

ENRIQUE COPEIRO DEL VILLAR MARTÍNEZ

MIGUEL ÁNGEL GARCÍA CAMPOS

DIQUES DE ESCOLLERA

Elementos del cálculo resistente
y de la estima del oleaje



© Enrique Copeiro del Villar Martínez y Miguel Ángel García Campos, 2008

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos

Internet: <http://www.diazdesantos.es>

E-mail: ediciones@diazdesantos.es

ISBN: 978-84-7978-858-2

Depósito legal: M. 23.767-2008

Diseño de cubierta: Ángel Calvete

Fotocomposición: Fer Fotocomposición

Impresión: Edigrafos

Encuadernación: Rústica

Printed in Spain - Impreso en España

Índice

PRÓLOGO	XI
INTRODUCCIÓN	XXI
1. DESCRIPCIÓN DE LAS FÓRMULAS DE ESTABILIDAD	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. ESTABILIDAD DE UN LECHO GRANULAR RECORRIDO POR UNA CORRIENTE DE AGUA CON VELOCIDAD UNIFORME	2
1.2.1. Fuerza de un flujo sobre un obstáculo (I. Newton)	2
1.2.2. Velocidad crítica de erosión en un lecho sedimentario horizontal (A. Brahms)	3
1.2.3. Velocidad crítica de erosión en un lecho sedimentario inclinado (W. Graf)	4
1.3. FÓRMULA DE CASTRO-BRIONES	8
1.3.1. Generalidades	8
1.3.2. Estructura de la fórmula	8
1.4. FÓRMULA DE IRIBARREN	11
1.4.1. Generalidades	11
1.4.2. Estructura de la fórmula	12
1.4.3. La estima empírica de los coeficientes de la fórmula	22
1.5. FÓRMULA DE HUDSON	34
1.5.1. Generalidades	34
1.5.2. Estructura de la fórmula	36
1.5.3. Ensayos de estabilidad	40
1.5.4. El debate acerca del factor angular y el coeficiente de rozamiento	48
1.6. FÓRMULA DE LOSADA-GIMÉNEZ	56
1.6.1. Antecedentes y contexto	56
1.6.2. Estructura de la fórmula	60
1.6.3. Elección de formas funcionales y estima de los valores de los parámetros.	62
1.6.4. Valoraciones	71

1.7. FÓRMULA DE VAN DER MEER	74
1.7.1. Generalidades	74
1.7.2. Estructura de la fórmula	75
1.7.3. Valoraciones	85
1.8. FÓRMULA DE MELBY-HUGHES	86
1.8.1. Generalidades	86
1.8.2. Estructura de la fórmula y estima de sus coeficientes	87
1.8.3. Valoraciones	102
2. APLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS	103
2.1. OLEAJE DE CÁLCULO PARA LAS FÓRMULAS: OLEAJE QUE ROMPE SOBRE EL DIQUE	103
2.2. OLEAJE DE CÁLCULO PARA LAS FÓRMULAS: OLEAJE QUE ROMPE EN CASCADA DELANTE DEL DIQUE	105
2.2.1. Los valores del coeficiente de estabilidad	105
2.2.2. Los valores de la altura de ola rompiente <i>en cascada</i> delante del dique .	110
2.2.3. La sobreelevación de temporal	112
2.2.3.1. <i>Sobreelevación debida a la rotura simple de la ola</i>	112
2.2.3.2. <i>Sobreelevación pulsante debida a estructura del oleaje real</i> ..	117
2.2.3.3. <i>Sobreelevación meteorológica</i>	118
2.3. LA INCIDENCIA OBLICUA DEL OLEAJE	119
2.4. LOS QUIEBROS Y MORROS DE LOS DIQUES	123
2.5. CONFIGURACIONES PARTICULARES DEL DIQUE Y PIEZAS ESPECIALES PARA EL MANTO	124
3. COMPARACIONES Y VALORACIONES	127
3.1. CONDICIONES DE LAS COMPARACIONES	127
3.2. EXPRESIONES EMPLEADAS EN LAS COMPARACIONES	127
3.3. COMPARACIONES	132
3.3.1. Generalidades	132
3.3.2. Comparación general de las fórmulas de Losada-Giménez y Van der Meer	137
3.3.3. Comparaciones de las fórmulas de Losada-Giménez, Van der Meer, y Melby-Hughes discriminando las variables principales H , L , $\tan \alpha$. . .	139
3.3.3.1. <i>Variación de P con H</i>	140
3.3.3.2. <i>Variación de P con L (T)</i>	141
3.3.3.3. <i>Variación de P con $\tan \alpha$</i>	167

3.3.4. Sensibilidad de las fórmulas de Van der Meer y Melby-Hugues a sus parámetros o factores específicos	172
3.3.4.1. <i>Sensibilidad al</i> factor de permeabilidad (<i>Por</i>)	172
3.3.4.2. <i>Sensibilidad al</i> número de olas del temporal (<i>N</i>)	175
3.3.4.3. <i>Sensibilidad a la</i> profundidad al pie del dique (<i>h</i>)	177
3.3.4.4. <i>Sensibilidad al</i> nivel de averías (<i>S</i>)	179
3.4. VALORACIÓN DE LOS PAPELES DE LAS VARIABLES PRINCIPALES ..	181
3.5. CONDICIONES DE CÁLCULO	187
3.5.1. Periodo de cálculo	187
3.5.2. Factor de permeabilidad (<i>Por</i>)	189
3.5.3. Número de olas (<i>N</i>)	190
3.5.4. Agrupaciones de olas	191
3.5.5. Profundidad al pie del dique (<i>h</i>)	192
3.5.6. Nivel de averías (<i>S</i>)	194
3.6. OBSERVACIONES GENERALES SOBRE LAS FÓRMULAS	194
4. OLEAJE DE CÁLCULO	199
4.1. INTRODUCCIÓN	199
4.2. LOS DATOS	200
4.2.1. Observaciones visuales	200
4.2.1.1. Generalidades	200
4.2.1.2. Precisión de las observaciones de altura de ola	201
4.2.1.3. Precisión de las observaciones del periodo de ola	204
4.2.2. Observaciones instrumentales	205
4.2.2.1. Generalidades	205
4.2.2.2. Precisión de las medidas	211
4.2.3. Modelos de previsión	214
4.2.3.1. Generalidades	214
4.2.3.2. La precisión de las estimas	216
4.3. LOS PROCEDIMIENTOS DE ESTIMA DEL OLEAJE EXTREMAL	217
4.3.1. Generalidades	217
4.3.2. Ajuste de muestra de máximos anuales	217
4.3.3. Ajuste de muestra de los valores mayores	218
4.3.4. Uso de la ecuación de valores extremos	221
4.4. AJUSTE Y SELECCIÓN DE FUNCIONES	224
4.4.1. La probabilidad de representación	224
4.4.2. Los procedimientos de ajuste	227

4.4.3. Funciones y poblaciones	231
4.4.3.1. Generalidades	231
4.4.3.1.1. <i>Funciones de distribución de variables cuyos valores son independientes</i>	231
4.4.3.1.2. <i>Funciones de distribución de variables cuyos valores son dependientes</i>	241
4.4.3.1.3. <i>La función $n(H_s)$</i>	244
4.4.3.2. Tipos de funciones de distribución	250
4.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA VARIABLE H_s	268
4.5.1. Función de distribución $F(H_s)$	268
4.5.2. Función de pruebas estadísticas $n(H_s)$ y función de duraciones $t(H_s)$...	313
4.5.3. Uso de la ecuación extremal para variables continuas	315
4.5.4. Estima de $\Phi(H_s)$ con muestras de máximos anuales	322
4.5.5. Estima de $\psi_u(H_s)$ con muestras de los mayores valores	324
4.5.6. Recomendaciones finales	326
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	329
5.1. CONTEXTO: RESEÑA SOBRE EL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE LOS DIQUES	330
5.2. RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE EL USO DE LAS FÓRMULAS	337
5.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD	340
5.4. OPTIMIZACIÓN DE COSTES Y ANÁLISIS DEL RIESGO	348
6. REFERENCIAS	351
6.1. CAPÍTULOS 1, 2, 3, 5 (Fórmulas de estabilidad y su uso)	351
6.2. CAPÍTULO 4 (Oleaje)	355
6.3. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA	360
ÍNDICE DE SÍMBOLOS	363
ÍNDICE TEMÁTICO Y DE AUTORES	367

Prólogo

Me encuentro ante la satisfacción de prologar un libro con el exclusivo mérito de la decisión libre de sus autores, que agradezco, y mi primera atención es a la manifestación de la *razón y ser* de los diques de escollera en nuestra ingeniería y en nuestra cultura.

Es posible que España sea el país más obligado a salir fuera de los contornos circunscritos a sus costas para disponer de superficies de agua con calados y abrigo suficientes. Y esta frase es de aplicación tanto a sus costas peninsulares como a las insulares. La excepción que pudieran ofrecer los estuarios de los ríos mayores es irrelevante hoy, incluso en las dos excepciones que en siglos anteriores pudieron constituir los del Duero, el Tajo y el Guadalquivir.

En terminología clásica, en toda la geografía de la nación se trata de territorios llamados a los puertos exteriores. No es que no puedan establecerse puertos fluviales, Sevilla fue el más importante de Europa en los siglos XVI y XVII, o que no disponga de rías o bahías capaces de acogerlos, pero o han quedado escasos de calado (Cádiz) o de superficies (Cartagena) o de ambas (La Coruña). Pero más importante resulta el condicionamiento de la orografía de los que son o debieran ser sus *hinterlands*; en península e islas el trazado de vías de transporte interior es costosísimo incluso hoy y ha sido durante siglos imposible, y ello ha llevado a la construcción de más puertos de los que hubiera requerido la superficie y poblamientos totales. Lo cual, en contrapartida, permitió irse quedando en aguas relativamente someras al poder suplir puertos mayores, con la sola ventaja de sinergias que con esa orografía resultan innecesarias, por más puertos menores.

Esta posibilidad de limitarse a puertos menores permitió limitar las profundidades de las obras de abrigo (algo que de otro lado sólo fue posible mientras lo fueron el volumen de transporte y las dimensiones de los buques), lo que a su vez favoreció la construcción de las mismas mediante los diques de escollera a costa de los diques verticales. Seguramente es intuitivo, pero las condiciones de estabilidad de los diques verticales son mucho más críticas bajo condiciones de oleaje en rotura, mientras que los diques de escollera siempre funcionan en esas condiciones. Quizás sea esta la circunstancia ambiental que hizo de la ingeniería portuaria española una pionera en el campo de los diques de escollera, la que propuso las primeras fórmulas para el cálculo de los elementos de su manto principal y la que condujo a la elaboración de un libro como

este que me honro en prologar y que creo que sólo puede ser fruto de su contexto cultural y tecnológico. Y la elaboración de este pensamiento no puede servir para demérito de los autores sino al contrario: además de la plataforma que constituyen las circunstancias, la cultura y la ingeniería, es preciso, y muchas veces más difícil, la capacidad crítica, algo de lo que al menos uno de sus autores, del que me precio de conocer desde hace muchos años, está dotado en grado de muy singular excelencia.

Pero volviendo a la evolución, tras la Segunda Guerra Mundial el incremento del transporte intercontinental, del número y tamaño de los buques y de los puertos se hace rapidísimo, y eso es lo que va a poner en cuestión las obras de abrigo, sus diseños y sus fórmulas de cálculo. Hasta entonces, los diques verticales se presumen limitados a zonas sin riesgo de rotura del oleaje y donde la analogía ondulatoria permite ventajas a los ingenieros de las escuelas napoleónicas (Iribarren, Sainflou, Lira,...) de fuerte formación en mecánica e hidrodinámica clásicas, para avanzar en la conceptualización y especular con las formulaciones de los empujes del oleaje.

Mientras que en los diques de escollera la complejidad del problema hizo pensar en la necesidad de una garantía mayor en la estima del oleaje de cálculo; no estando en condiciones de un mejor análisis del que permitía la teoría ondulatoria, ni de introducir otras variables adicionales a la de la altura de ola significativa, de fácil determinación, pero percibiendo ya muy diferentes comportamientos del oleaje y las obras en las diferentes fachadas costeras, pasa a ser prioritaria una estima «racional» de la altura de ola para el diseño y para el cálculo de la estabilidad de los cantos del manto principal del dique. Y satisfecha esa prioridad, no se respira gran intranquilidad hasta que las profundidades de trabajo y las nuevas formas de estudiar y manejar el oleaje permiten analizar los fenómenos hidrodinámicos de forma distinta y aparentemente clarificadora. Se puede decir que es entonces cuando entra en crisis la «metodología determinista» en el diseño de estas obras de abrigo. Esta crisis se adelanta a la de otras obras y estructuras civiles tanto por su propia naturaleza como por la de las acciones que la someten, pero esa naturaleza, la de su «heterogeneidad», todavía no era evidente.

La crisis económica mundial de los años ochenta del siglo pasado vino anticipada por una reducción del comercio internacional y del transporte marítimo en términos absolutos y relativos. Nunca había sido tan manifiestamente refrendada la teoría de A. Smith al respecto ni su extensión a la significación del transporte marítimo en la riqueza de los pueblos, al tiempo que a la aplicación de todo ello a una economía global y a la unidad económica del planeta. Se reanudó la tendencia al crecimiento de buques, infraestructuras portuarias y la unitarización de las mercancías, que pareció por un breve tiempo haberse detenido, no ya como una consecuencia de problemas logísticos o estratégicos ligados a las relaciones políticas internacionales de confrontación sino como derivada de la globalización económica y del crecimiento necesario de todas las partes.

Este proceso no va a detenerse, por lo que el transporte marítimo tampoco se detendrá en su crecimiento aunque pueda tener fases de atenuación o ajuste; y en muchos lugares del planeta el requerimiento de obras de abrigo en profundidades crecientes va a seguir aumentando. Fuera de nuestras fronteras el proceso de extensión de los puertos a mayores profundidades y, por tanto, de progradar la fase continental hacia el mar mediante grandes obras de abrigo, va a ser más espectacular e impactante aún, porque en el resto del mundo el desarrollo portuario se ha mantenido hasta ahora dentro de los contornos en razón de la morfología y estructura geográficas; pero, habiendo llegado al límite en sus calados, se pone en marcha en muchos casos su salida al exterior. Aunque en las actuales profundidades de implantación de estas obras los diques verticales resultan ser competitivos, son múltiples las razones económicas y geotécnicas para la demanda de, al menos, banquetas y bermas de escollera.

En otra categoría de las de la evolución en la ocupación y uso del territorio costero, las necesidades de residencia, turismo y recreo, y las de la consiguiente protección, demandan, y lo van a hacer crecientemente, de obras en talud o «de escollera» de características y necesidades, o requerimientos de estabilidad mucho más modestos pero no menos complejos. Lo que lleva a diseños mixtos y en condiciones nuevas de este tipo de diques y hace de sus fórmulas punto central en la planificación de las actuaciones y en el diseño de las obras. Ambos procesos actúan en el mismo sentido del desarrollo y perfeccionamiento de estas formulaciones y de su creciente relación con los proyectos basados en el *análisis multivariado*. Y todo ello redundará en la oportunidad y conveniencia de este libro, que sin duda recoge la experiencia y la reflexión profunda de sus autores; a los que aquí mismo les doy mi gratitud y reconocimiento públicos.

Pero al llegar a este punto de la búsqueda de la *razón* de estos diques me encuentro ante la cuestión de su *ser* a través del contenido del libro y refiriéndolo a mis vinculaciones culturales y a mi experiencia, lo que me conduce a las siguientes reflexiones, con las que sobre todo quiero rendir homenaje a los autores del libro, pero también a nuestros maestros, precursores y compañeros, que de todo hay entre nuestros acreedores intelectuales y culturales.

I.

La ingeniería civil española ha podido acreditar y presumir siempre de un importante grado de humanismo en su actividad, aun con una amplia diversidad. La estética y el respeto al paisaje y la cultura han tenido sin embargo más presencia en las obras terrestres que en las marítimas, por su propia naturaleza y por la menor densidad poblacional en la franja costera. Pero el afán de racionalidad no ha sido menor en unas que en otras, como impronta que se generó en la Escuela de Ingeniería de Caminos en su origen napoleónico y el de sus estudios, y que seguramente aún permanece en algún grado.

Posiblemente esa racionalidad práctica es la que motivó las primeras formulaciones para el diseño de los diques de escollera. Su manifiesto empirismo se apoyó en un muy «racional» análisis de los mecanismos que afloraban en su estructura y de los procesos hidrodinámicos que generaban los esfuerzos desestabilizadores. Como muy bien se ve en la exposición de los autores de este magnífico libro, es muy evidente esa base racional en las fórmulas de Iribarren y en las explicaciones explícitas de su autor; y debe presumirse también en la de Castro-Briones en razón de la proximidad temporal de ambas formulaciones y de la sucesión de aquél respecto de Castro en la Cátedra de la Escuela.

El esfuerzo de Iribarren se vertió en los dos aspectos que planteaba el problema de la estabilidad de estos diques, el de las acciones o fuerzas que sobre él se producen o aplican y el de las condiciones de estabilidad del sistema granular. Mal desarrollada aún la Estadística para su aplicación a los fenómenos de naturaleza tan «aleatoria» como el oleaje, extremó su esfuerzo en la comprensión, la del fenómeno en sí mismo y la de los dos factores de su crecimiento. Empírica fue su formulación de la relación entre la *altura de ola* y el *Fetch*. Pero, basada en propuestas anteriores, no dejó de apoyarse en una racional comprensión del crecimiento de la energía, y de la altura, del oleaje. También está llena de racionalidad la interpretación *troco-cicloidad* del oleaje, y de la relación entre los oleajes «progresivos» y «estacionario».

La falta de una buena teoría para abordar los que más adelante se denominarían *procesos estocásticos*, trasciende en la imposible comprensión de los mecanismos de traspaso de la energía desde el viento a la superficie del mar en forma de oleaje, por lo que difícilmente se podría mejorar la referida relación entre el *Fetch* y la altura de ola; pero la experiencia en los problemas de aplicación de los esfuerzos de dicha altura sobre un dique vertical, que Iribarren había estudiado con ahínco para explicar y mejorar las formulaciones de su estabilidad frente a la acción del oleaje, le movieron en la profundización de los mecanismos con que presumiblemente cursaba éste. En la práctica, y para las profundidades requeridas entonces, los oleajes llegaban muy refractados al dique, más al de escollera que al vertical, porque éste se reservaba para más allá de las profundidades de rotura; y un oleaje «de ondas» podía considerarse razonablemente representativo de la realidad; ciertamente en rotura pueda resultar empíricamente más adecuada la representación de Gerstner que la de Airy. Incluso está llena de racionalidad, bien que empírica por falta de información al respecto, la propuesta de que el oleaje y su energía se cuantificaban bien, en su esfuerzo sobre el dique, con la altura de ola; ésta representaba bien al fenómeno y podría considerarse vinculada al periodo a este respecto.

La progresiva penetración en los fenómenos que ha conducido a las sucesivas fórmulas para el análisis de la estabilidad de los elementos del manto en estos diques, al fin y a la postre siempre empírica, está magistralmente introducida por los autores, así como las dos formas extremas de enfrentarse al problema, la fundada de racionalidad, que sin duda se debe a un exceso de la for-

mación mecánico-racional de sus autores, y la meramente experimental y más holística, que sin duda se debe a un defecto relativo en dicha formación. En cierto modo ambas se apoyan dialécticamente. Pero mi pretensión aquí ha sido llamar la atención sobre el recurso reciente a nuevas variables del oleaje para progresar en el análisis, lo que sólo pudo producirse por el importante progreso en el conocimiento del oleaje, en su descripción, en su medida y en su simulación. En este progreso se ha estado reafirmando la diferencia radical entre el fenómeno mecánico de la *onda monocromática* y el fenómeno complejo del *oleaje*, pero, a cambio, también una nueva y progresiva conjunción entre ambos.

Esta conjunción o identificación se produce por dos vías, la de la abstracción física de sus olas como ondas teóricas, y la de la asimilación a un proceso estocástico con la teórica concreción de la *onda de Airy* como movimiento ondulatorio elemental real del oleaje: la indudable capacidad que las ondas teóricas físicas tienen para reproducir y analizar las propiedades geométricas, cinemáticas y dinámicas de las olas no ha inducido al error de ignorar que éstas, y sobre todo el oleaje como algo más complejo y real que las olas, requieren de un análisis estocástico donde, precisamente otra onda teórica, la de Airy, adquiere singular significación. De ahí la relevancia de los parámetros ondulatorios en las fórmulas analizadas en este libro.

II

La toma de conciencia creciente de la multiplicidad de variables que realmente afectan a la estabilidad de un dique corre en paralelo con la mejora en el conocimiento y análisis del comportamiento de este y con la del conocimiento de la variabilidad de aquellas, a su vez incontrolable y aleatoria. Por lo que es también creciente la sensación de incapacidad para plantear correctamente el problema en relación a esquemas de mera racionalidad conceptual. Se impone la idea de que, a la postre, la única racionalidad posible es la metodológica, basada en el empleo de adecuadas técnicas estadísticas.

El análisis mecánico e hidrodinámico conducente a establecer conceptualmente los mecanismos y los procesos del fallo como modo de identificar las variables determinantes cede terreno ante la búsqueda de las variables más significativas a partir del análisis estadístico de los datos experimentales o de observación ya conocidos o a los de posible obtención. A esta tendencia colabora, posiblemente en gran medida, una flexión notable en los métodos y criterios en la formación académica de los profesionales, desde las tradicionales escuelas napoleónicas, dominantes antes en el *viejo continente*, a las de estilo anglosajón. En realidad fue aquella escuela clásica la que sentó las bases matemáticas para el desarrollo de la estadística, pero es probable que ésta, en su evolución y progreso, haya alcanzado cotas de análisis en las que la intuición «racional» haya perdido, al menos transitoriamente, lo que pudiéramos llamar

su rumbo. No es desde luego por la mera repetición de ensayos por donde se llegan a mejores formulaciones, y esto lo explican muy bien los autores, pero sí se puede mejorar con ellos los análisis de riesgos de fallo, algo que también refieren.

Problema distinto en esta encrucijada es si estos métodos de diseño basados en el análisis de riesgos de fallos van a mostrarse potencialmente capaces o no. Las resistencias que se perciben hoy a su incorporación, y que desde luego no deben llevarnos a engaño, no dejan de ser lógicas en un país como el nuestro en el que se viene del campo de la racionalidad determinista, y por ello conviene esperar un tiempo.

Pero lo verdaderamente significativo aquí está en que, en el momento de comienzo o apertura a esa andadura, este libro analiza con magnífico detalle todas las bases de racionalidad de las formulaciones anteriores (el hecho de no estar todas no le quita valor al estar sin duda las de significación suficiente). En cierto modo este libro cierra una larga etapa y pone al lector en situación y condiciones de enfrentarse a la que hoy se abre. Y yo creo que lo hace de modo absolutamente original y con gran brillantez, muy especialmente en lo que se refiere a la reflexión y la comprensión del proceso de progresiva penetración en la dinámica de los fenómenos que ahora se está cerrando. Precisamente lo que en realidad necesitamos todos para enfrentar a la mayoría de los proyectos que puedan requerir de un dique de escollera y lo que requieren la mayoría de los estudiantes de ingeniería y de los ingenieros en su formación.

Pero sobre todo lo van a requerir previsiblemente más en el futuro, en razón de cómo han evolucionado los estudios en la Universidad española y del doble criterio con la que ésta aborda su futuro de «nivelación» formativa europea. Son dos etapas en una compleja andadura de temible pronóstico en personas de mi edad, en la que se puede confundir su tendencia natural al pesimismo con la desgarradora lucidez. Es cierto y contrastable que la evolución reciente en la formación de profesionales no ha sido para bien, en términos generales o medios, aunque no se pueda aplicar este juicio a las elites, de modo que con este planteamiento este libro resulta necesario tanto desde la perspectiva profesional y práctica como desde la más amplia y gratificante de la formación y el entendimiento. Más discutible resulta sin duda hacer valoración y pronosis del proceso de convergencia europea en estos campos de las equivalencias profesionales y las nivelaciones académicas, en los que ha quedado espuriamente atrapada la formación científica universitaria. Resulta que a esta situación se ha llegado en un proceso largo, en el que empecinamientos clasistas han demorado un *aggiornamento* necesario de las enseñanzas técnicas universitarias hasta hacerlo coincidir con el proceso actual. Como la discusión de todo ello queda muy fuera del objetivo de este prólogo, sólo me permito terminarla afirmando mi convicción de que son mayores los riesgos que las seguridades de que la formación de los profesionales pueda mejorar en el futuro, por lo que será creciente la necesidad de libros como este para ellos.

Otro de los aspectos especialmente meritorios del libro es su analítica penetración comparativa en los resultados de la aplicación de diferentes fórmulas. Sin duda es limitada, porque ni emplea todas las fórmulas en cada caso ni todos los casos posibles, pero su trabajo es exhaustivo en las comparaciones que realiza y en los planteamientos, y sus resultados le dan una validez general puesto que, en último término, permite visualizar una realidad fundamental de las formulaciones que suele quedar oculta en las aplicaciones: que cada fórmula tiene un campo de aplicación no sólo en razón de sí misma sino en el de la significación y validez de las variables y parámetros que la configuran. En el caso de los diques de escollera, donde la amplitud de variables significativas es especialmente alta y donde la variabilidad de las mismas lo es también, esta limitación adquiere un valor especial, fácilmente imperceptible, pero al que estos ejercicios de comparación desarrollados en el texto ayudan a resaltar y evidenciar ante el lector.

III.

La realidad es con toda seguridad un dechado de precisión; pero la variabilidad con la que se presenta en todas sus manifestaciones nos sorprende y acompleja, de modo que nos induce a los mitos. Afortunadamente a esa realidad pertenece también un cerebro en un proceso evolutivo capaz de plantearse su progresiva comprensión y la de los procesos, o la de los fenómenos con que se ofrece, la de los mecanismos que los determinan y la de las causas que rigen estos mecanismos.

El comportamiento, en cierto modo errático, de las obras y estructuras antropogénicas frente a las acciones que soportan, no es esencialmente distinto al de las estructuras naturales frente a fenómenos, también naturales, con los que coexisten. Poco a poco nos hemos ido percatando de que tal comportamiento más que errático es variable, con una variabilidad centrada respecto del comportamiento correspondiente a procesos causales determinados, y con una dispersión derivada de otros procesos, seguramente no menos causales pero sin determinar aún en nuestros modelos conceptuales; modelos éstos, de progresivos detalle y precisión, con los que tratamos de representarnos fielmente ese comportamiento. Los modelos conceptuales son la base de la perfección creciente del conocimiento, que es lo que llamamos *investigación*, y también los que permiten la progresiva identificación del hombre y de sus obras con la naturaleza, que es lo que se llama *diseño*.

El conocimiento de «la probabilidad» por el hombre es antiguo y, en sentido lato, estoy seguro que enraíza en los estados más primitivos de las elaboraciones protocientíficas, pero su encaje en «la estadística» como parte de la formulación matemática de la (representación de la) realidad física de los fenómenos naturales es relativamente reciente. Sin embargo es hoy la estadística una herramienta potente y necesaria para el análisis de estos fenómenos, sobre

todo cuando «sus variabilidades» son amplias respecto de su comportamiento central. Entre los frutos de este análisis debo destacar dos: el uno afecta a la mejora de los modelos conceptuales de los comportamientos, y consiste en una mayor capacidad para penetrar en la esencia de los fenómenos, para determinar las relaciones causales y nuevos comportamientos centrales, y para reducir las razones de la variabilidad; el otro, a la configuración de un modo diferente de conceptualizar los modelos de comportamiento basados en realidades (o supuestas realidades físicas) y establecidos sobre factores (concebidos como variables) cuya variabilidad, aún no comprendida aunque supuesta siempre precisa, se admite abordable o interpretable en base estadística.

Es fácil ver que la penetrabilidad comprensiva, al análisis de los fenómenos de la realidad física que rigen el comportamiento de las estructuras, naturales o antropogénicas, frente a las acciones, también naturales o antropogénicas, es a su vez muy dispar, en razón de la naturaleza de unos y de otros y de la propia evolución historia del conocimiento científico. De hecho, la propia estadística, como rama de la matemática, ha ido requiriendo métodos y modelos de creciente capacidad de penetración en según qué fenómenos bajo su análisis. Pero sobre todo es preciso asumir que la variabilidad “no controlada” puede tener importancia distinta según se cuantifique en términos absolutos o relativos respecto de la cuantificación de su valor central; se trataría entonces de asumir que existe una mayor o menor «heterogeneidad» (o falta de «homogeneidad») tanto en los fenómenos como en las estructuras y en las acciones que los desencadenan.

Bajo esta perspectiva creo que existiría hoy acuerdo en que la variabilidad de las acciones antropogénicas es mucho menor (esto es, su homogeneidad es mucho mayor), o puede serlo, que la de las acciones naturales, siempre menos controlables y, por tanto, menos precisamente determinables. Y del mismo modo, en que los fenómenos que rigen los procesos de respuesta de las estructuras antropogénicas, y los procesos mismos, son más «homogéneos» que los correspondientes a las estructuras naturales, a igualdad de los demás factores de espacio, tiempo y dimensión. Pero sobre todo, en que los fenómenos y procesos que condicionan el comportamiento de las obras y estructuras en tierra firme fueron siempre más «homogéneos» que los de las obras y estructuras marítimas.

Y en lo que afecta a las obras marítimas, en particular a su respuesta a la acción del oleaje, estimo que el análisis del comportamiento de este, aunque desigual en cuanto a la probabilidad asociada con sus alturas de ola, periodos, duraciones, etc., está hoy más y mejor desarrollado que el de los distintos elementos estructurales y el de las propias obras. Mas, de entre las obras y estructuras, los elementos «fabricados» son sin duda más «homogéneos» que los naturales y, a título de ejemplo, los diques verticales resultan serlo más que los de «escollera». De modo que podría resultar difícil de entender, y en cierto modo contradictorio con lo expuesto aquí, el fallo de tantos diques verticales en el

primer tercio del siglo XX; salvo al reflexionar sobre la evolución del conocimiento del oleaje, realmente mal conocido y peor evaluado entonces.

IV.

Las diferencias en el comportamiento de unas obras marítimas respecto de otras son muy aparentes, al punto de haberse generalizado la tipología de obras rígidas y deformables para referirse a los dos extremos o paradigmas de comportamiento resistente frente a la acción del oleaje caracterizado por su altura de ola. Las primeras serían las que resisten hasta una altura de ola ante la que fallan y quedan totalmente fuera de servicio. Las últimas dan señales de debilidad e inician su destrucción a partir de una altura de ola pero se mantienen en servicio, incluso para olas mayores hasta otra superior, ante la que su destrucción total sólo es cuestión de tiempo.

Ciertamente se trata de un esquema con dos comportamientos límites frente a una acción del mar, simplificada a un único agente, el oleaje, con una única variable significativa, la altura de ola de cálculo. La acción del mar es realmente más compleja, incluso el oleaje tiene más de una variable significativa, en la respuesta de las obras se conjugan además complejos conjuntos de factores que le dan fuerte aleatoriedad, y no puede hablarse en general de fallo total, brusco e instantáneo. Pero sí puede hablarse en general de la rotura o fallo funcional diferido y progresivo. Y sí puede decirse que los diques de escollera constituyen el paradigma de esta forma de respuesta funcional y resistente.

Podría pensarse en una cierta naturaleza sacrificial de estas obras, los diques de escollera, por su comportamiento, y eso se corresponde con la aparición de daños en ellos con facilidad pero con una permanencia en servicio, en cierto porcentaje de eficiencia al menos, incluso tras daños importantes, por lo cual las formulaciones de la estabilidad, incluso incluyendo varias variables, quedan subordinadas al análisis de riesgo correspondiente, en función de los niveles de confianza de los valores de aquellas; tanto de las acciones como de los de las variables respuesta.

La intuición de que los diques de escollera, en su manto principal resistente al oleaje, se comportan como un sistema granular puede considerarse una obviedad, pero Iribarren la elevó a categoría específica definidora del problema al ponerla de hecho en un lugar central de su formulación de la estabilidad. Desde entonces la atención se extendió desde el tamaño y la densidad de las piezas del sistema granular a la forma y demás caracteres texturales de las mismas. Aspectos de los sistemas granulares tradicionalmente reservados a los problemas geotécnicos, con su enorme diversidad de «variabilidades», pasaron a tratarse como discernibles en el análisis de la estabilidad de los taludes frente al oleaje.

Y como ya se estaba en profundidades importantes, bajo energías mayores, y sin posibilidades de piezas naturales de peso y textura suficiente, de la prefa-

bricación de los bloques, al fin y al cabo producto de la imitación de los de algunas canterías cantábricas, se pasó a la de nuevas piezas de formas con más altos factores de «encaje» y de «superficie específica». La limitación que impone la fragilidad es intuitiva en este proceso. Y la fragilidad pone en riesgo la estabilidad al reducirse no sólo ambos factores, sino también el peso unitario de las piezas resultantes en el manto en caso de fractura.

Menos intuitiva pudo ser la ulterior comprobación de que los esfuerzos y las tensiones en determinadas secciones de tales piezas no cumplieran las leyes de escala, así como, aunque no tanto, de que tales piezas sufrieran los asientos en forma más acentuada y frágil que los bloques tradicionales o que la escollera natural, lo que a la postre aumentara los riesgos de fracturas y, también, los de pérdida de estabilidad de la capa resistente y protectora del manto.

Es entonces cuando se hace fuerte la percepción de que existen muchas razones para tomar en consideración la variabilidad de las respuestas resistentes del manto principal como un elemento solidario: variabilidad por la colocación, tamaño y estructura conjunta, y variabilidad por la propia heterogeneidad de cada pieza como elemento resistente individual. Siempre hablando a igualdad de los factores dinámicos, por supuesto.

Pero la consideración de los asientos conduce a introducir en la formulación de la respuesta resistente un conjunto de variables que se generan en el análisis del comportamiento del resto de la estructura de los diques: cimiento, núcleo, mantos secundarios, etc., incluso los del espaldón y de su encaje en el manto. Hay razones entonces para plantearse la estabilidad de los diques «de escollera» bajo la perspectiva del análisis multivariado, a la que Suárez Bores ha contribuido tanto. Se argüerá que una aplicación sistemática de esa metodología de análisis es muy compleja y difícil de esquematizar aún para su aplicación común. Y también que, a la postre, la inmensa mayoría de las obras y de los diques de escollera no requieren en la práctica de tal finura de análisis de riesgos. Y que bastará con progresos en esa línea, como los que representaran la ROM 0.0 y su secuela en marcha bajo el impulso de Losada. Pero es conocida la prevención (¿sería mejor decir incomodidad o aun rechazo?) que genera por ahora dicha norma entre los ingenieros *prácticos*, y aún en los más *teóricos*.

De ahí que una discusión como la que se ofrece en este libro sobre fórmulas concretas de variables precisas (aunque no se ignora su variabilidad y sus consecuencias en el análisis de riesgo) además de permitir una penetración en los fenómenos, que siempre será importantísima, servirá para un primer diseño, en muchos casos el último y definitivo, de los diques de «escollera».

J. JAVIER DíEZ

Profesor Catedrático de Puertos y Costas,

y de Oceanografía e Ingeniería de Costas.

Universidad Politécnica de Madrid, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Introducción

Este libro está dedicado a exponer y evaluar las bases de las principales fórmulas de estabilidad de los diques de escollera, y de los métodos de determinación del oleaje de cálculo. Con un doble objetivo: Por un lado dar servicio a los ingenieros volcados en la práctica, orientándoles en la tarea de elegir metodología. Por otro lado, atender a los estudiantes de ingeniería marítima facilitándoles una visión global del proceso de la confección y el uso de las fórmulas de estabilidad y de los métodos de previsión del oleaje de cálculo. Para exponer las fórmulas se ha elegido hacer una descripción histórica de su génesis, su evolución, y sus relaciones mutuas, porque este enfoque es a juicio de los autores el más adecuado para los objetivos planteados.

No es habitual en los libros sobre diques de escollera centrar el análisis en las bases elementales de los sistemas de cálculo, y en ese sentido este libro puede verse como complementario de otros que se centran en describir *in extenso* la variedad existente de propuestas de fórmulas para unos y otros casos particulares.

Posiblemente no haya otra clase de obra pública que se vea más afectada por averías frecuentes y destrucciones que los diques rompeolas. Esto ha venido ocurriendo tanto con la subclase de los diques de tipo rígido como con la de los diques de tipo granular, o «de escollera», a la que va dirigido este libro. Las carencias de los sistemas de cálculo de los diques rompeolas, y en particular de los diques de escollera, son mucho mayores de las que tienen los sistemas que se emplean para otros tipos de grandes obras públicas. Las fórmulas para el cálculo resistente de los diques de escollera son simples si se las compara, por ejemplo, con los sistemas analíticos que se emplean en las ingenierías de presas y de puentes. Esa simplicidad comparativa no se debe a que los fenómenos a tratar sean más sencillos, sino a todo lo contrario. Los fenómenos son tan complejos, y tan deficientemente conocidos, que hasta ahora sólo se han elaborado para el comportamiento resistente de los diques unos modelos conceptualmente rudimentarios que ignoran o tratan muy groseramente buena parte de la fenomenología real. Por tanto, queda por delante un amplio trabajo de mejora de los modelos actuales, uno de los más interesantes campos de investigación para la ingeniería de las obras públicas en el futuro próximo.

Con toda generalidad, la manera con que han afrontado hasta ahora esta realidad los organismos técnicos oficiales ha sido desaconsejar el empleo de las fórmulas de resistencia excepto como orientación muy amplia para los prediseños, y prescribir la necesidad de ensayar cada dique en un modelo físico para determinar su diseño estructural. Sin embargo, en la práctica muy pocos de los diques de las categorías medianas y pequeñas se proyectan empleando modelos físicos en tanques de oleaje.

La gran mayoría de los diques de pequeño y mediano tamaño se proyecta sin utilizar modelos físicos, porque quienes encargan los proyectos no admitirían los costes y el tiempo que requiere ensayar suficientemente un dique en tanque de oleaje. La práctica rutinaria, desde que las fórmulas de estabilidad existen, es proyectar estructuralmente los medianos y pequeños diques de escollera a partir de esas fórmulas.

Tal como se entregan las fórmulas a los ingenieros que deben usarlas, estos tienen pocas posibilidades razonables de evaluarlas profesionalmente, excepto realizando por su cuenta un trabajo arduo de contraste y profundización. Es una tarea muy complicada y difícil para, por ejemplo, las pequeñas y medianas empresas de consultoría que realizan habitualmente los proyectos de pequeños y medianos diques. Más aún cuando en muchos lugares las empresas o los ingenieros consultores que reciben los encargos de proyectar diques no están, ni pueden estar, especializados en obras marítimas, porque trabajan en una variedad amplia de tipos de obras de ingeniería dentro de un ámbito geográfico restringido.

Además del problema de la elección de fórmula de estabilidad, está el problema no menos crítico de elegir el «oleaje de cálculo». Su papel en los resultados de cualquier fórmula de estabilidad que se emplee es determinante. También es el ingeniero proyectista quien debe responsabilizarse de esta elección, que está inmersa en un ámbito de problemas no menos extenso y complejo que el de las fórmulas de estabilidad. Para enfrentar este tipo de problemas, el ingeniero no tiene siquiera recurso a conseguir unos ensayos en modelo reducido, como ocurre en el ámbito de las fórmulas de estabilidad, porque ese recurso no existe. Se ha dedicado un capítulo relativamente largo a este tema.

El tipo de propuestas de cálculo de diques que se está generando desde el programa MAST de la Comunidad Europea, propuestas que han sido asumidas oficialmente en España en la última versión de las *Recomendaciones para Obras Marítimas* (ROM 0.0), centra su esfuerzo propositivo en el uso estadístico de las fórmulas de estabilidad y de los métodos de previsión del oleaje, conjuntamente, para obtener resultados racionales por medio de un análisis teóricamente riguroso del riesgo. Pero, al margen del debate sobre la corrección formal de las propuestas probabilísticas del MAST, en el nivel previo de la elección y uso de una fórmula de estabilidad en cada caso, y de una metodología de estima del oleaje de cálculo, hay problemas considerables que los proyectistas de diques deben conocer a fondo para tomar decisiones juiciosas.

Contenido del libro por capítulos:

- En el Capítulo 1 se describen la génesis y la estructura de unas fórmulas que han sido escogidas por razones de su importancia teórica o práctica. Se comienza con algunas fórmulas que pertenecen al ámbito de la dinámica sedimentaria, pero que tienen interés como antecedentes o como referentes para las fórmulas de la resistencia de las escolleras. Las fórmulas de estabilidad de los mantos de escollera han sido ordenadas según su secuencia temporal de publicación. Se describen sus relaciones mutuas, y se examinan las condiciones de la elaboración de cada una para valorar sus fortalezas y debilidades.
- El Capítulo 2 está dedicado a la aplicación de las fórmulas. Trata de los parámetros de oleaje que hay que suministrar a las fórmulas, de la información existente sobre la incidencia oblicua del oleaje, y de los lugares singulares de los diques como codos y morros.
- En el Capítulo 3 se comparan los resultados de las diferentes fórmulas. En primer lugar se las compara de la manera más general que permiten las formas de sus parámetros principales. En segundo lugar se las compara en condiciones más limitadas que permiten aislar variables de especial interés, lo que sirve para examinar el comportamiento de las fórmulas en relación con esas variables.
- El Capítulo 4 trata de la obtención del oleaje de cálculo para emplear en las fórmulas de estabilidad de los diques. Los parámetros que definen el oleaje en las fórmulas (cierta altura característica de las olas, y a veces también cierto periodo característico) tienen una importancia determinante en los resultados de esas fórmulas, debido a lo cual es imprescindible analizar la fiabilidad de las estimas de oleaje que se obtienen con los datos y la metodología disponibles.
- El Capítulo 5 se dirige a plantear conclusiones para el uso práctico de las fórmulas como consecuencia de los análisis parciales que se hicieron en los capítulos anteriores. El capítulo comienza con una reseña sobre el estado deficiente de la seguridad estructural del conjunto de diques de escollera construidos en el pasado más o menos reciente. Esta parte tiene la función de advertir contra el empleo poco riguroso, poco crítico, o poco informado, de la metodología que está en uso para el cálculo estructural de los diques. Las fórmulas de la estabilidad del manto defensivo son el corazón del sistema de cálculo del dique. Como consecuencia de lo que se expuso anteriormente, se recomiendan maneras razonablemente conservadoras de emplear aquellas fórmulas.

Muchas gracias al ingeniero de Caminos Antonio Sarabia por su detenida revisión crítica del texto, y a él y a los también ingenieros de Caminos Javier Díez (profesor de la Universidad Politécnica de Madrid), y Jose M.^a Jofré, por sus sugerencias para mejorar la exposición.

— *Altura de ola*

Para las fórmulas de Van der Meer y Melby-Hugues, que están taradas con oleaje irregular, la altura de ola que se introduce en las fórmulas es H_s ; mientras que para las fórmulas de Iribarren, Hudson, y Losada-Giménez, taradas con oleaje regular, se ha empleado $H_{1/10} = 1,27 H_s$ (véase apartado 2.1). En la práctica esto supone multiplicar por $1,27^3 = 2,05$ el peso de los elementos que darían estas tres fórmulas si se empleara en ellas H_s .

— *Densidad*

Escollera: $\rho_s = 2,8 \text{ Tn/m}^3$; $\Delta = 1,73$

Piezas artificiales: $\rho_s = 2,5 \text{ Tn/m}^3$; $\Delta = 1,44$

— *Pesos máximos de los elementos del manto*

Escollera: Es raro que se puedan obtener en las canteras materiales para hacer mantos de pesos medios superiores a 10-15 Tn.

Bloques: En la costa española del Cantábrico se han puesto mantos de bloques de hasta 150 Tn.

Tetrápodos: En el Mediterráneo se han puesto mantos de tetrápodos de hasta cerca de 60 Tn.

• **Fórmula de Iribarren**

$$P = 2,05 N_a \frac{\rho_s}{\Delta^3} H^3 \frac{1}{(f \cos \alpha - \text{sen } \alpha)^3}$$

• **Fórmula de Hudson**

$$P = 2,05 \frac{\rho_s}{\Delta^3} H^3 \frac{1}{K_d \cot \alpha}$$

• **Fórmula de Losada-Giménez**

$$P = 2,05 \frac{\rho_s}{\Delta^3} H^3 A \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} - 2.654 \tan \alpha \right) e^{B \left(\frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} - 2.654 \tan \alpha \right)}$$

Condiciones críticas o pésimas

$$P = 2,05 \frac{\rho_s}{\Delta^3} H^3 \left(-\frac{A}{B e} \right)$$

• **Fórmula de Van der Meer**

ESCOLLERA ($P_{or} = 0,5$)

Olas rompiendo sobre el dique *en cascada*

— $N = 1.000$

$$P = 0,03657 H^{2,25} T^{1,5} S^{-0,6} \tan \alpha^{1,5}$$

— $N = 5.000$

$$P = 0,05928 H^{2,25} T^{1,5} S^{-0,6} \tan \alpha^{1,5}$$

Olas rompiendo sobre el dique *en surgiente*

— $N = 1.000$

$$P = 2,348 H^{3,75} T^{-1,5} S^{-0,6}$$

— $N = 5.000$

$$P = 3,805 H^{3,75} T^{-1,5} S^{-0,6}$$

Condiciones críticas o pésimas (olas rompiendo en el límite *cascada-surgiente*)

— $N = 1.000$

$$P = 0,293 H^3 S^{-0,6} \tan \alpha^{0,75}$$

— $N = 5.000$

$$P = 0,475 H^3 S^{-0,6} \tan \alpha^{0,75}$$

BLOQUES CÚBICOS

Específicamente para el talud $\tan \alpha = 0,66$ (averías nulas)

$$P = 0,732 H^{3,3} T^{-0,6}$$

TETRÁPODOS

Específicamente para el talud $\tan \alpha = 0,66$ (averías nulas)

$$P = 1,0438 H^{3,6} T^{-1,2}$$

- **Fórmula de Melby-Hughes**

ESCOLLERA ($Por = 0,5$)

Olas rompiendo sobre el dique *en cascada*

— $N = 1.000$

$$P = 0,05033 \frac{H_s^{3,539}}{4,0774^{(1,142 H_s^{-0,391})}} T_m^{(2,284 H_s^{-0,391})} (\tan \alpha)^{1,5} S^{-0,6}$$

— $N = 5.000$

$$P = 0,0815 \frac{H_s^{3,539}}{4,0774^{(1,142 H_s^{-0,391})}} T_m^{(2,284 H_s^{-0,391})} (\tan \alpha)^{1,5} S^{-0,6}$$

Olas rompiendo sobre el dique *en surgiente*

— $N = 1.000$

$$P = 0,05033 \frac{H_s^{3,539}}{4,0774^{(1,142 H_s^{-0,391})}} T_m^{(2,284 H_s^{-0,391})} L_m^{-0,5} S^{-0,6}$$

— $N = 5.000$

$$P = 0,08157 \frac{H_s^{3,539}}{4,0774^{(1,142 H_s^{-0,391})}} T_m^{(2,284 H_s^{-0,391})} L_m^{-0,5} S^{-0,6}$$

Condiciones críticas o pésimas (olas rompiendo en el límite superior *cascada-surgiente*)

— $N = 1.000$

$$P = 0,05027 H_s^{3,039} \left(\frac{\tanh \left(\frac{2\pi h (-0,0035 \cot \alpha + 0,028)}{H_s} \right)}{\frac{H_s}{(-0,0035 \cot \alpha + 0,028)}} \right)^{-1,566 H_s^{-0,5865}} (\tan \alpha)^{1,5} S^{-0,6}$$

$$P = 0,08148 H_s^{3,039} \left(6,36 \frac{\tanh \left(\frac{2\pi h (-0,0035 \cot \alpha + 0,028)}{H_s} \right)}{\frac{H_s}{(-0,0035 \cot \alpha + 0,028)}} \right)^{-1,566 H_s^{-0,5865}} (\tan \alpha)^{1,5} S^{-0,6}$$

— $N = 5.000$

3.3. Comparaciones

3.3.1. Generalidades

En la serie histórica de fórmulas que se ha visto en el Capítulo 1 se aprecia un aumento progresivo del número de variables.

Hasta la fórmula de Hudson las variables explícitas eran tres: La altura de ola en primer lugar como variable dominante. En segundo lugar el talud del dique. Y en tercer lugar la densidad de los materiales del manto defensivo, variable ésta que en la práctica es la que menos varía de todas, por lo cual se la suele representar en el eje de ordenadas acompañando al peso de los elementos. La fórmula de Losada-Giménez añade a las anteriores variables la longitud de onda, la fórmula de Van der Meer incorpora además un «factor de porosidad» y un «número de olas del temporal», y la de Melby-Hughes incluye todas las anteriores más la profundidad al pie del dique.

No es que los autores de las primeras fórmulas fueran inconscientes de la relevancia de las variables adicionales que los autores posteriores han ido incluyendo explícitamente en sus fórmulas. Una buena prueba de que eran conscientes es la larga lista de variables pertinentes que planteó Hudson en el artículo de exposición de su fórmula (véase apartado 1.5.2). Pasarán muchos años hasta que aparezca alguna fórmula que dé cuenta explícitamente y con solvencia de todas esas variables. Naturalmente los autores de cada fórmula trataron en su momento de sacar el máximo partido de la teoría y de los ensayos disponibles para dar cabida explícita al mayor número de variables posible, lo que han conseguido con mayor o menor acierto según los casos. En cuanto a las variables que no han podido ser incorporadas explícitamente, se las ha venido considerando atendidas implícitamente en los coeficientes de proporcionalidad obtenidos en los ensayos. Esto último restringe el uso de las fórmulas al ámbito concreto de las condiciones de los ensayos que fueron empleados para tarar los coeficientes de la fórmula en cuestión.

Lo más notable del proceso de matización de las fórmulas de estabilidad ha sido la incorporación de la longitud de onda por Losada-Giménez, Van der Meer y Melby-Hughes, siguiendo todos la propuesta de P. Bruun de emplear

para ello el *número de Iribarren*. Siendo así que el *número de Iribarren* $Ir = \tan \alpha / \sqrt{H/L}$ engloba a H y $\tan \alpha$ además de L , el papel específico de L en la fórmula de estabilidad así matizada no resulta inmediatamente evidente. Estas fórmulas han puesto de relieve que el peso de los elementos resistentes tiene un máximo para ciertas combinaciones de valores de H , L , $\tan \alpha$. A un lado del máximo las olas rompen sobre el dique *en cascada* o rotura franca, y al otro rompen *en surgiente* o falsa rotura. En la fórmula de Losada-Giménez el máximo describe una curva exponencial relativamente suave, en la de Van der Meer el máximo es muy apuntado, y en la de Melby-Hughes el máximo presenta un salto brusco. Esta secuencia significa un modelado cada vez más crítico de la transición de la curva de estabilidad entre la rotura *en cascada* y *en surgente*. Pero en todos los casos encontramos que, cuando se emplea la fórmula en las condiciones críticas o pésimas, desaparece L de la ecuación y ésta queda reducida a una forma simple muy parecida a la fórmula de Hudson.

Las fórmulas de Iribarren y de Losada-Giménez están taradas con los mismos ensayos, que son los de Iribarren. Para escollera los ensayos de Iribarren corresponden a un manto de tres cantos de espesor, cuya estabilidad es mayor que la del manto de dos cantos que emplearon Hudson y Van der Meer en sus ensayos. Melby-Hughes también emplearon datos de mantos de dos cantos de espesor. Esto ayuda a explicar los valores menores del peso de los cantos que dan las fórmulas taradas con los ensayos de Iribarren. Al margen de esto, Losada (apartado 1.6.3) ha señalado que las diferencias entre las técnicas experimentales de Iribarren y Hudson implican que los ensayos de Hudson dan mayores pesos que los de Iribarren para los mismos casos. Ha sido práctica tradicional en España emplear mantos de tres cantos de espesor. El tiempo ha demostrado que esa elección fue más prudente que los mantos de dos cantos, los cuales en las averías son más susceptibles a dejar al descubierto la capa-filtro interior, por lo cual han sufrido más daños en un contexto histórico de infravaloraciones sistemáticas del oleaje de cálculo.

En las figuras que siguen se comparan las fórmulas de Iribarren, Hudson, Losada-Giménez, Van der Meer, y Melby-Hughes, estas tres últimas en condiciones críticas o pésimas. En algunos casos faltan fórmulas en la comparación por no haber datos de esas fórmulas para las condiciones que se comparan.

De las comparaciones presentadas en las Figuras 3.1 a 3.7 destacan los siguientes aspectos:

- La fórmula de Losada-Giménez en condiciones críticas se descuelga por debajo de todas las demás, dando valores del peso de los elementos notablemente inferiores a las otras en todas las comparaciones.
- Comparaciones con $N = 1.000$ (aproximadamente el número de olas que empleó Hudson en sus ensayos):

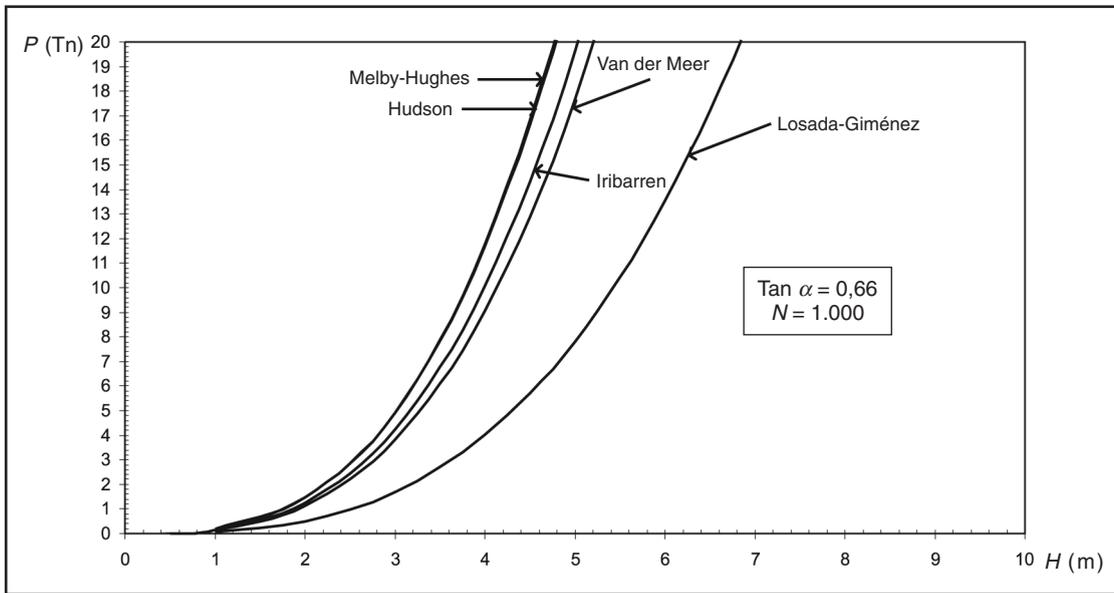


Figura 3.1. Mantos de escollera con filtro y todo uno. Iribarren y Losada-Giménez (condición crítica) 3 capas. Hudson, Van der Meer (condición crítica) y Melby-Hughes (condición crítica) 2 capas. ($Por = 0,5$; $N = 1.000$; $S = 2$; $\Delta = 1,73$; $\rho_s = 2,8$). Melby-Hughes ($h = 40$ m).

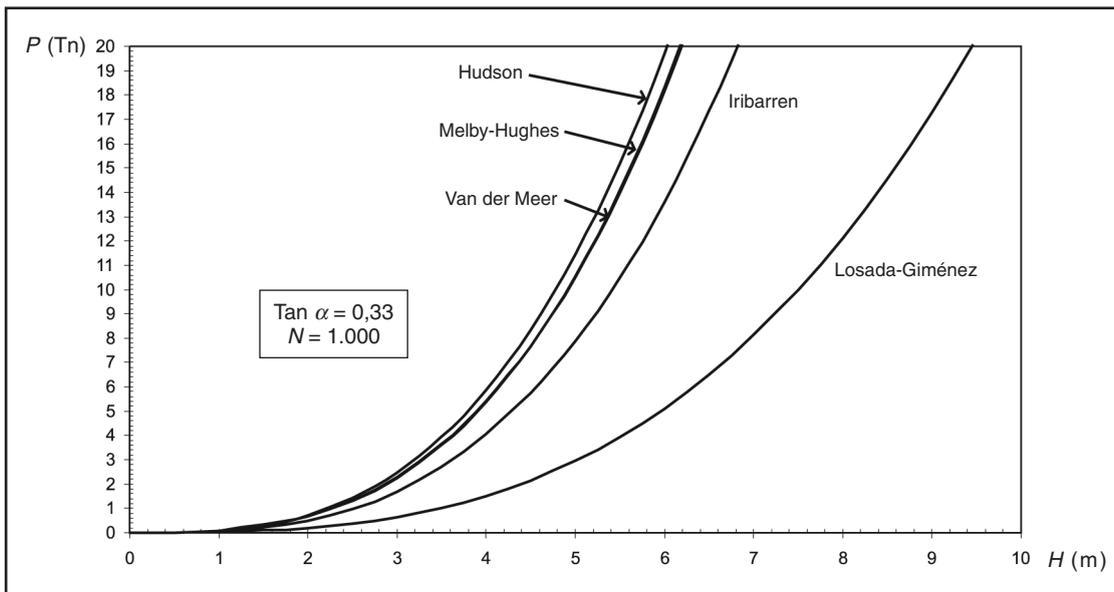


Figura 3.2. Mantos de escollera con filtro y todo uno. Iribarren y Losada-Giménez (condición crítica) 3 capas. Hudson, Van der Meer (condición crítica) y Melby-Hughes (condición crítica) 2 capas. ($Por = 0,5$; $N = 1.000$; $S = 2$; $\Delta = 1,73$; $\rho_s = 2,8$). Melby-Hughes ($h = 40$ m).