

Cálculo de diques de escollera de gran profundidad^(*)

Por FERNANDO RODRIGUEZ PEREZ

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

Las graves averías de los diques de Bilbao y de Sines demuestran la inexactitud de los métodos de cálculo hasta ahora empleados, según los cuales un temporal real produce los mismos daños que un oleaje monocromático de altura aproximadamente igual a la significativa máxima de aquél.

El método que exponemos está basado en la experiencia de Bilbao y, sobre todo, en los 107 ensayos que, para estudiar el refuerzo del dique de Punta Lucero, se efectuaron en los Laboratorios D.H.I., de Copenhague y V.H.L. de Trondheim.

1. PROCESO DE AVERIAS

Los ensayos mencionados aclaran el comportamiento de un dique de escollera atacado por temporales reales aunque la dispersión de los resultados es muy grande porque, al reconstruir el modelo para un nuevo ensayo, nunca se tiene exactamente la misma trabazón de los bloques (en la realidad esto se traduce en desigualdades de resistencia a lo largo del dique), por el carácter aleatorio del oleaje, las diferentes técnicas de ensayo y distintos espectros empleados, etc. Los resultados generales son, esquemáticamente, los siguientes:

a) Con oleaje regular de altura A_p , comprendida entre las de iniciación y de rotura, la avería termina por estabilizarse en un porcentaje p % al cabo de un número de olas a_p , relativamente pequeño, siendo p función exclusiva de la altura y, por tanto, independiente de la duración.

b) Para oleaje irregular de altura significativa H , y período medio («zero crossing») T_z , constantes, la «excedencia de H », es decir, el número total de olas de altura igual o mayor que H , durante un tiempo t , viene dada por la distribución de Rayleigh:

$$E(H) = \frac{t}{T_z} e^{-2 \left(\frac{H}{H_s} \right)^2} \quad (1.1)$$

Si $H = A_p$, se llega a la misma avería p % cuando, al cabo de un cierto tiempo t_p , la excedencia $E(A_p)$ alcanza un determinado valor K_p , no muy diferente de a_p , pero no forzosamente igual (se producirán menos interferencias sobre el manto al no ser consecutivas todas las olas que integran

la excedencia y habrá algunas mayores que A_p , aunque no agravarán sensiblemente los daños, por ser mínimo el número de olas que la rebasen francamente puesto que K_p es pequeño).

Si se prosigue el ensayo hasta un tiempo $t_q > t_p$, la excedencia aumenta y habrá una K_q ligada, por la ecuación 1.1, a una altura $A_q > A_p$, llegándose a una avería $q > p$. La estabilidad no se alcanza nunca y la avería es función de H_s y del tiempo o, mejor dicho, del número total de olas.

c) Con oleaje irregular de altura significativa y período medio variables, la excedencia vale:

$$E(H) = \int_0^t \frac{dt}{T_z} e^{-2 \left(\frac{H}{H_s} \right)^2} \quad (1.2)$$

Siendo D la duración del temporal. Como T_z y H_s son funciones exclusivas de t , también lo será $E(H) = \phi(H)$. Conocida esta función podrá determinarse el valor de H que hace $E(H) = K_p$ y la avería es la misma que la estabilizada por un oleaje monocromático de altura $A = H$ que es así equivalente al temporal real.

d) Si la profundidad es grande, las averías son prácticamente independientes del nivel del mar y así, en puertos de marea, los diques pueden ser calculados para el nivel medio. Tampoco parecen influir, para los períodos y alturas ensayados, ni el peralte ni las posibles agrupaciones de olas de gran altura.

e) Comparando series de ensayos de iguales alturas y diferentes períodos se aprecia que, a veces, los daños aumentan con el período, mientras otras ocurre lo contrario. No es, pues, clara la influencia directa del período aunque sí la indirecta en cuanto determina el número de olas para una duración dada.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de octubre de 1980.

CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA DE GRAN PROFUNDIDAD

Como se ve, el cálculo de la sección requiere dos grupos de datos: los referentes al temporal de cálculo (altura significativa máxima y distribución de las mayores alturas) y los correspondientes al dique (alturas monocromáticas de iniciación y de rotura y excedencias de cálculo).

2. TEMPORAL DE CALCULO

El «régimen de temporales», es decir, la probabilidad de que se presente uno de altura significativa máxima H_M se obtiene ajustando una ecuación teórica a las máximas anuales registradas o calculadas durante un cierto plazo que, como mínimo, debe ser de unos veinte años. Rara vez, y desde luego nunca en España, se dispondrá de registros que cubran ese plazo, por lo que hay que recurrir a calcular las alturas utilizando los métodos de previsión basados en las cartas meteorológicas.

La ecuación ajustada suele ser la doble exponencial de Gumbel o la de Weibull, usadas también en Hidrología para las avenidas. Según el método de Gumbel, tal como lo expuso su autor, se atribuye a cada temporal una probabilidad o un período de retorno $R = \frac{1}{p}$ dados por:

$$R = \frac{1}{p} = \frac{N+1}{N-K+1} \quad (2.1)$$

siendo N el número total de años y K el que corresponde a cada temporal cuando se ordenan por orden creciente de alturas.

Con ese período de retorno se calcula la «variable reducida»:

$$y = -\text{nep} \cdot \text{nep} \frac{R}{R-1} \quad (2.2)$$

y se ajusta a los pares de valores y y H_M una recta de la forma:

$$H_M - m_H = \frac{\sigma_H}{\sigma_Y} (y - m_Y) \quad (2.3)$$

siendo m_Y , m_H las medias de y y de H y σ_Y y σ_H sus desviaciones típicas.

El régimen de temporales de Bilbao, calculado en 1972 por Suárez Bores mediante la previsión de los años 1951-52 a 1970-71 y claramente comprobado por la experiencia posterior es:

$$H_M = 4,05 + 1,31 y \quad (2.4)$$

El período de retorno de cálculo está determinado reglamentariamente en ciertas obras, como las presas pero, en el caso de los diques, ha de ser fijado por el proyectista. Como orientación puede señalarse que, en los diques importantes últimamente proyectados o construidos, el período de retorno de iniciación suele estar comprendido entre diez y cincuenta años y el de rotura entre cien y quinientos años. El reglamentario en España para el proyecto de presas, cuya rotura es mucho más catastrófica que la de un dique, es de quinientos años.

3. LA FASE ACTIVA

La ecuación (1.2) da la distribución de alturas cuando H_s y T_s varían en forma continua. Cuando se dispone de una serie de registros a intervalos Δt , se tendrá una representación escalonada y la excedencia, suma de las parciales será:

$$E(H) = \Delta t \sum_{n=1}^N \frac{1}{T_n} e^{-2 \left(\frac{H}{H_n} \right)^2} \quad (3.1)$$

La suma, o la integral, deben extenderse a toda la duración del temporal, pero es difícil precisar cuándo éste comienza y termina, por superponerse a un estado del mar de cierta agitación y hay que recurrir a computar solamente la «fase activa», es decir, los escalones de altura significativa mayor que un cierto valor H_a tal que, por debajo de él, la excedencia de cualquier H pueda despreciarse frente a la de la fase activa.

La relación entre las excedencias parciales del escalón H_n y del de máxima altura H_m es:

$$\varepsilon = \frac{T_m}{T_n} e^{2 \frac{H^2}{H_m^2} \left(1 - \frac{H_m^2}{H_n^2} \right)} \quad (3.2)$$

Puesto que $H_m > H_n$, el mayor valor de ε corresponde al menor de $\frac{H}{H_m}$ y al mayor de $\frac{T_m}{T_n}$. En cuanto al primero, los valores útiles para el cálculo son mayores que 1 y como los de $\frac{T_m}{T_n}$ están, generalmente, comprendidos entre 1 y $\frac{H_m}{H_n}$, se tendrá:

$$\varepsilon \leq \frac{H_m}{H_n} e^{2 \left(1 - \frac{H_m^2}{H_n^2} \right)} \quad (3.3)$$

CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA DE GRAN PROFUNDIDAD

que para $\frac{H_u}{H_m} = 0,5$ da $\varepsilon = 0,0050$ y para $\frac{H_u}{H_m} = 0,6$ resulta ser $\varepsilon = 0,048$. Este último puede ser excesivo, especialmente si la duración de la fase activa es mucho menor que la total del temporal y, por eso, es preferible considerar como fase activa las alturas significantes mayores que la mitad de la máxima.

4. DISTRIBUCION DE LAS MAYORES ALTURAS

La distribución de las mayores alturas de cualquier temporal parece responder a una ecuación del tipo:

$$\text{nep } E = \alpha - \beta \xi - \gamma \xi^2 \quad (4.1)$$

siendo ξ la altura unitaria o relativa $\xi = \frac{H}{H_M}$.

En el caso de Bilbao se han determinado, para cada uno de los 20 temporales registrados de más de cuatro metros de altura y mediante la ecuación (3.1) los valores de E cada metro o cada medio metro, de manera que se tengan, al menos, cinco puntos que cubran el intervalo $E = 300$ a $E = 10$. A ellos se han interpolado parábolas cuyos ajustes son sorprendentemente exactos puesto que el máximo error es del 0,5 por 100.

Las ecuaciones $\text{nep } E = a - bH - cH^2$ se expresan inmediatamente en la forma (4.1) haciendo $H = \xi H_M$. La única dificultad es la determinación de H_M que, sólo aproximadamente, puede estimarse dibujando la curva de estados del mar. Los valores más probables de H_M y los coeficientes de cada temporal figuran en el cuadro 1.

Pudiera pensarse que la distribución parabólica del logaritmo es una característica de Bilbao donde la semejanza de las distribuciones puede ser debida a que todos los temporales registrados son de rumbos muy próximos al NW y han sido producidos por situaciones meteorológicas análogas. Para comprobar si la ecuación (4.1) es general, hemos calculado las excedencias de temporales teóricos en los que H_s y T_s son funciones de t expresables analíticamente.

Llamando T_M al período correspondiente a H_M y haciendo $\frac{H_M}{H_s} = x$, $\frac{H_M}{T_s} = y$, la ecuación (1.2) toma la forma:

$$E = \frac{1}{T_M} \int_0^{\infty} y e^{-2 \xi^2 x^2} dt \quad (4.2)$$

Tomando H_M como origen de tiempos, considerando, en primer lugar, la rama descendente y lla-

CUADRO 1

Temporal		H_m	T_m	nep $E = a - bH - cH^2$			H_M	nep $E = \alpha - \beta \xi - \gamma \xi^2$			$\xi_{\max}$	ξ_{20}
				a	b	c		α	β	γ		
I	2-12-76	7,90	10,0	11,590	0,4572	0,01953	8,00	11,590	3,658	1,250	1,915	1,540
II	13- 3-76	6,80	8,9	10,013	0,1875	0,03909	7,20	10,013	1,350	2,026	1,915	1,557
III	20- 1-78	6,16	10,4	9,832	0,2656	0,04331	6,25	9,832	1,660	1,692	1,969	1,579
IV	21-11-77	6,11	12,3	10,246	0,4132	0,04198	6,15	10,246	2,541	1,588	1,863	1,482
V	28- 3-78	5,96	14,4	11,222	0,7492	0,02304	6,05	11,222	4,533	0,843	1,844	1,433
VI	24- 3-78	5,90	10,7	10,836	0,5599	0,03447	5,95	10,836	3,331	1,220	1,913	1,514
VII	29- 1-78	5,83	10,1	10,960	0,5036	0,04179	5,85	10,960	2,946	1,430	1,924	1,545
VIII	17- 3-78	5,60	10,2	11,199	0,5795	0,03948	5,75	11,199	3,332	1,305	1,919	1,537
IX	24- 1-78	5,72	14,4	11,968	0,7732	0,03111	5,75	11,968	4,446	1,029	1,877	1,498
X	20- 3-75	5,30	8,0	10,009	0,3719	0,05594	5,35	10,009	1,990	1,601	1,955	1,562
XI	3-11-76	5,10	8,4	10,704	0,6272	0,04500	5,15	10,704	3,230	1,194	1,933	1,526
XII	15-11-77	5,05	12,6	10,995	0,4429	0,06318	5,10	10,995	2,259	1,643	1,989	1,616
XIII	18-10-76	4,90	7,8	9,550	0,4113	0,06107	4,90	9,550	2,015	1,466	1,956	1,536
XIV	28-12-77	4,84	11,2	10,144	0,5223	0,05745	4,85	10,144	2,533	1,351	1,959	1,546
XV	2- 2-78	4,54	10,2	9,957	0,4468	0,07333	4,65	9,957	2,078	1,586	1,935	1,540
XVI	14-10-76	4,62	9,0	10,216	0,3931	0,07836	4,65	10,216	1,828	1,694	1,975	1,594
XVII	22- 3-78	4,46	13,3	10,655	0,4265	0,09274	4,50	10,665	1,919	1,878	1,926	1,573
XVIII	22- 3-76	4,32	9,3	10,069	0,4553	0,08339	4,40	10,069	2,003	1,614	1,953	1,563
XIX	8-12-77	4,30	8,9	9,517	0,3839	0,09197	4,35	9,517	1,670	1,740	1,908	1,515
XX	13-11-77	4,15	8,4	10,407	0,5446	0,09137	4,20	10,407	2,287	1,612	1,929	1,540

CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA DE GRAN PROFUNDIDAD

mando D_1 a la duración de su fase activa, se tiene $\frac{H_s}{H_M} = \frac{1}{x} = 1$ para $t = 0$ y $\frac{H_s}{H_M} = \frac{1}{x} = 0,5$ para $t = D_1$ y la forma más sencilla de esquematizar $x = f(t)$ es hacer (*):

$$\frac{1}{x} = 1 - 0,5 \left(\frac{t}{D_1} \right)^m \quad (4.3)$$

Para el período, puede hacerse $T = K H_s^n$, con lo cual:

$$y = \frac{T_M}{T_s} = \left(\frac{H_M}{H_s} \right)^n = x^n \quad (4.4)$$

haciendo, para simplificar la notación $\tau = \frac{t}{D_1}$ la ecuación (4.2) queda:

$$E_1 = \frac{D_1}{T_M} \int_0^1 x^n e^{-2x^2 \xi^2} d\tau \quad (4.5)$$

La rama ascendente, si tiene los mismos valores de m y n , responde a la misma ecuación, salvo que la duración es D_2 y así, la excedencia total con $D = D_1 + D_2$ y expresando, como es usual, la duración en horas y el período en segundos, será:

$$E(H) = 3600 \frac{T}{D_M} \int_0^1 x^n e^{-2x^2 \xi^2} d\tau \quad (4.6)$$

con

$$x = \frac{2}{2 - \tau^m} \quad (4.7)$$

Generalmente, la ecuación (4.6) no es integrable analíticamente por lo que se ha calculado numéricamente por la regla de Simpson con 20 particiones para cinco valores de ξ ($\xi = 1, \xi = 1,2, \xi = 1,8$)

ajustando parábolas a $\text{nep} \frac{E T_M}{D}$, cuyos coeficientes

figuran en el cuadro 2. Las diferencias de los logaritmos calculados y ajustados no exceden de

(*) Las curvas de estados del mar, dadas por los sucesivos registros, suelen ser muy irregulares, pero como la excedencia no varía si se altera el orden de los registros, la ecuación de "x" podría obtenerse según los valores decrecientes de H_s en cada una de las ramas e incluso en el conjunto de las dos. Claro es que las ecuaciones que así se obtuvieran podrían ser más complicadas que las (4.3) y (4.4), pero de lo que se trata es de ver si la distribución parabólica es general y, a tal fin, el cuadro 2 cubre, prácticamente, todas las formas posibles desde las muy agudas ($m = 0,5$) hasta las muy convexas ($m = 4$) y lo mismo ocurre con "n".

0,002, lo que equivale a un error máximo del 0,2 por 100 en las excedencias ajustadas.

Las ecuaciones (4.1) apenas son útiles si no pueden extrapolarse para el temporal de cálculo, de altura siempre mayor que los registrados. Para ello hay que obtener ecuaciones estadísticamente fiables de la forma $E = f(H_M)$ para $\xi = \text{constante}$ o $\xi = \phi(H_M)$ para E constante.

Ello sólo parece ser posible cuando los temporales son del mismo tipo, lo que puede comprobarse mediante algunos datos características como por ejemplo el número total de olas y la altura máxima probable que se obtienen haciendo $\xi = 0$ y $\text{nep} E = 0$. El logaritmo del número de olas es, pues, el coeficiente α y los valores de $\xi_{\text{máx}}$, en el caso de Bilbao, figuran en la penúltima columna del cuadro 1.

Las regresiones respecto a H_M y sus correlaciones son:

$$\text{nep} N = \alpha = 8,941 + 0,2868 H_M \quad \rho_\alpha = 0,423 \quad (4.8)$$

$$\xi_{\text{máx}} = 2,002 - 0,0136 H_M \quad \rho_\xi = 0,365 \quad (4.9)$$

CUADRO 2

m	n	$\text{nep} E = \text{nep} \frac{D}{T_M} + \alpha - \beta \xi - \gamma \xi^2$		
		α	β	γ
0,5	0	9,386	3,776	1,316
	0,5	9,654	3,974	1,277
	1	9,943	4,196	1,230
1	0	8,627	1,858	1,738
	0,5	8,799	1,996	1,705
	1	8,982	2,142	1,671
2	0	8,382	0,995	1,855
	0,5	8,492	1,092	1,830
	1	8,602	1,186	1,807
4	0	8,280	0,524	1,921
	0,5	8,340	0,578	1,907
	1	8,390	0,614	1,900
∞	-	8,189	0,000	2,000

Las correlaciones son bajas, lo que, en parte, puede ser debido a que los coeficientes de regresión son pequeños. Para precisar más hay que calcular los valores de la t de Student, dados por:

$$t = \sqrt{\nu \frac{\rho^2}{1 - \rho^2}} \quad (4.10)$$

donde ν es el número de grados de libertad, 18 en nuestro caso. Los valores de t y sus niveles de significación son:

$$\begin{aligned} t_{\alpha} &= 1,983 & Q_{\alpha} &= 0,969 \\ t_{\beta} &= 1,663 & Q_{\beta} &= 0,943 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Y, por tanto, ambas regresiones son admisibles. Si así no fuera, habría que separar, atendiendo a sus rumbos y situaciones meteorológicas, los distintos tipos o grupos de temporales y determinar ecuaciones diferentes para cada uno, como también distintos regímenes de temporales.

5. EXCEDENCIA DE CÁLCULO

Las alturas A_i , A_r , de iniciación y de rotura monocromáticas pueden determinarse, más o menos exactamente, por las fórmulas de cálculo en uso. Los resultados de los ensayos con oleaje irregular se aproximan más a la de Iribarren que a la de Hudson y quizá más a la primera corregida con un coeficiente de rozamiento algo menor pero, al no conocerse la modificación de N que ello acarrea, es forzoso aplicar la fórmula con $f = 2,48$ y con los coeficientes $N_i = 0,452$ y $N_r = 0,174$ determinados, posteriormente, por el Laboratorio de Puertos de Madrid.

Para oleaje regular, la iniciación suele definirse por un porcentaje máximo de averías del 5 por 100 y la rotura por el 50 por 100, pero habría que precisar a qué superficie (manto total o «manto activo») se refieren estos porcentajes y si se computan los bloques movidos o los desplazados fuera del manto. Con oleaje irregular, deben tomarse porcentajes algo menores para compensar la posible disminución de A_i y A_r , pareciendo razonable reducirlos en un 20 por 100 y referir los nuevos límites del 4 por 100 y del 40 por 100 a bloques movidos en todo el manto principal.

La dispersión de los resultados de los ensayos no puede obviarse tomando unos niveles de confianza más seguros porque la distribución no es conocida, aunque claramente no sea normal, puesto que el límite físico de la rama ascendente es mucho menor que el de la descendente. Por tal razón, sólo se han considerado las series de ensayos de igual período y altura, tomando los valores mínimos de cada una. Las excedencias así

obtenidas, prácticamente iguales en iniciación y rotura, son del orden de 20.

Afortunadamente, los resultados finales del cálculo son muy poco sensibles a variaciones importantes de E ; en el caso de Bilbao la diferencia relativa de las alturas significantes es menor que la décima parte de la diferencia, también relativa, de las excedencias consideradas.

6. ALTURA MONOCROMÁTICA EQUIVALENTE

Haciendo $E = 20$ en las ecuaciones (4.1) podrán calcularse los valores de ξ para cada temporal y, con ellos, la función $\xi_{20} = f(H_M)$. Para Bilbao, los valores de ξ figuran en la última columna del cuadro 2 y su regresión es:

$$\xi = 1,592 - 0,0094 H_M \quad (6.1)$$

con $\rho = 0,229$, $t = 0,997$ y $Q = 0,834$. Como este nivel no es muy alto puede recurrirse a calcular las regresiones de los coeficientes α , β , γ que son:

$$\alpha = 8,941 + 0,2868 H_M \quad \rho_{\alpha} = 0,423 \quad t_{\alpha} = 1,983$$

$$Q_{\alpha} = 0,969$$

$$\beta = 0,752 + 0,3353 H_M \quad \rho_{\beta} = 0,364 \quad t_{\beta} = 1,658$$

$$Q_{\beta} = 0,943$$

$$\gamma = 1,849 - 0,0622 H_M \quad \rho_{\gamma} = 0,227 \quad t_{\gamma} = 0,991$$

$$Q_{\gamma} = 0,833$$

con lo que la ecuación en ξ es:

$$(5,945 + 0,2868 H_M) - (0,752 + 0,3353 H_M) \xi - (1,849 - 0,0622 H_M) \xi^2 = 0 \quad (6.2)$$

Los valores que las ecuaciones 6.1 y 6.2 dan para algunas alturas son:

	$H_M = 5 \text{ m}$	$H_M = 7 \text{ m}$	$H_M = 10 \text{ m}$	$H_M = 15 \text{ m}$
Ec. 6.1	1,545	1,526	1,498	1,451
Ec. 6.2	1,539	1,526	1,486	1,443

Es preferible la ecuación 6.1 no solamente por ser más sencilla y, a partir de $H_M = 7 \text{ m}$, más desfavorable —aunque la diferencia máxima sea solamente del 0,6 por 100—, sino porque permite adoptar niveles de confianza más seguros que el 50 por 100 que corresponde a la regresión.

Las diferencias entre los valores 4.1 y los ajustados ξ son prácticamente normales y su desviación típica $S = \sqrt{\frac{\sum (\xi - \xi_n)^2}{n}}$ vale 0,0382, con lo

CALCULO DE LOS DIQUES DE ESCOLLERA DE GRAN PROFUNDIDAD

que, para un nivel de confianza del 90 por 100, tendrá:

$$\xi = 1,592 + 1,282 S - 0,0094 H_M = 1,641 - 0,0094 H_M \quad (6.3)$$

y, finalmente, puesto que $\xi = \frac{A}{H_M}$, las alturas monocromáticas equivalentes son:

$$\text{Nivel 50 \% } A = 1,592 H_M - 0,0094 H_M^2 \quad (6.4)$$

$$\text{Nivel 90 \% } A = 1,641 H_M - 0,0094 H_M^2 \quad (6.5)$$

pareciendo lógico emplear la primera para el análisis económico y siempre para la iniciación de averías y ambas para estimar el riesgo de rotura.

Si son pocos los temporales registrados, la regresión no suele ser fiable pero, si los valores de ξ no son muy diferentes puede tomarse su media, corregida, en su caso, de una fracción de la desviación típica para tener un mayor nivel de confianza y la ecuación será:

$$A = (m_\xi + K \sigma_\xi) H_M \quad (6.6)$$

que será, generalmente, más desfavorable para grandes alturas significantes.

Como ejemplo de aplicación del método vamos a calcular la sección necesaria en Punta Lucero para un período de retorno de cincuenta años en iniciación de averías y a determinar el temporal que rompería el dique así calculado:

$$\text{Ec. 2.2 } y = -\text{nep} \cdot \text{nep} \frac{50}{49} = 3,902 \text{ m}$$

$$\text{Ec. 2.4 } H_M = 4,05 + 1,31 \times 3,902 = 9,16 \text{ m}$$

$$\text{Ec. 6.4 } A_i = 1,592 \times 9,16 - 0,0094 \times 9,16^2 = 13,79 \text{ m}$$

Para $A_i = 13,79$ con un talud 2 : 1 y densidad 2,35 la fórmula de Iribarren, con $N = 0,452$, da bloques de 123,5 toneladas. La altura de rotura se

tiene multiplicando A_i por $\sqrt{\frac{0,452}{0,174}} = 1,375$, con

lo que $A_r = 18,96$ m y para un nivel de confianza del 50 por 100:

$$\text{Ecuación 6.4: } 1,592 H_M - 0,0094 H_M^2 = 18,96, \\ H_M = 12,89 \text{ m}$$

$$\text{Ecuación 2.4: } y = \frac{12,89 - 4,05}{1,31} = 6,748 \text{ m}$$

$$\text{Ecuac. 2.2: } \frac{R}{R-1} = e^{-\frac{6,748}{R-1}}, R = 853 \text{ años}$$

De la misma forma para el nivel 90 por 100 se llega a $H_M = 12,44$ m, $y = 6,405$ m, $R = 605$ años.

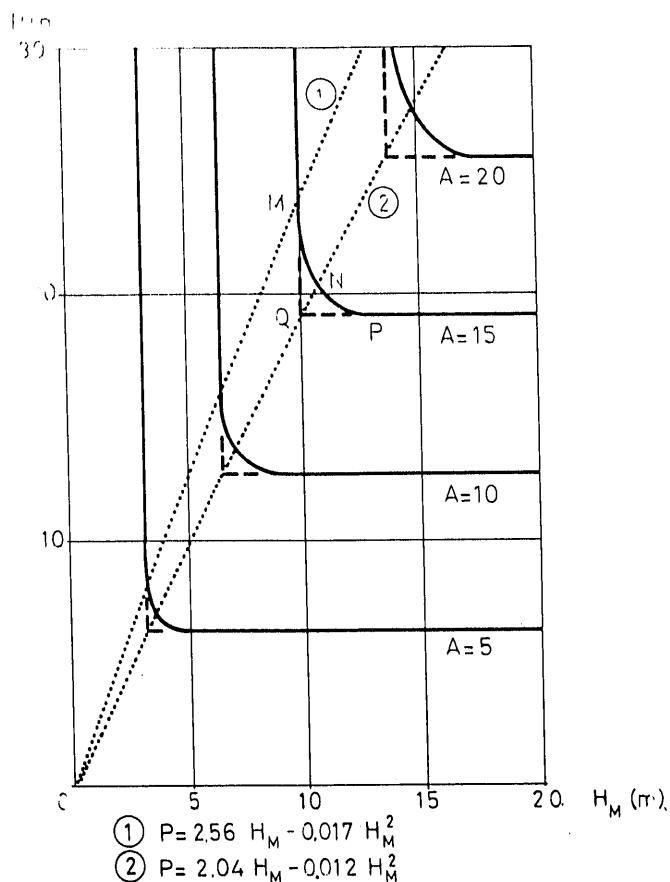
Como se ve, el período de retorno es muy sensible a pequeñas variaciones de la altura y la significativa de rotura es *menor* que la monocromática de iniciación. Esto último ocurrirá siempre que $\xi > 1,375$; en Bilbao es del orden de 1,5, pero esta proporción puede ser muy distinta en otros puertos, disminuyendo cuando sea menor la duración de los temporales o más aguda la forma de la curva de estados del mar.

7. LIMITES DE APLICACION DEL METODO

La validez del método está limitada por la profundidad, si ésta es suficientemente pequeña para truncar la distribución de las excedencias.

En la figura adjunta se representan las líneas $A = \text{constante}$ en función de H_M y de la profundidad P . Con las pendientes de fondo y las alturas y períodos usuales las olas rompen a una profundidad $\frac{P}{1,28 H}$ y, por tanto, las mayores que $\frac{P}{1,28}$

ABRA DE BILBAO NIVEL 50 %



llegan al dique y la truncadura comienza al romper la ola máxima, a una profundidad $P = 1,28 H_{\max} = 2,56 H_M - 0,017 H_M^2$ (punto M).

Si P es algo menor, solamente habrá roto alguna de las mayores olas; la excedencia será algo menor y para alcanzar el mismo valor de A se necesitará una H_M algo mayor que la dada por la ecuación 6.4. Si es mucho menor, al haber roto todas las olas mayores que $\frac{P}{1,28}$, éste será precisamente el valor de A .

Desconociéndose la distribución de un temporal parcialmente roto, no es posible determinar el arco MNP , pero no debe separarse mucho de las dos rectas límites porque, como se ha visto, la variación de E influye poco en la altura A . Así, en primera aproximación y quedando del lado de la seguridad, puede admitirse que la validez del método está limitada por los puntos Q , cuya ecuación, en Bilbao y a nivel 50 por 100, es:

$$P = 1,28 A = 2,04 H_M - 0,012 H_M^2 \quad (7.1)$$

Para valores de P mayores, la altura equivalente depende sólo de H_M y viene dada por la ecuación (6.4); para valores menores depende únicamente de P y vale $\frac{P}{1,28} = 0,78 P$.

Esto explica que diques proyectados para una altura equivalente igual a la significativa máxima y construidos en profundidades relativamente pequeñas, no sufran grandes averías. Para el mismo ejemplo del apartado 6, ello supondría calcular la sección para $A_i = 9,16$ m, para lo que se necesitan, con el mismo talud y densidad, bloques de 36,2 toneladas y la altura monocromática de rotura sería $A_r = 1,375 \times 9,16 = 12,60$ m. Construido en profundidades menores que $1,28 \times 12,60 = 16,1$ metros ningún temporal podrá romperlo y, en menos de 11,7 m ni siquiera averiarlo. En cambio, en más de 20,1 m, el mismo dique sufrirá averías con temporales $H_M \geq 5,96$ m ($R = 48$ años) y se rompería a partir de $H_M = 8,32$ m ($R = 26,6$ años).

