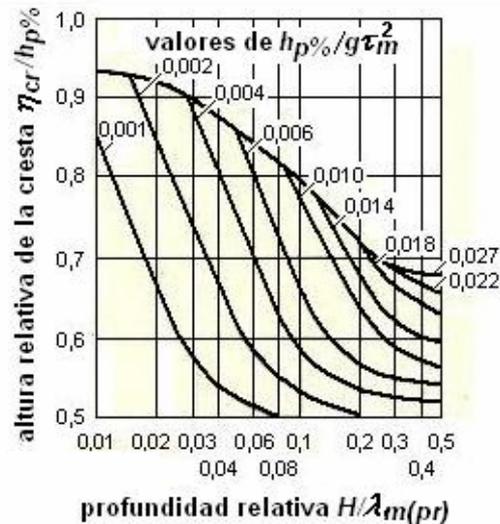


Figura 9 — Altura relativa  $\eta_{cr}/h_{p\%}$  de la cresta de la ola

### 8.7 Determinación de los parámetros del oleaje en aguas poco profundas

Como ya se indicó, la ola de cálculo se forma en condiciones de aguas profundas si la relación entre la profundidad del agua en el embalse y la longitud de la ola media en aguas profundas cumple la desigualdad  $H/\lambda_{m(pr)} > 0,5$ . Luego de establecer por las fórmulas (5) o (6), por el gráfico de la Figura 6 o por medio de las Tablas 7 u 8 el valor de esa longitud, se puede determinar el valor real de dicha relación. En el caso en que se obtenga la desigualdad contraria  $H/\lambda_{m(pr)} \leq 0,5$  se considerará que las olas se desarrollan en condiciones de aguas poco profundas, en las cuales la cercanía del lecho del embalse influye en el comportamiento y en los parámetros del oleaje.

En esas otras circunstancias los valores relativos de la altura  $h_m$  y de la longitud  $\lambda_m$  de la ola media se determinan también del gráfico de la Figura 5, pero empleando ahora para ello la familia de curvas de trazo fino, es decir, tanto con los valores del fetch relativo  $gF/W^2$  (o de la duración relativa del viento  $gT_w/W$ , según se explicó antes) como con los de la profundidad relativa  $gH/W^2$ , tras lo cual el valor que se alcance para la altura de la ola media en estas otras condiciones se empleará para determinar su período  $\tau_m$  por la fórmula (4), y si se desea, para precisar su longitud con las expresiones (5) o (6) o el gráfico de la Figura 6. De forma similar, para obtener en este caso la altura  $h_{p\%}$  (en m) de la ola de probabilidad  $p$  (en %), el valor  $h_m$  calculado anteriormente se multiplica por el factor de probabilidad  $K_{p\%}$  del gráfico de la Figura 8, aunque en este caso el valor de dicho factor se toma como el menor de los que se obtengan al entrar independientemente con los valores del fetch relativo  $gF/W^2$  y de la profundidad relativa  $gH/W^2$  en los ejes horizontales que se indican en el gráfico.<sup>(6)</sup> Estas determinaciones se pueden llevar a efecto con más precisión empleando los ajustes (8) y (9) u (11) y (12), o los valores contenidos en la Tabla 11.

Es importante hacer notar que en el gráfico de la Figura 5 el comportamiento de las curvas de la familia que describe las condiciones de aguas poco profundas dicta límites muy precisos a la altura máxima posible de la ola media en esas condiciones, toda vez que cada una de dichas curvas crece sólo hasta un punto a partir del cual se estabiliza para adoptar un valor constante que define en el eje vertical un valor límite de la altura relativa de la ola media. Así por ejemplo, si la velocidad de cálculo del viento es de  $W=20$  m/s, la curva con

<sup>(6)</sup> El análisis del gráfico de la Figura 8 evidencia que el empleo del argumento  $gF/W^2$  deberá sustituirse por el del argumento  $gH/W^2$  en los casos en que se cumpla la condición  $F/H > 12$  (con  $F$  en km y  $H$  en m), lo que resulta posible únicamente en contados casos de embalses de gran longitud o de aguas muy someras.

$gHW^2=0,4$ , que representa un embalse donde la profundidad es de  $H=16,31$  m, limita la altura relativa de la ola media a  $gh_m/W^2=0,044$ , lo que implica que en ningún caso su altura podrá ser mayor de  $h_m=1,79$  m.

En aguas poco profundas la altura  $\eta_{cr}$  que alcanzará la cresta de la ola de probabilidad  $p$  y altura  $h_{p\%}$  se determina también por el gráfico de la Figura 9, entrando en el mismo con el valor dado de la profundidad relativa  $H/\lambda_{m(pr)} < 0,5$  y con el cociente  $h_{p\%}/g\tau_m^2$  que se obtenga a partir del período  $\tau_m$  de la ola media en aguas poco profundas, determinado previamente por el ajuste (4) al sustituir en el mismo el valor de la altura  $h_m$  de la ola media en aguas poco profundas que se haya establecido para este otro caso.

## 9 Determinación del bordo libre y de las cotas de corona y de coronación

### 9.1 Determinación del bordo libre

El valor  $[BL]$  (en m) del bordo libre necesario para garantizar la protección de la presa contra el oleaje debe ser el mayor que resulte al comparar los que se obtengan con los distintos niveles representativos de cálculo del agua en el embalse, y se expresa en general como la suma:

$$[BL] = \Delta H + h_{trep1\%} + a \quad (13)$$

donde

$\Delta H$  es la sobreelevación por empuje (en m) que adquiere el nivel del agua sobre el talud de aguas arriba de la presa bajo la acción sostenida del viento;

$h_{trep1\%}$  es la altura de trepado de la ola (en m) que con una probabilidad de 1% se alcanzará por encima del nivel modificado por la sobreelevación por empuje;

$a$  es el sobrebordo o reserva de seguridad de la coronación de la presa (en m), medido a partir del nivel alcanzado por el trepado de la ola.

#### 9.1.1 Determinación de la sobreelevación por empuje

En ausencia de valores medidos *in situ*, la sobreelevación por empuje  $\Delta H$  (en m) se determina aproximadamente, sin tomar en cuenta la configuración en planta del embalse ni la de su lecho, por la fórmula:

$$\Delta H = k_w \frac{W^2 F \cos \theta}{g(H + \Delta H)} \quad (14)$$

donde

$W$  es la velocidad de cálculo del viento sobre la superficie del agua (en m/s), que se toma de la Tabla 4;

$F$  es el recorrido o *fetch* de cálculo de la ola (en km), que entre otros factores depende de la configuración del embalse, como fue definido y ejemplificado en 7.1 y 7.2;

$\theta$  es el ángulo que forman en planta la línea de acción del *fetch* central en el embalse y la perpendicular a la cortina en el punto de cálculo;

$g$  es la aceleración en caída libre (igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$ );

$H$  es la profundidad del agua en el embalse (en m), en ausencia de viento;

$k_w$  es un coeficiente (adimensional) que depende de la velocidad de cálculo del viento y del grado de expansión de la ola, pero que en la práctica se puede tomar aproximadamente igual a 0,002.

La fórmula implícita (14) se resuelve por tanteo o iteración, o modificándola para alcanzar la solución explícita:

$$\Delta H = 0,5 \left( \sqrt{1 + 4 \frac{(\Delta H)_o}{H}} - 1 \right) H \quad (15)$$

donde  $(\Delta H)_o$  representa el valor de la sobreelevación  $\Delta H$  cuando la misma es mucho menor que la profundidad  $H$  y se determina (en m) como:

$$(\Delta H)_o = k_w \frac{W^2 F \cos \theta}{g H} \quad (16)$$

### 9.1.2 Determinación de la altura de trepado de las olas

El valor de cálculo de la altura de trepado de la ola se toma como  $h_{trep1\%}$ , es decir, como la que ocurrirá con una probabilidad de superación de 1%, y se obtiene con el siguiente método teórico experimental, según el cual, si se cumple la desigualdad  $H \geq 3h_{1\%(pr)}$ , donde  $h_{1\%(pr)}$  es la altura (en m) de la ola que se forma en condiciones de aguas profundas con una probabilidad  $p$  de 1%, determinada como se expuso anteriormente, las olas regulares que se produzcan con cualquier profundidad relativa del embalse y con una probabilidad  $p$  (en %) ascenderán sobre el talud hasta alcanzar una altura de trepado  $h_{trep1\%}$  de probabilidad 1% igual al producto:

$$h_{trep1\%} = k_W k_\theta k_{ola} k_{cor} k_\Delta k_{imper} h_{p\%} \quad (17)$$

En esta expresión de cálculo:

$h_{p\%}$  es la altura (en m) de la ola que se forma con una probabilidad  $p$  (en %), determinada como se expuso en el acápite 8.5 en el caso de aguas profundas y 8.7 en el de aguas poco profundas;

$k_W$  es un coeficiente (adimensional) que depende de la velocidad  $W$  de cálculo del viento (en m/s) y del coeficiente (adimensional) de inclinación del talud de la presa, o cotangente trigonométrica del ángulo que éste forma con la horizontal, y se determina por la Tabla 12 (con velocidades intermedias  $W$  el valor de  $k_W$  se puede calcular por interpolación);

**Tabla 12 — Coeficiente  $k_W$**

Velocidad $W$ (en m/s)	$m=0,4$	$m=0,4-2$	$m=3-5$	$m>5$
$\leq 10$	1,1	1,1	1,1	1,2
$\geq 20$	1,3	1,4	1,5	1,6

$k_\theta$  es un coeficiente (adimensional) que depende del ángulo  $\theta$  entre la línea de acción del *fetch* central en el embalse y la perpendicular a la cortina en el punto de cálculo, y se determina por la Tabla 13 en función del valor (en grados) de dicho ángulo;

Tabla 13 — Coeficiente  $k_\theta$

Ángulo $\theta$ (en grados)	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Coeficiente $k_\theta$ (adim.)	1	0,98	0,96	0,92	0,87	0,82	0,76

$k_{ola}$  es un coeficiente (adimensional) que toma en cuenta la interacción entre la extensión relativa de la ola incidente  $\lambda_{m(pr)}/h_{1\%(pr)}$  (medida con la longitud  $\lambda_{m(pr)}$  de la ola media en aguas profundas y la altura  $h_{1\%(pr)}$  de la ola de probabilidad  $p=1\%$  en aguas profundas, determinadas como se expuso anteriormente) y el coeficiente de inclinación del talud; el valor de  $k_{ola}$  se toma del gráfico de la Figura 10, donde si se satisface la desigualdad  $H > 2h_{1\%}$  se asignan a las curvas de la familia las extensiones relativas  $\lambda_{m(pr)}/h_{1\%(pr)}$  consignadas en la columna izquierda, y si se cumple que  $H \leq 2h_{1\%}$  se asignan los valores que se indican en la columna derecha, que representan las extensiones relativas que tienen lugar cuando  $H = 2h_{1\%}$ .<sup>(7)</sup>

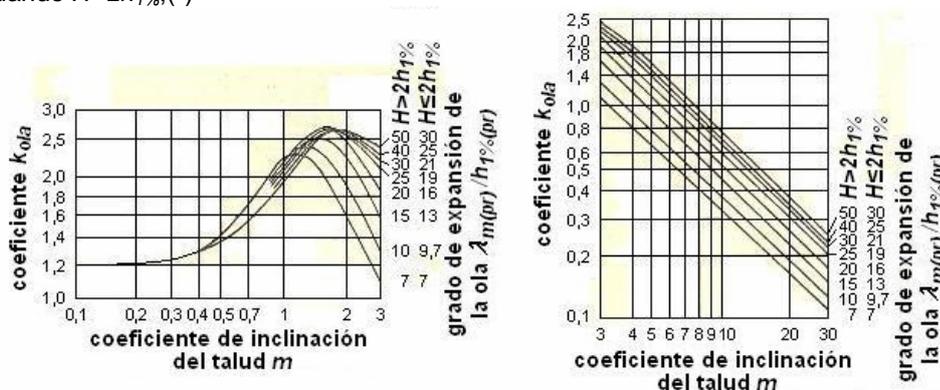


Figura 10 — Coeficiente de interacción  $k_{ola}$  entre la ola y el talud

$k_A$  es un coeficiente (adimensional) que depende de la rugosidad relativa  $\Delta/h_{1\%}$  del revestimiento del talud y que se establece por la Tabla 14;

$k_{imperme}$  es un coeficiente (adimensional) que depende de la impermeabilidad del revestimiento y caracteriza su capacidad para disipar en menor o mayor medida la energía con que irrumpen las olas sobre el talud; se establece también por la Tabla 14.

Tabla 14 — Coeficientes de rugosidad relativa  $k_A$  y de impermeabilidad  $k_{imperme}$  según el tipo de revestimiento del talud de aguas arriba

Tipo de revestimiento	Rugosidad relativa $\Delta/h_{1\%}$ (adim.)	Coeficiente $k_A$ (adim.)	Coeficiente $k_{imperme}$ (adim.)
1. Continuo, liso e impermeable	---	1,00	1,00
2. De hormigón o de hormigón armado fundido <i>in situ</i> o con losas prefabricadas, con juntas que no ocupen más del 5% de la superficie revestida	---	1,00	0,90
3. Con vegetación densa y de poca altura	---	0,95	0,90
4. Con escalones de hormigón	---	0,80 a 0,7	0,90
5. Permeable, con mezclas de grava, grava gruesa angulosa o redondeada, guijarros o cantos, con enrocamiento o con bloques de hormigón u hormigón armado con forma de cubos, paralelepípedos, tetrápodos, hexápodos u otras configuraciones	< 0,002	1,00	0,90
	0,005 a 0,01	0,95	0,85
	0,02	0,90	0,80
	0,05	0,80	0,70
	0,1	0,75	0,60
	> 0,2	0,70 y menor	0,50 y menor

<sup>(7)</sup> El amplio rango de valores del coeficiente  $m$  de inclinación del talud incluido en el gráfico de la Figura 10 se explica por la conveniencia de contar con una caracterización extensa del coeficiente de interacción  $k_{ola}$ , que permita abordar otras aplicaciones, entre ellas la realización de cálculos estructurales.

**Notas:**

1. En el revestimiento con mezclas de gravas, guijarros o cantos, o con rocas, el valor  $\Delta$  de la rugosidad se establece como el diámetro medio (en m) de los elementos que lo conformen; en el revestimiento con bloques de hormigón o de hormigón armado el valor de  $\Delta$  se establece como la dimensión característica (en m) de estos elementos, que depende de su configuración.
2. En el revestimiento con enrocamiento el coeficiente de rugosidad relativa  $k_{\Delta}$  se determina con el diámetro medio  $\Delta$  de la capa superior y el coeficiente de impermeabilidad  $k_{imper}$  se determina con el diámetro medio  $\Delta$  del material del colchón de asiento.

En la práctica, en ocasiones resulta más sencillo sustituir en la fórmula (17) el producto de los coeficientes de rugosidad relativa  $k_{\Delta}$  y de impermeabilidad  $k_{imper}$  por un coeficiente generalizado de rugosidad  $k_{rug}$ :

$$k_{rug} = k_{\Delta} k_{imper} \quad (18)$$

y tomar para este último los valores que se han condensado en la Tabla 15.

**Tabla 15 — Coeficiente de rugosidad  $k_{rug}$ , según el tipo de revestimiento del talud de aguas arriba**

Tipo de revestimiento	Coeficiente $k_{rug}$ (adim.)
Plástico, geotextil, asfalto	1,00
Hormigón u hormigón armado	0,90
Vegetación densa y corta	0,85
Escalones	0,70 a 0,60
Roca acomodada a mano	0,80
Roca semiacomodada	0,65
Roca sin acomodar	0,55
Bloques de hormigón	0,50 y menor

$k_{cor}$  es un coeficiente que toma en cuenta el tipo de coronación de la presa: si la corona es simple, sin parapeto, como en muchas de las fotos incluidas en el Anexo A, se adoptará  $k_{cor}=1$ , mientras que si está equipada con un parapeto y el cálculo demuestra que al trepar por el talud la ola llegará a impactar contra el mismo, la altura de trepado se incrementará en 10% o en 5% haciendo  $k_{cor}=1,10$  si el parapeto es simplemente recto como en la Figura A.3 o  $k_{cor}=1,05$  si se remata con un voladizo para desviar la ola como en la Figura A.12, al tiempo que si la corona cuenta con un parapeto de paramento curvo diseñado para reorientar la ola hacia aguas arriba, como en la Figura A.13, se adoptará también  $k_{cor}=1$ .<sup>(8)</sup>

Como se especificó al exponer la expresión de cálculo (18), tanto la determinación de la cota de coronación de la presa como el diseño del revestimiento de su talud de aguas arriba se llevarán a cabo con una altura de trepado de cálculo igual a  $h_{trep1\%}$ , es decir, la que se producirá con una probabilidad de 1%. Al mismo tiempo, para determinar este valor, en la expresión se adoptará como altura  $h_{p\%}$  de la ola el que resulte de aplicar la probabilidad que se obtenga de la Tabla 16, en dependencia de la categoría de la presa y del tipo de revestimiento del talud. Los valores  $h_{p\%}$  de las alturas de las olas de probabilidades  $p$  iguales a 1%, 2% ó 3% se establecen con los métodos del acápite 8.

<sup>(8)</sup> En presencia de un parapeto, además, la cota de coronación necesaria se precisará con los métodos que se exponen en la NC 972-3, siempre que los mismos arrojen un resultado mayor que el que se obtenga al aplicar la fórmula (13).

**Tabla 16 — Probabilidad  $p$  de la altura de ola para los cálculos del trepado, según la categoría de la presa y el tipo de revestimiento del talud de aguas arriba**

Categoría de la presa	Tipo de revestimiento del talud, según la Tabla 14	
	1, 2, 3 (hormigón y similares)	4, 5 (enrocado y similares)
I, II	1%	2%
III, IV	2%	3%

Cuando con el arribo de olas de probabilidad  $p$  (en %) se requiera conocer las alturas de trepado  $h_{trep\%}$  que se producirán con una probabilidad de superación distinta de 1%, sus valores se obtendrán multiplicando la altura de trepado  $h_{trep1\%}$  que se obtenga con la fórmula (18) por el factor de probabilidad de la altura de trepado  $K_{trep\%}$  de la Tabla 17.

**Tabla 17 — Factor de probabilidad de la altura de trepado  $K_{trep\%}$**

Probabilidad de trepado (en %)	0,1%	1%	2%	5%	10%	30%	50%
Coficiente $K_{trep\%}$	1,10	1,00	0,96	0,91	0,86	0,76	0,68

### 9.1.3 Determinación del sobrebordo o reserva de seguridad

*El sobrebordo o reserva de seguridad a se mide por encima del nivel alcanzado por el trepado de la ola y se adopta (en m) por la Tabla 18, según la categoría de la presa y el nivel representativo de cálculo del agua en el embalse. El término se introduce para prevenir, entre otras circunstancias, que la avenida real supere a la supuesta, que el aliviadero (y la obra de toma) no funcionen como se espera, que la acción del oleaje sea más severa que la adoptada en los cálculos, que la presa experimente asentamientos exagerados o que ocurra la conjunción de dos o más de estos u otros factores, así como para contrarrestar las incertidumbres presentes en los datos de entrada y en los métodos empleados en los cálculos.*

### 9.2 Determinación de las cotas de corona y de coronación

El mayor valor que se obtenga al sumar los niveles representativos de cálculo del agua en el embalse y los bordos libres correspondientes a los mismos, determina la combinación más desventajosa y se adoptará como la cota de coronación de la presa, que en las presas sin parapeto será al mismo tiempo la cota de la corona y en las presas equipadas con un parapeto representará la cota del borde superior de este último. En las presas con parapeto, además, con independencia de la cota de coronación, la cota de la corona deberá sobrepasar en no menos de 0,50 m la del nivel NAN de aguas normales y no podrá ser inferior a la del nivel NAM de aguas máximas.

**Tabla 18 — Sobrebordo o reserva  $a$  (en m), según la categoría de la presa y el nivel representativo de cálculo del agua en el embalse**

Categoría de la presa	Nivel representativo de cálculo			
	NAN	NAM	NC	NPMP
I	1,00	0,80	0,50	0,00
II	0,90	0,70	0,50	0,00
III	0,75	0,60	0,50	0,00
IV	0,60	0,50	0,50	0,00

Para interpretar adecuadamente la forma en que la Norma determina la cota de coronación, es imperativo que se reconozca la existencia de apreciables diferencias entre los requerimientos que se plantean a los bordos libres, y por lo tanto a las coronaciones, cuando para establecer sus valores se parte de distintos niveles característicos del agua en el embalse.

Así, cuando ese nivel es el de aguas normales NAN, que se debería establecer en el embalse si todos los factores se ajustaran de forma ideal a lo previsto durante el diseño de la presa, la coronación debería responder exclusivamente por la creación de la sobreelevación por empuje y de la altura de trepado de la ola que se formaría bajo el conjunto supuesto de condiciones meteorológicas, hidrológicas e hidráulicas, que lógicamente deberá ser el más severo y el que garantice la seguridad de la obra. No obstante, tomando en cuenta que por esa misma razón será éste el que entre todos los niveles de cálculo deberá permanecer por más tiempo fijo en el embalse, no se puede excluir, por ejemplo, que la aparición de un viento de severidad no prevista pueda amenazar con el rebose de la cortina, o incluso que ocurran fallos inesperados en el material de la corona que reduzcan su nivel en uno o más puntos o tramos de la misma. Estas previsiones adicionales se cuantifican adoptando los mayores valores del sobrebordo o reserva de seguridad, según se expresa en la Tabla 18.

Otro muy distinto es el caso en que el embalse recibe la avenida de la probabilidad de diseño y que por lo tanto alcanza momentáneamente un nivel de aguas máximas NAM que sea superior al anterior. Hay que admitir que en una presa cualquier vertimiento constituye en esencia una situación emergente, que eleva el agua en el embalse y extiende las inundaciones en sus márgenes; que incrementa el nivel freático de las zonas aledañas, a veces hasta distancias muy considerables; que entrega gastos de diversa magnitud al río y provoca eventuales desbordes de sus orillas y erosiones de su cauce que pueden llegar a ser severas y de costosa reparación; que da lugar a situaciones de riesgo en las obras que atraviesan la corriente o que se encuentran a los costados de la misma, y que determina otras numerosas afectaciones socioeconómicas y medioambientales de muy variada índole. El hecho mismo de que el surgimiento y desarrollo de estas circunstancias tan adversas haya sido previsto, obliga a limitar las previsiones adicionales en una medida mayor que en el caso anterior, confiando en que la obra se comportará como se espera de ella, es decir, que los aliviaderos y las obras de toma funcionarán según lo previsto y que por ejemplo, el oleaje tendrá lugar con los parámetros asumidos en el cálculo y al paso de una avenida que será realmente la de diseño, y no mayor. En estas circunstancias, según indica la Tabla 18, el sobrebordo o reserva puede ser menor que en el otro caso, y tiene la misión de neutralizar exclusivamente las consecuencias de alguna contingencia que aún así haya escapado al análisis del problema. Por último, la confluencia de condiciones tan peculiares como las que darán lugar a las avenidas capaces de provocar los niveles NC y NPMP de comprobación y de Precipitación Máxima Probable es tan extraordinaria, que sería irracional suponer que al mismo tiempo ese cúmulo de condiciones podrá enriquecerse aún más con la aparición de nuevos factores desfavorables como la formación de oleaje en el embalse.

De este modo, el procedimiento de determinación de la cota de coronación se sustenta en un balance ponderado de previsiones y riesgos en el cual el reforzamiento de las primeras va acompañado necesariamente de una introducción más atemperada de las medidas que puedan neutralizar la aparición de los segundos, y viceversa. Se considera que con esto se logrará que el resultado final descansa en bases racionales y que resulte suficientemente seguro.

**Anexo A**  
(informativo)

**EJEMPLOS DE REVESTIMIENTOS, CORONAS Y CORONACIONES DE PRESAS**

Las Figuras A.1 a A.13 ilustran revestimientos de presas del territorio cubano, que con independencia de los materiales utilizados para los mismos, se han combinado con coronas sin parapetos o con coronas con parapetos rectos, simples o con voladizo, o con parapetos curvos.



**Figura A.1 — Presa El Rancho, Prov. Pinar del Río. Revestimiento con asfalto de talud con  $m=2,5$ . Corona con parapeto recto.  $H_{presa}=30,30$  m;  $L_{presa}=0,59$  km**



**Figura A.2 — Presa El Mulo, Prov. Pinar del Río. Revestimiento con asfalto sobre enrocamiento de talud con  $m=3$ . Corona sin parapeto.  $H_{pres}= 29,00$  m;  $L_{presa}= 0,65$  km**



Figura A.3 — Presa Guamá, Prov. Pinar del Río. Revestimiento con hormigón fundido *in situ* de talud con  $m=3$ . Corona con parapeto recto.  $H_{presa}=29,00$  m;  $L_{presa}=2,35$  km



Figura A.4 — Presa Alacranes, Prov. Villa Clara. Revestimiento con losas prefabricadas de hormigón de talud con  $m=2,5$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=24,50$  m,  $L_{presa}=1,6$  km



Figura A.5 — Presa Capitán Tomás, Prov. Pinar del Río. Revestimiento con vegetación de talud con  $m=2,5$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=15,50$  m;  $L_{presa}=0,42$  km



Figura A.6 — Presa Mampostón, Prov. Mayabeque. Revestimiento escalonado de hormigón en el tramo superior del talud, con inclinación  $m=2,25$ .  $H_{presa}=37,00$  m;  $L_{presa}=3,34$  km



Figura A.7 — Presa Hidráulica Cubana, Prov. Camagüey. Revestimiento con piedras de talud con  $m=3$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=23,00$  m;  $L_{presa}=0,53$  km



Figura A.8 — Presa Corojo, Prov. Granma. Revestimiento con piedras y rajón de talud con  $m=2,25$ . Corona con parapeto recto.  $H_{presa}=39,60$  m;  $L_{presa}=1,20$  km



Figura A.9 — Presa La Jía, Prov. Camagüey. Revestimiento con rajón de talud con  $m=3$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=14,50$  m;  $L_{presa}=2,81$  km



Figura A.10 — Presa La Fe, Mun. Isla de la Juventud. Revestimiento con enrocamiento de talud con  $m=3$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=22,13$  m;  $L_{presa}=2,22$  km

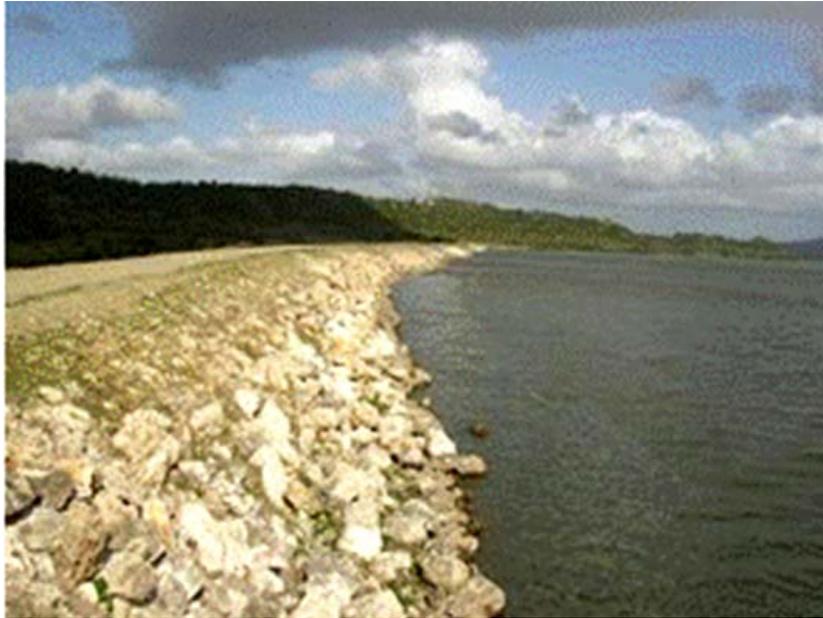


Figura A.11 — Presa Chambas II, Prov. Ciego de Ávila. Revestimiento con enrocamiento de talud con  $m=2$ . Corona sin parapeto.  $H_{presa}=23,00$  m;  $L_{presa}=2,40$  km



Figura A.12 (izquierda) — Presa Pinillos, Prov. Mayabeque. Revestimiento con enrocamiento de talud con  $m=2,75$ . Corona con parapeto recto con voladizo.  $H_{presa}=20$  m;  $L_{presa}=1,02$  km

Figura A.13 — Presa Caunavaco, Prov. Mayabeque. Revestimiento con enrocamiento de talud con  $m=2,5$ . Corona con parapeto de paramento curvo.  $H_{presa}=35,20$  m;  $L_{presa}=0,57$  km

Adicionalmente, la Figura A.14 muestra algunos de los bloques incluidos también dentro del tipo de revestimiento 5 de la Tabla A.1. Estas configuraciones han sido desarrolladas por firmas japonesas y poseen propiedades específicas de tamaño, peso y estabilidad. Así, la más sencilla entre ellas, el hexápodo *Hexaleg*, consta de seis apoyos idénticos unidos simétricamente en un núcleo central cúbico, por lo que con un peso específico volumétrico de 2,3 ton/m<sup>3</sup> su peso *P* (en ton), la longitud característica *d* (en m) de cada apoyo y el lado *e* (en m) de su sección transversal se relacionan como  $P=2,3(6e^2d+e^3)$ . Estandarizando la razón geométrica  $s=e/d$ , con esta expresión se llega a una fórmula:

$$d = \frac{0,758}{\sqrt[3]{s^2(6+s)}} \sqrt[3]{P} \quad (19)$$

que como muestra la Tabla 19 permite establecer en cada caso la longitud que garantiza el peso requerido de los elementos, que se empalman de diferentes formas o se arrojan simplemente sobre el talud sin acomodarlos, lo que hace variar la impermeabilidad y la estabilidad del mismo.

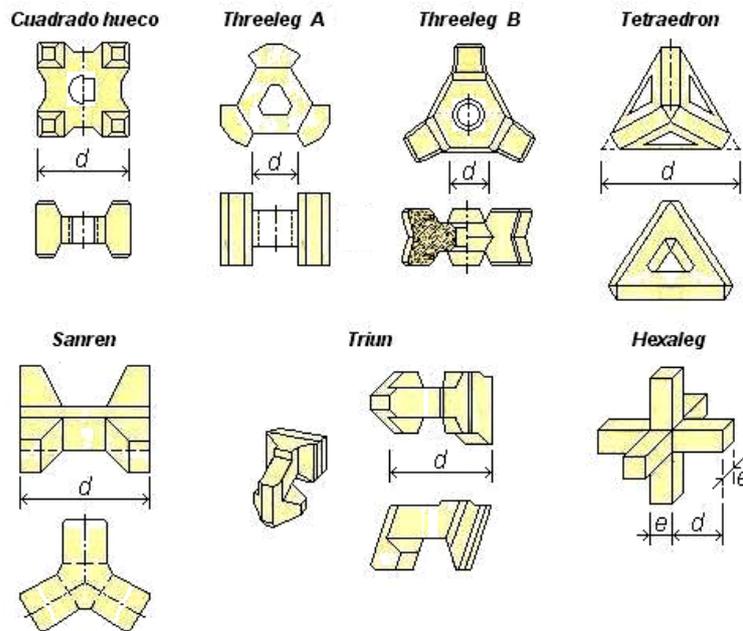


Figura 24 — Algunos tipos de bloques de revestimiento

Tabla A.1 — Parámetros característicos de los hexápodos *Hexaleg*

$s=e/d=1/1$		$s=e/d=4/5$		$s=e/d=2/3$		$s=e/d=1/2$		$s=e/d=4/9$			
<i>P</i> ton	<i>d</i> m										
0,43	0,30	5,50	0,70	0,86	0,44	1,00	0,53	1,30	0,70	1,50	0,80
0,69	0,35	8,25	0,80					1,90	0,80		
1,00	0,40	11,7	0,90					3,70	1,00		
2,00	0,50	16,1	1,00					10,2	1,40		
3,50	0,60	21,4	1,10								

**Anexo B**  
(informativo)

**Ejemplos de aplicación**

**B.1 Ejemplo N° 1**

El embalse de la Figura 3, que en 7.1 sirvió para ejemplificar un embalse de configuración simple, tiene su lecho en la cota 80,85 msnm. Su cortina se construirá con arcilla arenosa sobre un suelo no rocoso y con un coeficiente de inclinación  $m=3$  del talud de aguas arriba, que durante una valoración preliminar se ha previsto proteger con losas prefabricadas de hormigón. Por su altura y la calidad de su cimentación la presa es de categoría III, y los tránsitos de las avenidas de diseño y comprobación, con probabilidades de 5% y 1%, han mostrado que su evacuación por el aliviadero automático, de moderadas dimensiones y con la cresta al nivel NAN de aguas normales de 93,80 msnm, provocará un nivel NAM de aguas máximas de 96,90 msnm y un nivel NC de comprobación de 97,40 msnm. Por otra parte, la evacuación de la avenida correspondiente a la Precipitación Máxima Probable dará lugar a que en el embalse se alcance un nivel NPMP de 99,15 msnm. Se ha decidido someter a revisión el diseño preliminar, para lo cual se requiere calcular los parámetros del oleaje y de la coronación, contrastar la variante de revestimiento del talud con losas de hormigón con otra alternativa de enrocamiento, así como valorar las consecuencias de construir un parapeto sobre la corona de la presa.

Para proceder al análisis, la Tabla 4 estipula que el establecimiento del nivel NAM de aguas máximas en el embalse simple de esta presa de categoría III irá acompañado de una velocidad de circulación del viento igual a  $W_c=20$  m/s, al tiempo que según se expuso en el acápite 7.1, el *fetch* de cálculo debe tomarse igual al máximo, y con el nivel NAM toma el valor  $F=F_{max}=7,22$  km (ver la Figura 3). Como al mismo tiempo el embalse se orienta hacia el SO, el esquema de la Figura 2 establece que la trayectoria del ciclón se suponga orientada hacia el NO y por lo tanto, que sobre el embalse no actúe ninguna componente debida a su velocidad de traslación. En estas condiciones el viento total de cálculo se tomará con una velocidad igual a la de circulación con ese nivel característico y los cálculos se realizarán con  $W=W_c=20$  m/s.

La altura de la ola media en aguas profundas se determina con el *fetch* relativo, que toma el valor  $gF/W^2=0,177$ , o con la duración relativa del viento de cálculo, que con  $T_w=10800$  s (3 h) es igual a  $gT_w/W=5297$ . Ya que en el gráfico de la Figura 5 la abscisa del primer argumento se localiza a la izquierda de la abscisa del segundo, la altura relativa de la ola media en aguas profundas se determina con el primer argumento y en la curva superior conduce a  $gh_{m(pr)}/W^2=0,023$ , un valor que se puede confirmar con la Tabla 5 y que en la fórmula (4) conduce al valor  $g\tau_{m(pr)}/W=1,818$  para el período relativo. Al mismo tiempo, con ese *fetch* relativo, el gráfico arroja en el eje vertical izquierdo una longitud relativa de la ola media en aguas profundas igual a  $g\lambda_{m(pr)}/W^2=0,52$ , que se puede confirmar a partir de la Tabla 7 con el *fetch* relativo o entrando en la fórmula (6) o en el gráfico de la Figura 6 con la altura relativa obtenida anteriormente. Los valores absolutos de los tres parámetros resultan entonces iguales a  $h_{m(pr)}=0,94$  m,  $\tau_{m(pr)}=3,71$  s y  $\lambda_{m(pr)}=21,20$  m, y los dos primeros determinan que el grado de expansión de la ola sea de  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}=22,55$ , como se obtiene también si para ello se emplean la fórmula (7), el gráfico de la Figura 7 o la Tabla 9.

Puesto que la profundidad del embalse con el nivel NAM de aguas máximas es igual a  $H=96,90-80,85=16,05$  m, el cociente  $H/\lambda_{m(pr)}=16,05/21,20=0,76$  indica que con ese nivel característico el mismo se comporta efectivamente como un embalse de aguas profundas, y que los parámetros del oleaje que se determinaron anteriormente deben ser los que se empleen para los cálculos subsiguientes.

Así, para calcular la cota necesaria de coronación de la presa la sobreelevación por empuje se puede establecer con la velocidad  $W=20$  m/s y el *fetch*  $F=7,22$  km, mientras que de la Figura 3 se desprende que el ángulo que forma la línea de acción del *fetch* de cálculo con la perpendicular a la cortina es  $\theta=0^\circ$ , por lo que en (14) se tiene que  $\cos\theta=1$ . Con estos valores, con la profundidad  $H=16,05$  m del embalse y con un coeficiente  $k_\omega=0,002$ , la expresión (16) permite hallar un valor auxiliar de cálculo igual a  $(\Delta H)_o=0,04$  m, que sustituido en la solución explícita (15) conduce a una sobreelevación por empuje prácticamente igual, es decir, de tan sólo  $\Delta H=0,04$  m.

En cuanto a la altura de trepado, su cálculo con el producto (17) requiere determinar ante todo la altura  $h_{p\%(pr)}$  de la ola (en este caso, de aguas profundas) que se producirá con la probabilidad  $p$  asociada al revestimiento que se utilice para proteger el talud de la presa. En el diseño preliminar se previó ejecutar ese revestimiento con losas de hormigón, por lo que dada la categoría III de la presa la Tabla 16 determina un valor  $p=2\%$ , por lo que la altura  $h_{m(pr)}=0,94$  m de la ola media (de 50% de probabilidad) establecida anteriormente se debe multiplicar por el factor de probabilidad  $K_{2\%}$  correspondiente, que se puede leer en el gráfico de la Figura 8, calcular con los ajustes que lo describen o tomar de la Tabla 11 en función del *fetch* relativo  $gF/W^2=0,177$  que se calculó anteriormente. Así, del mencionado gráfico se obtiene un valor  $K_{2\%}\approx 1,9$ , lo que se confirma plenamente con las fórmulas (8) y (10), que arrojan  $K_{1\%}=2,11$  y  $R_{2\%}=0,90$ , de donde  $K_{2\%}=0,90*2,11=1,90$ . La altura buscada es entonces igual a  $h_{2\%(pr)}=K_{2\%}h_{m(pr)}=1,90*0,94=1,79$  m.

En la fórmula (17) para la altura de trepado figuran además los siguientes coeficientes:

- $k_W=1,5$  : de la Tabla 12, con  $W=20$  m/s y con el coeficiente de inclinación del talud  $m=3$ ;
- $k_\theta=1$  : de la Tabla 13, con el ángulo  $\theta=0^\circ$  que ya se determinó antes;
- $k_{o/a}=1,4$  : del gráfico de la Figura 10, donde el coeficiente de inclinación del talud es  $m=3$ , la altura de la ola de 1% se halla como  $h_{1\%(pr)}=K_{1\%}h_{m(pr)}=2,11*0,94=1,98$  m y con la longitud  $\lambda_{m(pr)}=21,20$  m de la ola media en aguas profundas conduce a la razón de expansión  $\lambda_{m(pr)}/h_{1\%(pr)}=21,20/1,98=10,71$ , y la relación  $H/h_{1\%(pr)}=16,05/1,98=8,11$  es mayor que 2, por lo que las curvas del gráfico responden a las razones de expansión que se relacionan en la columna izquierda de las dos que muestran los valores de este factor;
- $k_{cor}=1,00$  : ya que en la variante preliminar que se analiza no se contempla la construcción de un parapeto en la corona de la presa;
- $k_{rug}=0,90$  : que se puede tomar directamente de la Tabla 15 para el revestimiento con losas previsto, o establecer como el producto de los coeficientes de rugosidad relativa  $k_A=1$  y de impermeabilidad  $k_{imper}=0,90$  que en la Tabla 14 corresponden a este tipo de revestimiento.

Llevando estos valores a (17), la altura de trepado de cálculo, que tiene una probabilidad de ocurrencia de 1%, resulta igual a  $h_{trep1\%}=1,5*1*1,4*1,00*0,90*1,79=3,38$  m. Por último, el sobrecorrido o reserva de seguridad se obtiene de la Tabla 18 con la categoría III de esta presa y con el nivel NAM de aguas máximas que aquí se analiza, y resulta igual a  $a=0,60$  m.

Sumando finalmente en (13) los valores  $\Delta H=0,04$  m,  $h_{trep1\%}=3,38$  m y  $a=0,60$  m hallados de esta manera, se concluye que si en el embalse se forma el nivel NAM de aguas máximas de 96,90 msnm, la protección de la presa contra el oleaje quedará garantizada si el bordo libre es igual a  $[BL]=4,06$  m, o lo que es igual, si la coronación de la presa (que en este caso está constituida únicamente por la corona, ya que no incluye un parapeto) se localiza en la cota 100,96 msnm. Esto implica que la presa se deberá construir con 100,96-80,85=20,11 m de altura.

Junto a lo anterior, la altura de cálculo  $h_{2\%(pr)}=1,79$  m de la ola de probabilidad  $p=2\%$ , la profundidad relativa  $H/\lambda_{m(pr)}=0,76$  y el cociente  $h_{p\%}/g\tau_m^2 = h_{2\%(pr)}/g\tau_{m(pr)}^2 = 0,013$  que se obtiene con el período  $\tau_m = \tau_{m(pr)} = 3,71$  s de la ola media en aguas profundas que ya se calculó antes, permiten establecer con el gráfico de la Figura 9 que en este caso la cresta de la ola tendrá una altura relativa  $\eta_{cr}/h_{2\%(pr)}=0,59$  (que en condiciones de aguas profundas se obtiene asumiendo en el gráfico que  $H/\lambda_{m(pr)}=0,5$ ) y por lo tanto una altura que en valor absoluto será igual a  $\eta_{cr}=0,59*1,79=1,06$  m. Esto significa que la parte superior de la ola será 44% mayor que la parte inferior (ver la Figura 1) y que el punto más alto de la misma se elevará a esa altura sobre la superficie del agua en el embalse y alcanzará un nivel de  $NAM+\Delta H+\eta_{cr}=96,90+0,04+1,06=98,00$  msnm, en lo que se refleja también la influencia (muy pequeña en este caso) del empuje por sobre elevación. Comparando este resultado con los que se obtengan con otros casos de cálculo y otras probabilidades de olas, se puede llegar a conclusiones de valor práctico para la protección de puntos o tramos determinados que se localicen en las márgenes del embalse.

Antes de seguir adelante, resulta de interés sopesar las consecuencias que acarreará mantener el revestimiento con losas, pero equipar al mismo tiempo la presa con un parapeto, que aquí se considerará de perfil recto rematado por un corto voladizo para rechazar la ola, como en el ejemplo de la Figura A.12. Como quedó claro en el acápite 9.1.2, de incorporar este elemento la altura de trepado aumentará en 5%, es decir, a  $h_{trep1\%}=1,05*3,38=3,55$  m, por lo que el bordo libre se incrementará a  $[BL]=4,19$  m y se requerirá una coronación algo mayor, de 101,09 msnm (ver nota <sup>(8)</sup> al pie de página en el texto principal). No obstante, la protección que brinda la presencia del parapeto hará posible que la cota de la corona se reduzca, en principio, hasta la cota 96,90 msnm del nivel NAM de aguas máximas (o hasta una cota que supere en no menos de 0,50 m la del nivel NAN de aguas normales, que en este caso será mucho menor e igual a  $93,80+0,50=94,30$  msnm). Esto significa entonces que si el parapeto se construye, por ejemplo, con 1,50 m de altura, que es usualmente la altura máxima que se adopta para los mismos, la corona se podrá ubicar en la cota  $101,09-1,50=99,59$  msnm y la altura del terraplén de la presa resultará disminuida a  $99,59-80,85=18,74$  m, que es 1,37 m menor que en la anterior variante sin parapeto.

Para satisfacer los alcances del análisis solicitado en el ejemplo, los cálculos anteriores se deben llevar a cabo considerando que el revestimiento de losas será sustituido por otro con enrocamiento sin acomodar. Como ya se expuso en el acápite 9.1.2, el procedimiento de la Norma estipula que en ese caso la probabilidad de la altura de ola que se emplee para calcular el trepado se adopte, como indica la Tabla 16, igual a  $p=3\%$ . Entonces, dado que antes se estableció el valor  $K_{1\%}=2,11$  para el factor de probabilidad de 1%, y que según (10) la relación de probabilidad es ahora de  $R_{3\%}=K_{3\%}/K_{1\%}=0,876$ , se llega al factor de 3%  $K_{3\%}=0,876*2,11=1,85$  y a la nueva altura  $h_{3\%(pr)}=K_{3\%}h_{m(pr)}=1,85*0,94=1,74$  m para la ola de cálculo de 3% de probabilidad en aguas profundas.

Como se concluye fácilmente, en el producto (17) para la altura de trepado los coeficientes  $k_W$ ,  $k_\theta$ ,  $k_{ola}$  y  $k_{cor}$  conservan los mismos valores que en los dos casos anteriores, pero el coeficiente de rugosidad toma ahora, según la Tabla 15, un valor aproximado  $k_{rug}\approx 0,55$ , que se deberá precisar oportunamente después que se proceda al diseño del revestimiento y se establezca su diámetro medio, hallando su rugosidad relativa  $\Delta/h_{1\%(pr)}$  y tomando por lo tanto de la Tabla 14 los valores del coeficiente de rugosidad relativa  $k_\Delta$  y del coeficiente de impermeabilidad  $k_{imper}$  que correspondan a dicho diseño,

Con estos cambios, la altura de trepado de cálculo, con una probabilidad de ocurrencia de 1%, se reduce en (17) a  $h_{trep1\%}=1,5*1*1,4*1,00*0,55*1,74=2,01$  m (que es el 59% de la altura de trepado anterior de 3,38 m y la reduce en 1,37 m), el bordo libre queda igual a  $[BL]=2,65$  m y la coronación necesaria resulta igual a 99,55 msnm, lo que ahora supone una presa con  $99,55-80,85=18,70$  m de altura.

Por último, si este revestimiento con enrocado sin acomodar se complementa además con la incorporación de un parapeto recto con voladizo, la altura de trepado que se acaba de determinar se incrementará en 5% y será de  $h_{trep1\%}=1,05*2,01=2,11$  m, el bordo libre y la coronación se elevarán a 2,75 m y a 99,65 msnm, pero como ya se argumentó, la cota de la corona se podrá reducir, con un parapeto de 1,50 m de altura, a 98,15 msnm, de modo que la altura del terraplén de la presa resultará disminuido a 17,30 m, es decir, en 1,40 m adicionalmente.

Los parámetros y resultados fundamentales del análisis anterior se han llevado a la Tabla B.1 y evidencian que en lo tocante a la altura de la cortina de la presa, el tránsito de la solución inicial con losas de hormigón y corona simple sin parapeto, a la alternativa que contempla la combinación de un revestimiento con enrocamiento a volteo y la colocación de un parapeto sobre la corona, representa una reducción de  $20,11-17,30=2,81$  m en la altura necesaria del terraplén.

No debe olvidarse, sin embargo, que el caso de nivel representativo NAM de aguas máximas analizado hasta aquí no constituye necesariamente la situación más desventajosa, y que las consecuencias que acarree el mismo deben compararse en todos los casos con las que surgirán como consecuencia de la formación de otros niveles representativos, en este caso el de aguas normales NAN, inferior al anterior, y el

de comprobación normada NC, mayor que estos dos,<sup>(9)</sup> así como del nivel NPMP que se creará en el embalse si en la cuenca del río que lo alimenta se repite un evento como el de la Precipitación Máxima Probable para la localidad en cuestión.

Por ello la Tabla B.1 recoge los parámetros y resultados a que se llega en esos otros casos. En particular, con la formación del nivel NAN de aguas normales, que en este embalse se localiza en la cota 93,80 msnm, la Tabla 4 y las consideraciones asociadas a la misma determinan una velocidad de cálculo de 40 m/s que duplica la de los cálculos anteriores, mientras que en el plano del embalse, en la Figura 3, se puede medir un *fetch* de 7,05 km que es sólo ligeramente menor que el anterior por lo escarpado de la margen donde ambos se originan. Por otro lado, en estas circunstancias la profundidad del agua en el embalse se reduce a 12,95 m y como evidencian los cálculos el embalse pasa a comportarse como de aguas poco profundas.<sup>(10)</sup> Con estas sustanciales modificaciones, la aplicación del procedimiento conduce finalmente a que en todas las alternativas contempladas, es decir, con revestimiento con losas o con enrocamiento, combinado o no con la construcción de un parapeto recto con voladizo sobre la corona, la cota de coronación necesaria que se desprende de la formación en el embalse de ese nivel NAN no supera la que corresponde al caso de formación del nivel de aguas máximas.

Por último, como muestra también la tabla, si bien los niveles NC y NPMP son superiores al nivel NAM que se producirá con la evacuación de la avenida de diseño, los requerimientos que se expusieron y argumentaron anteriormente con respecto al tratamiento diferenciado de uno y otro caso de cálculo hacen que con ninguno de estos otros dos niveles se precise la adopción en la presa de una cota mayor de coronación que en la situación con ese nivel NAM de aguas máximas.

Esto permite concluir que en este diseño los análisis subsiguientes del problema podrán limitarse exclusivamente a los resultados obtenidos en el caso con NAM, y que la elección de la combinación más ventajosa del tipo de revestimiento y el tipo de coronación deberá basarse en la comparación técnico económica de las alternativas que se identificaron anteriormente.

**Tabla B.1 — Ejemplo N° 1: Parámetros principales del oleaje y de la coronación, según el nivel representativo del agua en el embalse, el tipo de revestimiento y el tipo de coronación**

Lecho del embalse: 80.85 msnm; configuración del embalse: simple; orientación: SO; categoría de la presa: III; coeficiente de inclinación del talud de aguas arriba:  $m=3$ ; ángulo entre el *fetch* central y la presa:  $\theta=0^\circ$  ( $\cos\theta=1$ ).

Parámetros y resultados	NAN 93,80 msnm				NAM 96,90 msnm				NC 97,40 msnm	NPMP 99,15 msnm
	Con losas		Con enrocamiento		Con losas		Con enrocamiento			
	Sin parapeto	Con parapeto	Sin parapeto	Con parapeto	Sin parapeto	Con parapeto	Sin parapeto	Con parapeto		
$W$ (m/s)	40				20				0	0
$F$ (km)	7,05				7,22				---	---
$H$ (m)	12,95				16,05				16,55	18,30
$EP^{(9)}$	X				X				---	---
$EPP^{(9)}$	X				X				---	---
$\Delta H$ (m)	0,18				0,04				0	0
$h_{1\%}$ (m)	3,09				1,98				0	0
$h_{2\%}$ (m)	2,78		---		1,79		---		0	0
$h_{3\%}$ (m)	---		2,72		---		1,74		0	0

<sup>(9)</sup> Con el empleo más frecuente de aliviaderos automáticos, como en este ejemplo, los niveles de aguas máximas serán siempre superiores a los de aguas normales, pero con la construcción y operación apropiada de aliviaderos con compuertas se logra en muchos casos reducir apreciablemente y hasta eliminar la diferencia entre ambos niveles, e incluso entre los niveles de comprobación y los dos anteriores. Esta particularidad no altera en modo alguno las consideraciones que se exponen en este ejemplo ni en el cuerpo de la Norma.

<sup>(10)</sup> En el Ejemplo N° 2 de B.2 se ilustrará en detalle la aplicación del procedimiento en los casos de embalses de aguas poco profundas.

$h_{rep1\%}$ (m)	4,88	5,12	2,92	3,07	3,38	3,55	2,01	2,11	0	0
$a$ (m)	0,75		0,75		0,60		0,60		0,50	0
$[BL]$ (m)	5,81	6,05	3,85	4,00	4,06	4,19	2,65	2,75	0,50	0
Cota de coronación (msnm)	99,61	99,85	97,65	97,80	100,96	101,09	99,55	99,65	97,90	99,15
Altura de parapeto (m)	---	1,50	---	1,50	---	1,50	---	1,50	---	---
Cota de corona (msnm)	99,61	98,35	97,65	96,30	100,96	99,59	99,55	98,15	---	---
Altura de presa (m)	18,76	17,50	16,80	15,45	20,11	18,74	18,70	17,30	---	---

<sup>(1)</sup> EP: embalse profundo; EPP: embalse poco profundo.

## B.2 Ejemplo N° 2

El embalse de la Figura 4 permitió ilustrar en 7.2 un caso de configuración compleja y tiene su lecho en la cota 24,40 msnm y un nivel NAN de aguas normales que se elevará a la cota 34,85 msnm. Se formará ante una cortina con una longitud algo mayor de 1300 m, que se cimentará en un suelo no rocoso, se construirá con arcilla y espaldones de rocoso y cuyo talud de aguas arriba, con un coeficiente de inclinación  $m=2,5$ , se ha decidido revestir con enrocamiento sin acomodar, ya que se cuenta con el material necesario para esto a poca distancia del cierre. Por razones de economía, además, la corona se equipará con un parapeto de paramento curvo. La presa se levantará aguas arriba de importantes asentamientos poblacionales y objetivos económicos, por lo que a pesar de su poca altura se considera de categoría II. Por esta razón, los cálculos de transformación de las avenidas con probabilidades de 0,5% y 0,1% de diseño y de comprobación han arrojado que su evacuación por el aliviadero automático que se construirá junto a la cortina provocará un nivel NAM de aguas máximas de 36,80 msnm y un nivel NC de comprobación de 38,60 msnm. Al mismo tiempo, a los análisis se ha incorporado el nivel NPMP de Precipitación Máxima Probable de 39,45 msnm que se creará en el embalse al paso de la avenida con que la cuenca tributaria responderá a precipitaciones de excepcional intensidad que igualen las de un evento histórico registrado en la zona de su emplazamiento.

### Caso de cálculo con nivel NAN de aguas normales

Con la formación del nivel representativo NAN de aguas normales la Tabla 4 conduce a tomar la velocidad de circulación del viento de cálculo como  $W_C=40$  m/s, mientras según se expuso al ilustrar el ejemplo, en este embalse de configuración compleja, con ese nivel representativo, el *fetch* de cálculo es igual al equivalente  $F=F_{eq}=6,87$  km. Al mismo tiempo, ya que el embalse se orienta aproximadamente hacia el NNO, de acuerdo con el esquema de la Figura 2 el viento total de cálculo se debe tomar como la suma de los vientos de circulación y de traslación del ciclón para ese nivel característico. El viento de traslación es entonces  $W_T=0,1W_C=4$  m/s y el viento total de cálculo resulta igual a  $W=W_C+W_T=44$  m/s.

Para establecer la altura de la ola media en aguas profundas el *fetch* relativo toma el valor  $gF/W^2=0,035$  y la duración relativa, con  $T_W=14400$  s (4 h), es igual a  $gT_W/W=3210$ . Ya que en el gráfico de la Figura 5 el primero de estos dos argumentos se localiza a la izquierda del segundo, la altura relativa de la ola media en aguas profundas se determina con el valor del *fetch* relativo y en la curva de trazo grueso del gráfico se puede leer como  $gh_{m(pr)}/W^2=0,011$ , un valor que se confirma con la Tabla 5 y que en (4) conduce a un período relativo  $g\tau_{m(pr)}/W=1,151$ . Con el valor establecido para el *fetch* relativo, el mismo gráfico de la Figura 5 permite leer también en su eje vertical izquierdo el valor  $g\lambda_{m(pr)}/W^2=0,21$  de la longitud relativa de la ola media en aguas profundas, que se confirma con la Tabla 7 a partir del *fetch* relativo o con la fórmula (6) o el gráfico de la Figura 6, si a ellos se lleva la altura relativa obtenida anteriormente. Los resultados anteriores conducen a que los valores absolutos de estos tres parámetros sean iguales a  $h_{m(pr)}=2,17$  m,  $\tau_{m(pr)}=5,16$  s y  $\lambda_{m(pr)}=41,44$  m, y que el grado de expansión de la ola sea igual a  $\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}=19,10$ , como se puede calcular dividiendo un parámetro por el otro o empleando para ello la fórmula (7), el gráfico de la Figura 7 o la Tabla 9.

El cociente  $H/\lambda_{m(pr)}=10,45/41,44=0,25$  entre la profundidad  $H=10,45$  m del embalse con el nivel NAN de aguas normales de 34,85 msnm y la longitud de la ola media en aguas profundas establecida anteriormente, muestra sin embargo que con ese nivel característico en el embalse imperan las condiciones de aguas poco profundas, y que los anteriores parámetros del oleaje deben ser modificados con la consideración de este factor. Así, el *fetch* relativo  $gF/W^2=0,035$  establecido antes y la curva de profundidad relativa  $gH/W^2=0,053$  conducen en el gráfico de la Figura 5 a  $gh_m/W^2=0,0076$  y a  $g\lambda_m/W^2\approx 0,13$ , un valor que en (6) se precisa como  $g\lambda_m/W^2=0,133$ , y a establecer con la dependencia (4), haciendo  $h_{m(pr)}=h_m$ , que  $g\tau_m/W=0,915$ . Los parámetros de la ola media en aguas poco profundas quedan entonces modificados como  $h_m=1,50$  m,  $\tau_m=4,10$  s y  $\lambda_m=26,25$  m, con lo que el grado de expansión de la ola se reduce a  $\lambda_m/h_m=17,50$ . La altura obtenida para la ola media en las condiciones reales de aguas poco profundas que imperan en este embalse es, en particular, 31% inferior a la de 2,17 m obtenida bajo el supuesto de aguas profundas, lo que evidencia la importante influencia de este factor.

Para proceder al cálculo de la cota de coronación de la presa, en la fórmula (14) de la sobreelevación por empuje figuran los parámetros de cálculo  $W=44$  m/s y  $F=6,87$  km, mientras que en el plano de la Figura 4 se observa que el ángulo que forman el *fetch* central  $F_o$  y la perpendicular a la presa es aproximadamente igual a  $7,5^\circ$ , por lo que su coseno trigonométrico es  $\cos\theta=0,99$ . Llevando a (16) estos valores, así como la profundidad  $H=10,45$  m del embalse con el nivel característico NAN, el valor auxiliar de cálculo se obtiene como  $(\Delta H)_o=0,26$  m, y sustituido en la solución explícita (15) permite llegar a un valor final de  $\Delta H=0,25$  m para la sobreelevación por empuje.

El cálculo de la altura de trepado por el producto (17) implica ante todo la determinación de la altura  $h_{p\%}$  de la ola en aguas poco profundas de probabilidad  $p$  que se deberá emplear para encontrar la altura de trepado de cálculo, a partir de la altura  $h_m=1,50$  m de la ola media (de 50% de probabilidad) en aguas poco profundas que se halló anteriormente. Esto se puede hacer con el gráfico de la Figura 8, con los ajustes que lo describen o con la Tabla 11. La comparación entre el comportamiento relativo de los argumentos  $gF/W^2=0,035$  y  $gH/W^2=0,053$  cuantificados anteriormente evidencia que en este caso el primer factor es el dominante (ver nota <sup>(6)</sup> al pie de página), y dado que con la utilización de enrocamiento para revestir el talud la altura de trepado en esta presa de categoría II se debe establecer, según la Tabla 16, con una altura de ola de probabilidad  $p=2\%$ , se requiere conocer el factor de probabilidad  $K_{2\%}$ , que con el gráfico de la Figura 8 se puede estimar inicialmente como  $K_{2\%}\approx 1,9$ . Calculando con (8) y con (10) el factor de 1%, que resulta igual a  $K_{1\%}=2,10$ , y la relación de probabilidad  $R_{2\%}=K_{2\%}/K_{1\%}$ , que aquí es de 0,90, el estimado anterior se precisa como  $K_{2\%}=0,90*2,10=1,89$ , lo que conduce finalmente a la altura  $h_{2\%}=K_{2\%}h_m=1,89*1,50=2,84$  m para la ola de 2% de probabilidad, que en este caso se formará en aguas poco profundas.

Los coeficientes que en (17) acompañan al valor anterior resultan iguales a:

- $k_W=1,45$  : de la Tabla 12, con  $W=44$  m/s y el coeficiente de inclinación del talud  $m=2,5$ ;
- $k_\theta=0,99$  : de la Tabla 13, con el ángulo  $\theta=7,5^\circ$  que se estableció antes;
- $k_{ola}=1,41$  : al que se llega en el gráfico de la Figura 10 conociendo que el coeficiente de inclinación del talud es  $m=2,5$ ; utilizando la altura  $h_{m(pr)}=2,17$  m y el coeficiente  $K_{1\%}=2,10$  obtenidos antes, para hallar la altura  $h_{1\%(pr)}=K_{1\%}h_{m(pr)}=2,10*2,17=4,56$  m de la ola de 1% en aguas profundas<sup>(11)</sup> y con este valor y con la longitud  $\lambda_{m(pr)}=41,44$  m de la ola media en aguas profundas, determinar la razón de expansión  $\lambda_{m(pr)}/h_{1\%(pr)}=41,44/4,56=9,09$ ; y calculando la altura  $h_{1\%}=K_{1\%}h_m=2,10*1,50=3,15$  m para hallar la relación  $H/h_{1\%}=10,45/3,15=3,32$  y establecer que en este caso la misma es mayor que 2, por lo que a las curvas del gráfico se deben asignar las razones de expansión que se relacionan en la columna izquierda de las dos que aparecen unidas a este factor;
- $k_{cor}=1,00$  : ya que la corona se equipará con un parapeto de paramento curvo;

<sup>(11)</sup> Como resultado de interés (aunque innecesario para el cálculo en este caso particular), la altura de la ola de 2% en aguas profundas se puede determinar también como el producto de la altura  $h_{m(pr)}=2,17$  m de la ola media en aguas profundas y del factor de probabilidad de 2%  $K_{2\%}=1,89$  establecido antes, y resulta igual a  $h_{2\%(pr)}=4,10$  m.

$k_{rug}=0,55$  : que se puede tomar directamente de la Tabla 15 para el enrocamiento sin acomodar previsto, ya que en esta etapa del diseño aún no se han calculado las dimensiones ni otras características específicas del material que se empleará para el revestimiento.

Llevando estos valores a (17) se obtiene la altura de trepado de cálculo, de 1% de probabilidad, que es igual a  $h_{trep1\%}=1,45*0,99*1,41*1,00*0,55*2,84=3,16$  m. Al mismo tiempo, el sobrecorrido o reserva de seguridad se establece en la Tabla 18 con la categoría II de esta presa y con el nivel NAN de aguas normales que aquí se viene analizando, y resulta igual a  $a=0,90$  m.

Sustituyendo en (13) los sumandos  $\Delta H=0,25$  m,  $h_{trep1\%}=3,16$  m y  $a=0,90$  m, el bordo libre necesario para garantizar la protección de la presa contra el oleaje si en el embalse se forma el nivel NAN de aguas normales de 34,85 msnm es igual a  $[BL]=4,31$  m, por lo que se requiere que en este caso la cota de coronación (el borde del parapeto) sea de 39,16 msnm (ver nota <sup>(8)</sup> al pie de página en el texto principal).

Adicionalmente, dadas la altura  $h_{2\%}=2,84$  m de la ola de cálculo de probabilidad  $p=2\%$ , la profundidad relativa  $H/\lambda_{m(p)}=0,25$  y el cociente  $h_{p\%}/g\tau_m^2 = h_{2\%}/g\tau_m^2 = 0,017$ , donde  $\tau_m=4,10$  s es el período que se obtuvo antes junto con la altura de la ola media en aguas poco profundas, el gráfico de la Figura 9 permite establecer que en el caso analizado la altura relativa de la cresta de la ola resulta igual a  $\eta_c/h_{2\%}=0,67$ . Así, la parte superior de la ola doblará en altura a la parte inferior (ver la Figura 1) y su punto más alto se elevará  $\eta_c=0,67h_{2\%}=0,67*2,84=1,90$  m sobre la superficie y alcanzará en el embalse un nivel de  $34,85+\Delta H+\eta_c=34,85+0,25+1,90=37,00$  msnm, determinado también por los efectos del empuje por sobreelevación. Este resultado debe compararse con los que se obtengan en otros casos, para emplearlo si en algunos puntos o tramos de las márgenes del embalse se hace necesario construir obras de protección.

#### Caso de cálculo con nivel NAM de aguas máximas

Un proceso de cálculo totalmente análogo al expuesto permite demostrar que en este ejemplo, al determinar la cota de coronación a partir de la formación en el embalse del nivel NAM de aguas máximas de 36,80 msnm, dicha cota deberá ser de 40,06 msnm, 0,90 m más alta que en el caso anterior. Esto se hace más evidente con la Tabla B.2, que responde a un estudio comparativo entre los factores y resultados que caracterizan los distintos casos de cálculo y donde se observa, entre otros aspectos de interés, que con la reducción de la velocidad de cálculo del viento a 22 m/s y el aumento del *fetch* a 7,14 km, la altura y la longitud de la ola media en aguas profundas se reducen considerablemente a 1,04 m y 23,19 m, pero que en estas circunstancias la profundidad relativa del embalse se incrementa a  $H/\lambda_{m(p)}=0,53$  y éste pasa a comportarse como un embalse de aguas profundas, sin que su lecho ejerza ya ningún efecto de disipación en la energía de la ola y no pueda por lo tanto disminuir los parámetros del oleaje, como por el contrario ocurría en el caso anterior (lo que explica por qué en este segundo caso, en la tabla se hayan omitido muchos resultados de cálculos en los que participan parámetros ligados específicamente al comportamiento del oleaje en aguas poco profundas).

**Tabla B.2 — Ejemplo N° 2: Parámetros y características del oleaje y de la coronación, según el nivel representativo del agua en el embalse**

Lecho del embalse: 24,40 msnm; configuración del embalse: compleja; orientación: NNO; categoría de la presa: II; coeficiente de inclinación del talud de aguas arriba:  $m=2,5$ ; tipo de revestimiento: enrocamiento sin acomodar; tipo de coronación: con parapeto de paramento curvo; ángulo entre el fetch central y la presa:  $\theta=7,5^\circ$  ( $\cos\theta=0,99$ ).

N°	Parámetro o característica variable	Símbolo	u/m	NAN 34,85	NAM 36,80	NC 38,60	NPMP 39,45
1	Viento de circulación de cálculo	$W_C$	m/s	40	20	0	0
2	Viento de traslación de cálculo	$W_T$	m/s	4	2	0	0
3	Viento total de cálculo	$W$	m/s	44	22	0	0
4	Fetch (equivalente)	$F$	km	6,87	7,14	--	--
5	Profundidad del embalse	$H$	m	10,45	12,40	14,20	15,05
6	Duración del viento total de cálculo	$T_W$	s	14400	10800	0	0
7	Fetch relativo	$gF/W^2$	-	0,035	0,145	--	--
8	Duración relativa del viento total de cálculo	$gT_W/W$	-	3210	4816	0	0
9	Altura relativa de la ola media en aguas profundas	$gh_{m(pr)}/W^2$	-	0,011	0,021	0	0
10	Período relativo de la ola media en aguas profundas	$g\tau_{m(pr)}/W$	-	1,151	1,718	0	0
11	Longitud relativa de la ola media en aguas profundas	$g\lambda_{m(pr)}/W^2$	-	0,21	0,47	0	0
12	Altura de la ola media en aguas profundas	$h_{m(pr)}$	m	2,17	1,04	0	0
13	Período de la ola media en aguas profundas	$\tau_{m(pr)}$	s	5,16	3,85	0	0
14	Longitud de la ola media en aguas profundas	$\lambda_{m(pr)}$	m	41,44	23,19	0	0
15	Grado de expansión de la ola media en aguas profundas	$\lambda_{m(pr)}/h_{m(pr)}$	-	19,10	22,30	0	0
16	Profundidad relativa característica del embalse	$H/\lambda_{m(pr)}$	-	0,25 <sup>(a)</sup>	0,53 <sup>(b)</sup>	--	--
17	Profundidad relativa de cálculo	$gH/W^2$	-	0,053	--	--	--
18	Altura relativa de la ola media en aguas poco profundas	$gh_m/W^2$	-	0,0076	--	0	0
19	Período relativo de la ola media en aguas poco profundas	$g\tau_m/W$	-	0,915	--	0	0
20	Longitud relativa de la ola media en aguas poco profundas	$g\lambda_m/W^2$	-	0,133	--	0	0
21	Altura de la ola media en aguas poco profundas	$h_m$	m	1,50	--	0	0
22	Período de la ola media en aguas poco profundas	$\tau_m$	s	4,10	--	0	0
23	Longitud de la ola media en aguas poco profundas	$\lambda_m$	m	26,25	--	0	0
24	Expansión de la ola media en aguas poco profundas	$\lambda_m/h_m$	-	17,50	--	0	0
25	Sobreelevación por empuje	$\Delta H$	m	0,25	0,06	0	0
26	Probabilidad de cálculo de la ola para la altura de trepado	$p$	%	2	2	--	--
27	Factor de probabilidad de 1%	$K_{1\%}$	-	2,10	2,11	--	--
28	Relación de probabilidad	$R_{2\%}$	-	0,90	0,90	--	--
29	Factor de probabilidad de 2%	$K_{2\%}$	-	1,89	1,90	--	--
30	Altura de la ola de 1% en aguas profundas	$h_{1\%(pr)}$	m	4,56	2,19	0	0
31	Altura de la ola de 2% en aguas profundas	$h_{2\%(pr)}$	m	4,10	1,98	0	0
32	Altura de la ola de 1% en aguas poco profundas	$h_{1\%}$	m	3,15	--	0	0
33	Altura de la ola de 2% en aguas poco profundas	$h_{2\%}$	m	2,84	--	0	0
34	Coefficiente dependiente de la velocidad $W$	$k_W$	-	1,45	1,45	--	--
35	Coefficiente dependiente del ángulo $\theta$	$k_\theta$	-	0,99	0,99	--	--
36	Razón de expansión para coeficiente de interacción	$\lambda_{m(pr)}/h_{1\%(pr)}$	-	9,09	10,59	0	0
37	Relación de profundidad para coeficiente de interacción	$H/h_{1\%(pr)}; H/h_{2\%(pr)}$	-	3,32	11,92	--	--
38	Coefficiente de interacción	$k_{ola}$	-	1,41	1,60	--	--
39	Coefficiente de forma de la coronación (con parapeto curvo)	$k_{cor}$	-	1,00	1,00	--	--
40	Coefficiente de rugosidad del revestimiento	$k_{rua}$	-	0,55	0,55	--	--
41	Altura de trepado de 1% de probabilidad	$h_{rep1\%}$	m	3,16	2,50	0	0
42	Sobrebordo o reserva de seguridad	$a$	m	0,90	0,70	0,50	0,00
43	Bordo libre	[BL]	m	4,31	3,26	0,50	0,00
44	Cota de coronación	--	msnm	39,16 <sup>(c)</sup>	40,06 <sup>(c)</sup>	39,10 <sup>(c)</sup>	39,45 <sup>(c)</sup>
45	Cota de corona	--	msnm	--	38,26	--	--
46	Altura de parapeto	--	m	--	1,80	--	--
47	Altura de presa	$H_{presa}$	m	--	13,86	--	--
48	Altura relativa de la cresta de la ola de 2%	$\eta_{cr}/h_{2\%}; \eta_{cr}/h_{2\%(pr)}$	-	0,67	0,60	0	0
49	Altura de cresta de la ola de 2%	$\eta_{cr}$	m	1,90	1,19	0	0
50	Cota del punto más alto de la ola en el embalse	---	msnm	37,00	38,05	--	--

<sup>(a)</sup> Como 0,25<0,50, el embalse es de aguas poco profundas; <sup>(b)</sup> Como 0,53>0,50, el embalse es de aguas profundas.

<sup>(c)</sup> El mayor de estos valores (40,06 msnm) determina la cota de coronación de la presa.

**Casos con nivel NC de comprobación y nivel NPMP de Precipitación Máxima Probable**

El análisis se ha extendido también a los casos de formación en el embalse del nivel NC normado de comprobación (con una probabilidad de 1% en esta presa de categoría II), así como del nivel NPMP al que llegará el agua si en la localidad se produjera un evento de Precipitación Máxima Probable caracterizado por registros históricos, el uso de envolventes y otros procedimientos. La Norma estipula que en ambos casos se acepte la ausencia de viento sobre el embalse, por lo que no existe sobreelevación por empuje ni altura de trepado, y que sólo en el caso con nivel NC de comprobación se prevea un sobrebordo o reserva de 0,50 m, que es el mínimo confirmado por la práctica.

Como se refleja en la Tabla B.2, en este ejemplo los niveles NC y NPMP de 38,60 msnm y 39,45 msnm requieren coronaciones de 39,10 msnm y 39,45 msnm que se localizan por debajo de la correspondiente al nivel NAM de aguas máximas, aunque al mismo tiempo el segundo y más alto de ellos supera los mayores niveles que alcanzarán las olas al formarse en el embalse en los casos con NAN y con NAM, que serán iguales a 37,00 msnm y 38,05 msnm, respectivamente. Por lo tanto, será dicho nivel de 39,45 msnm el que se adopte para diseñar las eventuales obras de protección a las que se hizo referencia antes, si se desea construirlas con la máxima garantía.

A la luz de los resultados anteriores, que como en el ejemplo anterior se alcanzan por la posibilidad que ofrece el procedimiento de la Norma de proceder a un análisis exhaustivo del comportamiento del oleaje y de los factores que concurren en el diseño de los revestimientos y de las coronaciones, se arriba finalmente a la conclusión de que en la presa de este segundo ejemplo la formación del nivel NAM de aguas máximas de 36,80 msnm constituye el caso más desventajoso, y que en consecuencia su coronación debe situarse en la cota 40,06 msnm. Como al mismo tiempo la Norma estipula que en las presas con parapeto la cota de la corona sobrepase en 0,50 m o más la del nivel NAN de aguas normales y no sea inferior a la del nivel NAM de aguas máximas, ambas restricciones se satisfarán en este caso si la corona se localiza en la cota 36,80 msnm del NAM, o por encima de este nivel. El análisis de alternativas apunta a la conveniencia de construir la cortina de esta presa con la corona en la cota 38,26 msnm, lo que implica adoptar un parapeto de 1,80 m de altura, algo mayor que la usual, y hará que la cortina alcance una altura máxima de 13,86 m.

## Bibliografía

- [1] *Álbum de Embalses Cubanos* (Colectivo de autores) (1988) Dirección de Ciencia y Técnica del Instituto de Hidroeconomía, La Habana.
- [2] Armas, R. y E. Horta (1987) *Presas de tierra*, Editorial ISPJAE, La Habana.
- [3] Batista, J. (2008) *Peligro, vulnerabilidad y riesgo ante fenómenos hidrometeorológicos extremos*, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana.
- [4] Battjes, J. (1974) *Wave run-up and overtopping*, La Haya.
- [5] Bogomolov, A. y K. Mijailov (1972) *Hidráulica*, Editorial Stroiizdat, Moscú.
- [6] Brea, J. *et al.* (1988) *Análisis comparativo de la acción de oleaje regular y aleatorio en protecciones de taludes*, Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 3, La Habana.
- [7] Camaño G., C. García y C. Dasso (2000) *Precipitación Máxima Probable de lapso variable para Córdoba, Argentina*, Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero, Argentina, junio.
- [8] Centella, A. *et al.* (1997) *Variaciones y cambios del clima en Cuba*, Informe Técnico, Instituto de Meteorología, La Habana.
- [9] Chugayev, R. (1982) *Hidráulica*, Editorial Energoizdat, Leningrado.
- [10] Creager, W., J. Justin y J. Hinds (1961) *Engineering for dams*, Instituto Cubano del Libro, La Habana, vol. II, pp.357-377.
- [11] *Cuba, Principales Embalses* (1992) Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- [12] *Design of Small Dams* (1987) Bureau of Reclamation, 3rd. edition, Washington D.C.
- [13] Díaz, A. (1986) *Algunas consideraciones sobre la instrucción cubana para el cálculo de los parámetros de la ola y revestimiento de los taludes en presas de tierra*, Revista Voluntad Hidráulica, Año 23, no. 72.
- [14] Domínguez, J. y L. Espinosa (2004) *Propuesta de sobreelevación de la presa Marte R. Gómez, Tamaulipas, México*, XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil.
- [15] *Embalses* (2008) Programa interactivo, Dirección de Obras Hidráulicas del INRH, La Habana.
- [16] *Embalses Cubanos* (1988) Colectivo de autores, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana.
- [17] Francisco F. y E. Velazco (2006) *Instrucciones generales para estudios de reevaluación hidrológica con vistas a la adaptación de aliviaderos bajo el impacto del cambio climático en Cuba*, Servicio Hidrológico Nacional, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana.
- [18] *Indicaciones para la proyección de obras hidráulicas sujetas a los efectos del oleaje* (1965), SN 288-62, Gosstroizdat.
- [19] *Instrucción para el cálculo de los parámetros de la ola y revestimiento de los taludes en presas de tierra* (1979) Dirección de Proyectos de Obras Hidráulicas del Ministerio de la Construcción, La Habana.
- [20] *Inventario Actualizado de Obras Hidráulicas* (2006) Dirección de Obras Hidráulicas del INRH.
- [21] IPCC (2001) *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, United Kingdom.
- [22] Kiseliyov, P. (1972) *Manual de cálculos hidráulicos*, Editorial Energía, Moscú.
- [23] Kojnover, F. (1973) *Acción de las olas en los taludes de las presas*, Revista Voluntad Hidráulica, Año X, no. 27.
- [24] Kozhevnikov, M. (1972) *Hidráulica de las olas producidas por el viento*, Editorial Energía, Moscú.
- [25] Labzovski, N. *Método para la determinación de los parámetros de la ola en un embalse*, Moscú.
- [26] Lappo, D. y G. Krasnozhon (1969) *Propuestas generalizadas para el cálculo de los parámetros de las olas producidas por el viento y sus efectos sobre las obras hidráulicas*, Trabajos de las Reuniones de Coordinación en Hidrotecnia, vol.50, Leningrado.
- [27] Loschakoff, C., J. Brea y R. Seoanne (2004) *Definición de las condiciones de diseño para una protección natural sometida a la acción del oleaje*, Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Brasil.
- [28] *Manual Práctico de Hidráulica, Tomo II* (1984) Instituto de Hidroeconomía, MICONS, La Habana.
- [29] Mesa O. y G. Poveda (1997) *Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmosphere processes*, Journal of Climate, no.10, pp.2690-2702.

- [30] Miedviedovski, V. (1971) *Investigación del proceso de interacción de las olas con las estructuras con taludes*, Tesis de Doctorado, Instituto de Aprovechamiento Hidráulico de Moscú.
- [31] Nedriga, V. (1983) *Construcciones hidrotécnicas, Manual de proyectos*, Editorial Stroiizdat, Moscú.
- [32] Nichiporovich, A. (1973) *Presas de materiales locales*, Editorial Stroiizdat, Moscú.
- [33] *Parámetros Principales de las Obras Hidráulicas en la Provincia Habana, Presas y Micropresas*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana.
- [34] Pérez Suárez, R. (2008) *Los cambios climáticos y los eventos meteorológicos extremos*, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana.
- [35] Pilarczyk, K. (1998) *Dikes and Revetments, Design, Maintenance and Safety*, Balkema, Róterdam.
- [36] *Presa. Cálculo de la ola de diseño para la protección del talud aguas arriba. Cálculo de la cota corona* (2006), Propuesta de Norma como Derogación de la NC.48-18 (1984), Centro de Investigaciones Hidráulicas, ISPJAE, La Habana, mayo.
- [37] *Presa. Cálculo del efecto de la ola para la protección de taludes, Especificaciones de Proyecto*, NC 48-18 1983.
- [38] *Presas de materiales locales* (1974) Normas y Reglas de la Construcción SNIP II-53-73, Gosstroi de la URSS, Moscú.
- [39] *Probabilidad de diseño y comprobación para protección contra inundaciones de avenidas de las obras* (1985), NC 48-31.
- [40] Rúa, J. (1981) *Cálculo de olas en los embalses. Procedimiento de cálculo*, Revista Voluntad Hidráulica, Año XVIII, no. 56, La Habana.
- [41] Rúa, J. (1981) *Determinación del fetch para el cálculo de las olas en los embalses*, Revista Voluntad Hidráulica, Año XVIII, no. 55, La Habana.
- [42] Rubanik, M. et al. (1982) *Los regímenes del viento y del oleaje en el embalse de la presa Kievskaja*, Revista Construcción Hidrotécnica, no. 4, Moscú.
- [43] Rumiantsev, I. y V. Matseya (1988) *Construcciones hidrotécnicas, Libro de texto*, Editorial Agropromizdat, Moscú.
- [44] Sherard, J. et al. (1963) *Earth and earth-rock dams*, Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, La Habana.
- [45] *Solicitaciones y acciones sobre las obras hidráulicas (por el oleaje, los hielos y las embarcaciones)* (1975) Normas y Reglas de la Construcción SNIP II-57-75, Parte II, Normas de Proyección, Capítulo 57, Gosstroi de la URSS, Instituto Vedeniyevev, Moscú.
- [46] Springall, R. (1988) *Oleaje generado por huracanes en el Golfo de Méjico*, Memorias del XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 3, La Habana.
- [47] Tápanes, J. (1974) *Generación y pronóstico del oleaje en embalses y cuerpos de agua represados*, Revista Voluntad Hidráulica, Año XI, no. 30, La Habana.
- [48] Tápanes, J. *Ondas estacionarias en embalses y cuerpos de agua represados*, Revista Voluntad Hidráulica, La Habana.
- [49] Vázquez, E. y L. Patulina (1990) *Categoría de las obras hidrotécnicas y probabilidad de superación de los gastos máximos*, Regulación de Proyectos No.001/90, Unión de Empresas de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos, La Habana.
- [50] Velazco, E. (2008a) *Informe-Resumen de las Actualizaciones de los Aliviaderos de las Provincias Ciudad de La Habana y Habana*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana.
- [51] Velazco, E. (2009) *Informe Resumen Gráficos de Prevaciados de 9 Presas de la Provincia La Habana*, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana.
- [52] Velazco, E. (2008b) *La protección de las presas contra las crecidas extremas y los huracanes tropicales en el nuevo escenario del cambio climático*, Ponencia, IV Taller Uso y Cuidado del Agua, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y Sociedad Económica de Amigos del País, La Habana, noviembre.
- [53] Velazco, E. (1998) *La protección de los embalses contra los cambios climáticos: un proyecto para la región*, Resúmenes del Segundo Coloquio en Hidrología y Manejo de los Recursos Hídricos en el Trópico Húmedo, Tema II: Variabilidad del clima, impactos en la hidrología y los recursos hídricos, Ciudad de Panamá.
- [54] Velazco, E. (1999a) *La seguridad de los embalses ante los efectos de los cambios climáticos; medidas estructurales de protección*, Resúmenes del V Congreso Internacional de Desastres, p.62, La Habana.

- [55] Velazco, E. (1999b) *Medidas estructurales de protección contra los efectos del cambio climático en la seguridad de los embalses*, Reunión de Especialistas en Hidráulica e Hidrología, Fondo Andrés Bello, Cuenca, Ecuador.
- [56] Velazco, E. (1999c) *Medidas estructurales y tecnológicas de adaptación para la protección de los embalses contra los efectos del cambio climático*, II Congreso de Manejo Integral, Gestión Ambiental y Protección de las Aguas en Cuencas Hidrográficas, II Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Habana.
- [57] Velazco, E. (2010) *Resultados del Programa de Protección de Presas contra las Crecidas Extremas y los Huracanes Tropicales en el Nuevo Escenario del Cambio Climático*, Forum de Ciencia y Técnica, La Habana.
- [58] Velazco, E., E. Bruzón e I. Piñeiro (2010) *Recrecimiento Estructural del Parapeto de la Presa Pinillos*, Proyecto de Ingeniería de Detalle, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [59] Velazco, E. y C. Buján (2000) *Sistemas de alerta y prevención y medidas estructurales para garantizar la seguridad de los embalses contra los impactos del cambio climático en la República de Cuba*, Seminario Internacional "Los Aludes Torrenciales de Diciembre 1999 en Venezuela", Universidad Central de Caracas, Venezuela.
- [60] Velazco, E. e I. Piñeiro (2008a) *Recrecimiento Estructural del Parapeto de la Presa Caunavaco*, Proyecto de Ingeniería de Detalle, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [61] Velazco, E. e I. Piñeiro (2008b) *Recrecimiento Estructural del Parapeto de la Presa La Ruda*, Proyecto de Ingeniería de Detalle, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana.
- [62] Velazco, E., I. Piñeiro y N. Piñero (2006) *Reproyección Aliviadero Caunavaco, Partes: Hidráulica y Estructural*, Proyecto de Ingeniería de Detalle, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana, La Habana, septiembre.
- [63] Víctor, C. (1968) *Tratado de Hidráulica Aplicada*, Edición Revolucionaria, Instituto del Libro, La Habana.
- [64] Visser, H. *et al.* (2000) *Identifying key sources of uncertainty on climatic change projections*, Climatic Change, no.45, pp.421-457.
- [65] Volkov, I., P. Kononienko e I. Fedichkin (1968) *Construcciones hidrotécnicas*, Editorial Kolos, Moscú.
- [66] Zubov, L. y A. Smirnov (1976) *Acerca de algunas peculiaridades del movimiento en olas de un líquido real*, Trabajos del Instituto VODGEO, vol.60, Moscú.