

10

INGENIERÍA MARÍTIMA Y PORTUARIA:
MODELIZACIÓN vs INSTRUMENTACIÓN

D. José Luis Almazán Gárate

Dr. Ingeniero de Caminos, Profesor Titular ETSI U.P.M.

D. Eric Iribarren Lasconateguy

Ingeniero de Caminos, U.P.M.



D. José Luis Almazán Gárate

*Dr. Ingeniero de Caminos
Profesor Titular ETSI U.P.M.*

Funcionario por oposición del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, del antiguo Ministerio de Obras Públicas, habiendo estado destinado en la Dirección General de Puertos y Costas y el Centro de Estudios de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente.

Ha sido Director de Cooperación Técnica y Secretario General de la Empresa Pública, SECEG, S.A., encargada de realizar los estudios de factibilidad del enlace fijo Europa - África a través del Estrecho de Gibraltar.

Ha sido Vicepresidente del Consorcio Europeo para el Programa Internacional de Perforación de los Océanos (Ocean Drilling Program).

Ha sido Director Facultativo de las obras del tramo submarino del Gasoducto del Magreb, bajo las aguas del Estrecho de Gibraltar.

Es Profesor Titular de Universidad de Puertos y Costas e Ingeniería Portuaria, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.



D. Eric Iribarren Lasconateguy

Ingeniero de Caminos

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad Politécnica de Madrid, especialidad de Transportes, Promoción 2006, actualmente elaborando la tesis doctoral sobre Diques Verticales.

Desde el año 2006, desarrolla su labor profesional como ingeniero superior en la empresa Almazán Ingenieros, periodo durante el cual:

Ha intervenido en varios de estudios y proyectos relacionados con la ingeniería de puertos y costas, y con la ingeniería civil en general.

Ha trabajado como investigador de I+D, en la Fundación Agustín de Betancourt (E.T.S.I de Caminos, Canales y Puertos) y en la Oficina de Transferencia Tecnológica (Universidad Politécnica de Madrid).

Ha recibido, como miembro del equipo redactor de la propuesta DORNA, un Premio Accesit en el “Concurso Público Internacional de Ideas Para el Proyecto de Ordenación Urbanística y Arquitectónica del Área Central del Puerto de Vigo”, convocado por la Autoridad Portuaria de Vigo. 2007, y un segundo premio en el concurso “Estación marítima y ordenación de zonas anexas en el Cos Nou (puerto de Mahón)” por la propuesta Llaüt.

También ha sido profesor en Cursos de Postgrado impartidos por la Universidad Politécnica de Madrid en materia de puertos y costas.

10 • INGENIERÍA MARÍTIMA Y PORTUARIA: MODELIZACIÓN vs INSTRUMENTACIÓN

D. José Luis Almazán Gárate

Dr. Ingeniero de Caminos, Profesor Titular ETSI U.P.M.

D. Eric Iribarren Lasconateguy

Ingeniero de Caminos, U.P.M.

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo trata de poner en evidencia la necesidad de seguir instrumentando en naturaleza o a muy grandes escalas para llegar a concretar de forma definitiva el comportamiento estructural y la respuesta a las sollicitaciones de diques verticales constituidos por cajones.

Como elemento adicional se plantea la consideración de la información recogida, ordenada y en fase de tratamiento avanzado, de los datos procedentes de la instrumentación de dos cajones del dique de Botafoch, en la Autoridad Portuaria de Ibiza.

II. TEORÍA Y EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO DE SOLICITACIONES DEBIDAS AL OLEAJE

Las dos vías de desarrollo de conocimientos sobre el fenómeno del comportamiento de un dique de cajones (estabilidad, sollicitaciones, movimientos, rebases) se desarrolla fundamentalmente a través del estudio teórico de los efectos evidenciados en ensayos en modelo físico, sujetos fundamentalmente a la ley de semejanza de Froude y a los inevitables efectos de escala, que en este caso se muestran determinantes a la hora de cuantificar los efectos observados, fundamentalmente en el caso más importante de las llamadas “presiones impulsivas” sobre paramentos verticales. Otros estudios, como la aireación de la masa de agua, no son posibles en estudios a escala reducida, debido a esos efectos de escala, en la aplicación de la ley de semejanza.

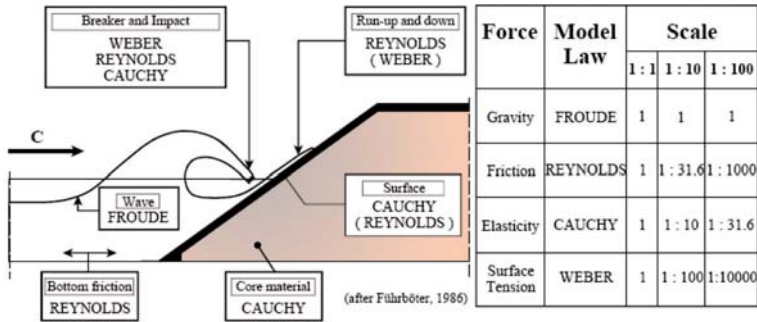


Figura 1:
Efectos de escala en la modelización del fenómeno de ataque de la ola y respuesta de diques (Oumeraci, HIDRALAB II. EU Thematic Network .Budapest meeting 2003)

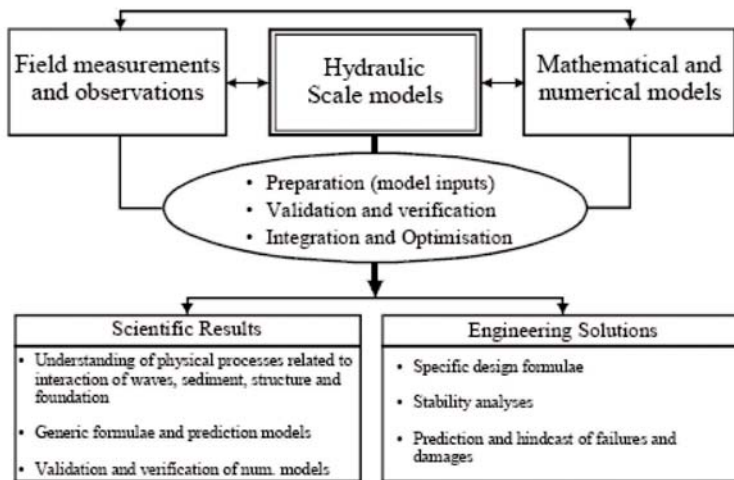


Figura 2:
Planteamiento genérico de los objetivos y soluciones a definir en el ensayo en modelo de una estructura marítima como elemento de investigación y diseño. (Oumeraci, Hidralab II, op. cit)

El papel que juega la instrumentación en laboratorio de modelos a escala reducida , único procedimiento posible hasta hace poco tiempo (y que incluye estudios en los modernos canales para grandes escalas del modelo estructural) contrasta con las nuevas posibilidades que las técnicas de telecontrol, comando remoto de experimentos, capacidad de almace-

namiento de datos y potencia de tratamiento “in situ” ofrecen al instrumentador en naturaleza, conjuntamente con el avance que los sensores y la técnica de su aplicación segura y fiable a la estructura en estudio han desarrollado a partir del auge creciente de estas metodologías de ensayo, investigación y comprobación y seguimiento de estructuras ya construidas.

El fenómeno físico de la oclusión de aire como determinante de las variaciones observadas entre ensayos en modelo y prototipo. Caso de las altas presiones de impacto o “presiones impulsivas”.

Los eventos impulsivos involucran necesariamente los efectos de compresión del aire ocluido durante momentos cortos, lo cual reduce la fuerza de impacto. Este proceso no se escala ni con las leyes de semejanza de Froude ni con Cauchy, y las diferentes fases correspondientes a los fenómenos de compresión-expansión se escalan de forma diferente (Allsop et al. 1996, Howarth et al. 1996).

El problema se complica con las diferentes cantidades de aire ocluido y con las características de agua dulce o salina. En términos del modelo físico la compresibilidad del agua se reduce en términos absolutos y relativos. Esto lleva a unas señales de impacto mucho más picudas, de mayor magnitud y menores tiempos de subida en el modelo, para leyes de semejanza de Fraude, que son las usualmente utilizadas en experimentación en laboratorio. Los estudios desarrollados para diques en talud muestran una sobre estimación de las fuerzas impulsivas de un 200% usando este modelo de semejanza de Froude (Allsop et al 1995, 1996, Howarth et al, 1996). Oumeraci et al. (1999,2001) muestran que los procesos de corrección de escala son complejos y que la mejora de la fiabilidad de los ensayos debe ser obtenida mediante ensayos a grandes escalas cercanas a prototipo

Así establecido, la sobreestimación de fuerzas impulsivas por la utilización de la semejanza de Fraude a escalas demasiado pequeñas de modelo, resulta de una combinación de factores:

- El contenido de aire en el agua de mar en prototipo es significativamente mayor que en agua dulce a la escala del modelo
- La compresión del aire o de la mezcla agua/aire, particularmente en prototipo es un proceso altamente alineal controlado principalmente por un parámetro físico, la presión existente, que no se escala correctamente en modelo.
- La estructura del modelo es menos rígida que la de prototipo. Este es un efecto raramente considerado en laboratorio y se presta muy poca atención a reducir convenientemente esta rigidez en la construcción de un modelo reducido

Las cargas impulsivas se caracterizan por una alta presión de impacto de una muy corta duración. Durante esta fase la velocidad característica del proceso es extremadamente grande. La presencia de incluso pequeñas cantidades de aire en esta fase influye de una forma muy grande en el proceso de carga. Durante la actuación de las impulsiones la compresión del aire origina un proceso altamente no lineal, para el cual las leyes de escalas estándar de modelización en laboratorio no se encuentran aceptables.

III. MODELOS DE LEYES DE PRESIONES

1 MODELO DE PRESIONES CLÁSICO DE GODA

Este modelo es el más ampliamente aceptado dentro de la comunidad científica, con las debidas correcciones debidas a Takahashi, para la consideración de las presiones impulsivas. Fundamentalmente se aplica a las presiones generadas por la cresta de la ola, y su utilización se basa en la consideración presentada en el llamado mapa paramétrico de McCornell (EU, PROVERBS, “Probabilistic Design of Vertical Breakwaters”, Op.Cit)

Las bases del modelo de Goda (Goda, 1985) son asumir una distribución de presiones sobre la cara expuesta y la base del cajón tal que al ser integradas sobre la cara frontal e inferior resulten las fuerzas equivalentes que son las que se incorporan en la formulación de coeficientes de seguridad, y las que provocan la aparición de momentos y esfuerzos externos al cajón, por la acción del oleaje. La formulación de Goda es la siguiente, tal y como se recoge en Goda (1967).

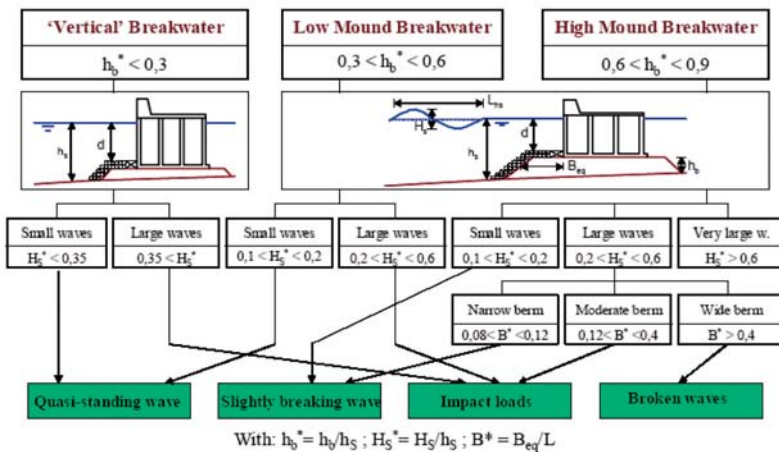


Figura 3:

Mapa paramétrico de MacCornell, particularizado para diques verticales, PROVERBS (op.cit)

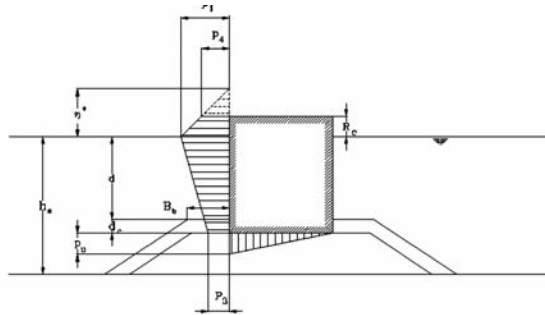
Donde η^* es la elevación sobre el nivel del mar y H es la altura de ola incidente frente a la estructura. Donde β es la oblicuidad relativa de ataque del oleaje respecto de la normal de alineación de la estructura, λ_1, λ_2 y λ_3 , son factores multiplicadores dependientes de la geometría de la estructura, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, son factores multiplicadores dependientes de las condiciones del oleaje y de la profundidad.

En el gráfico siguiente se muestran las formulas analíticas para calcular estos parámetros, en donde h es la profundidad de agua frente a la estructura. Todos estos parámetros pueden observarse en la figura Lp es la longitud de onda. d es la profundidad frente al cajón. d_c es la altura de la escollera de protección. R^*c es el mínimo del francobordo Rc y el remonte η^* . Cuando las presiones son conocidas, las fuerzas vienen dadas por las expresiones:

$$F_{h,Godá} = \frac{1}{2}(p_1 + p_4)R_c^* + \frac{1}{2}(p_1 + p_3)(d + d_c)$$

$$F_{u,Godá} = \frac{1}{2}p_u B_c$$

En donde B_c denota la base del cajón.



$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta)\lambda_1 H$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \beta) \rho g H$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos \beta)\lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \rho g H$$

In which:

H :

β :

ρ :

g :

$\alpha_1, \alpha^*, \alpha_3, \alpha_4$:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

incident wave height in front of the structure,

angle of incidence of the wave attack with respect to a line perpendicular to the structure,

density of the water,

acceleration of gravity,

multiplication factors dependent on the wave conditions and the water depth ;

multiplication factors dependent on the geometry of the structure.

Figura 4: Presiones en el modelo de Godá

Las distancias de las rectas de aplicación de estas fuerzas respecto al pie del intradós de la base del cajón vienen dadas por las expresiones:

$$l_{h,Goda} = d + d_c + \frac{R_c^{*2}(p_1 + 2p_4) - (d + d_c)^2(p_1 + 2p_3)}{3R_c^{*2}(p_1 + p_4) + 3(d + d_c)(p_1 + p_3)}$$

$$l_{u,Goda} = \frac{1}{3} B_c$$

1.1. Presiones sobre el espaldón

A partir de la Figuras I.B y I.C donde aparecen las presiones sobre el paramento se aísla la zona del espaldón y se distinguen dos situaciones. En la primera de ellas η^* es menor que R_c y por tanto p_4 toma el valor cero sobre el paramento vertical, ya sea en el espaldón o bajo este. En una segunda situación, η^* es mayor que R_c y por tanto p_4 no toma el valor nulo, sino que viene dado por la formulación anterior. Estas situaciones pueden apreciarse a continuación, donde aparece también la presión p_1 a la altura del nivel medio del mar.

1.2. Incertidumbres del modelo

Comparaciones del modelo con ensayos muestran que el modelo provoca una sobreestimación de las fuerzas del oleaje (Van der Meer et al, 1994). Esta diferencia puede ser tenida en cuenta introduciendo un factor f_m a las fuerzas originadas por el modelo de Goda, de acuerdo con la relación:

$$F_{design} = f_m \times F_{Goda}$$

Estos factores de modelo se consideraran normalmente distribuidos. Los parámetros de la distribución varían para las diferentes fuerzas según la tabla siguiente:

f_m	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
FUERZAS HORIZONTALES	0.9	0.2
MOMENTO DE LAS FUE. HOR.	0.81	0.37
FUERZAS VERTICALES	0.77	0.2
MOMENTO DE LAS FUE. VER.	0.72	0.34

Cuadro 1: Factores correctores del modelo de Goda

2 MODELO DE PRESIONES DE SAINFLOU

Sainflou propuso un método de predicción derivado de la teoría trocoidal. El método simplificado de Sainflou predice apropiadamente las fuerzas netas negativas producidas por oleaje estocástico.

En lo que se refiere a subpresiones, se supone una distribución triangular de presiones, con el máximo bajo el pie del trasdós y de valor igual al existente a esa profundidad en el paramento vertical.

2.1. Incertidumbres

La altura de ola asumida para el modelo de Sainflou es la altura de ola máxima. Se considerará que el efecto que produce la ola individual queda representado por la altura de ola máxima.

Por lo que se refiere a las incertidumbres del modelo, los tests realizados dentro del proyecto MAST III, PROVERBS (Allsop y Kortenhaus, 2001) han medido variaciones en el cociente entre las fuerzas medidas y las predichas por el modelo. En media, estas variaciones han sido de 1.126 con una desviación típica de 0.1508, con CV del 13% .

2.2. Modelo de presiones PROVERBS

El proyecto EU PROVERBS “ Probabilistic Design of Vertical Breakwaters” constituye la fuente básica de información para el conocimiento de los procesos que influyen el estado de diques verticales de abrigo, recogiendo las anteriores experiencias y formulando nuevas interpretaciones.

Dentro de este marco, las principales aportaciones del PROVERBS se han realizado en el estudio de las presiones del oleaje en las proximidades de su rotura.

3 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PROVERBS

El valor de p, i , max obtenido representa la presión ejercida por la cresta del oleaje rompiente. Este valor puede observarse en la figura siguiente:

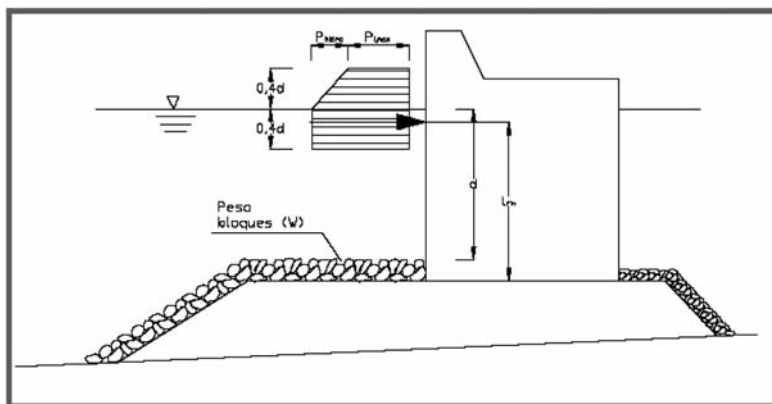
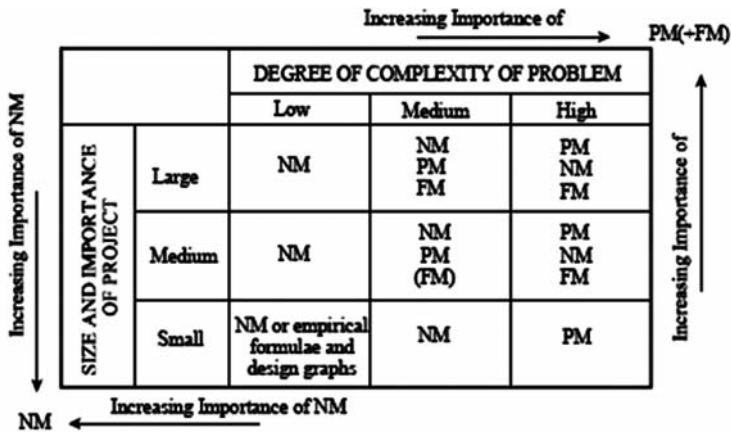


Figura 5: Distribución de presiones del modelo de rotura PROVERBS

IV. ENSAYOS A GRAN ESCALA.

La presencia permanente de los efectos de escala surgidos en la aplicación de la ley de semejanza correspondiente, exigida por la construcción de un modelo físico en laboratorio, la exigencia permanente de calidad y precisión que se busca en este tipo de ensayos, y la necesidad apremiante de cuantificar de la forma más correcta posible aspectos de diseño de cajones de diques verticales, como son las posibles fuerzas de tipo impulsivo surgidas del choque de la ola contra el paramento, han obligado a los laboratorios a la construcción de canales de ensayo que permitiesen, por sus dimensiones, el incremento de las escalas y la consiguiente reducción del error incorporado en la modelización. Como veremos, el paso siguiente – y aún simultáneo- ha sido la realización, siempre muy difícil y sujeta a muchos condicionantes y vicisitudes, de experimentaciones en prototipo, mediante la incorporación de diversas tipologías de sensores (especialmente para la medición de presiones, subpresiones y aceleraciones) en aquellos elementos estructurales susceptibles de aportar información válida y necesaria para el ingeniero (casos de ampliación de obras, comprobación de respuestas estructurales y coeficientes de seguridad, etc.). La visión conjunta de las posibilidades de acometer este tipo de investigaciones, incluyendo todas las herramientas con que cuenta el ingeniero para la determinación de las características de cálculo y respuesta de este tipo de obras, se proporcionan en el siguiente diagrama, claramente favorable a las instrumentaciones sobre el modelo real para casos en que la complejidad del problema supere a la de aquellos casos considerados como sencillos de resolución.

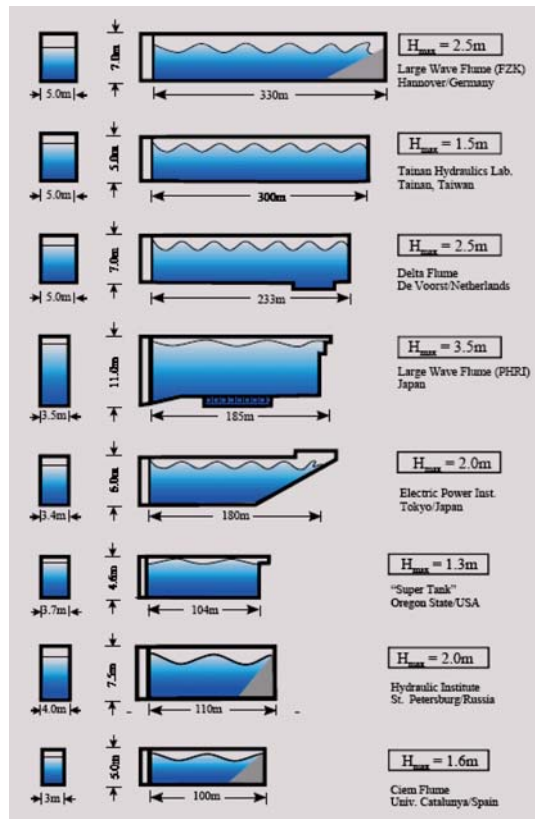


Cuadro 2. Rango de aplicabilidad de los diferentes tipos de estudios, modelo numérico NM, modelo reducido (modelo físico) PM y mediciones en campo (prototipo) FM. (h. Oumeraci, HYDRALAB II , 2003, op. cit.)

La casuística a la que se enfrentan los ensayos a grandes escalas son más bien debidas a la complejidad creciente que exige la magnitud y escala de los procedimientos y recursos de medida empleados. Sin embargo, aclararemos que la mayoría de condicionantes y problemas típicos de una instrumentación en la realidad no se dan aquí, al tratar siempre con condiciones de laboratorio perfectamente controladas, que optimizan las posibilidades para la obtención de datos de calidad.

Un ejemplo de las diversas medidas que laboratorios internacionales presentan para sus laboratorios de ensayo, se recoge a continuación a partir del croquis, que se presentó en HIDRALAB II, meeting 2003, op. cit.

Figura 6: Principales instalaciones (canales de oleaje) susceptibles de realización de estudios



de presiones sobre cajones de diques verticales, a lo largo de todo el mundo, superando la longitud de 100 m., junto con la altura máxima de ola que son capaces de reproducir en modelo para la obtención de la altura de ola en prototipo, multiplicar por la escala).

Puede observarse que estos canales están optimizados para trabajar con escalas del orden 1/10 a 1/25 de la estructura prototipo

A continuación se incluyen fotografías que muestran la espectacularidad

de los ensayos que se producen a escalas tan cercanas a prototipo, sobre todo en lo que se refiere a rebases sobre la estructura en estudio. Para los datos obtenidos, mención aparte de la reducción de los efectos de escala y la consiguiente obtención de resultados más ajustados a la realidad, las características de los datos se mantienen similares en forma y tipo a las obtenidas en ensayos con modelos más pequeños y en prototipo.

Figura 7: J.Grüne. HIDRALAB II meeting Budapest 2003



“LARGE-SCALE INVESTIGATIONS PERFORMED IN THE LARGE WAVE CHANNEL (GWK) BY EUROPEAN USER GROUPS

Los ensayos de medida de presiones realizados tienen como objetivo último la determinación de los coeficientes de seguridad que presenta actualmente la estructura y, de forma adicional, pretenden estimar su respuesta elástica e incluso acercarse a su comportamiento plástico en el cálculo de los desplazamientos permanentes.

Los resultados que se encuentran recogidos en las experiencias de laboratorio, a las diversas escalas ensayadas, muestran resultados como los que se recogen a continuación:

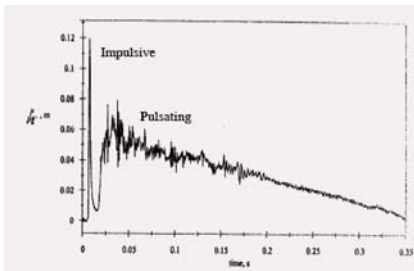
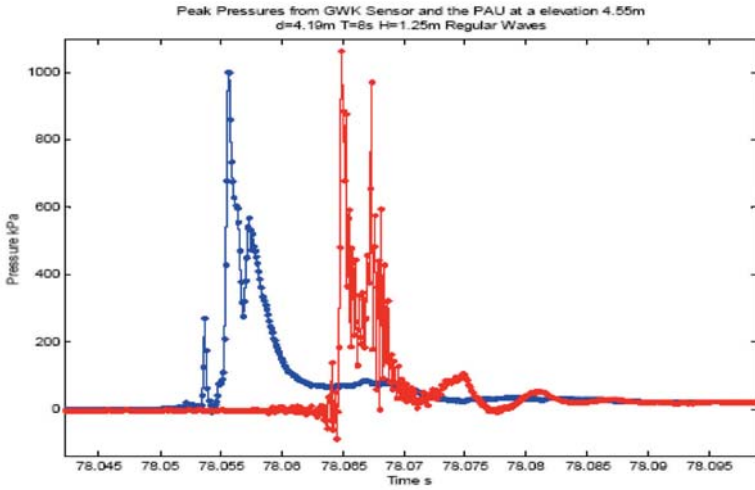


Figura 8: Evolución temporal de la presión sobre una escollera (Howarth et al. 1996)
 Figura 9: Ensayo de medida de presiones



sobre paramento vertical en el gran canal GWK de Hamburgo. HIDRALAB II meeting 2003, Budapest

El estudio directo de los movimientos que una determinada serie de acciones induce sobre el cajón (y no ya aceleraciones de impacto, sino más bien acelerogramas sísmicos en países sujetos a terremotos, como Japón), proporciona una idea del comportamiento de cajones bajo ensayos en modelo, con unas respuestas estructurales como las que se acompañan, donde se observan claramente las deformaciones remanentes y el número de ciclos de carga-excitación:

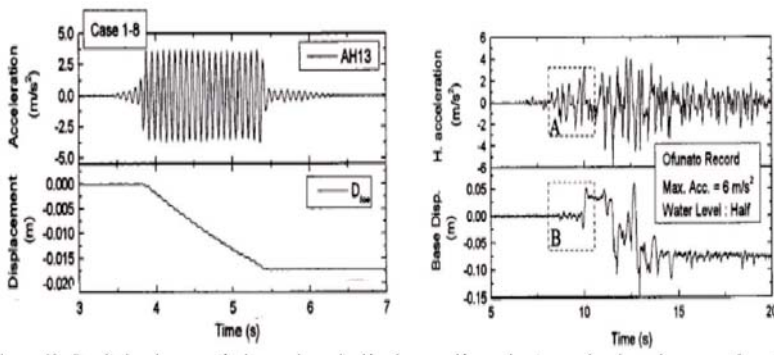


Figura 10: Resultados de mesa sísmica en la excitación de un cajón: series temporales de acelerograma de entrada, desplazamiento de la base y rotación del cajón

En estos casos el modelo estructural adoptado para la correcta representación de las inercias, rozamientos y viscosidades, donde la banqueta juega geotécnicamente un papel fundamental en su interacción suelo-estructura, viene a ser un modelo elasto-plástico viscoso.

Estos estudios se realizan sobre mesa sísmica, y son ajenos al régimen de aceleraciones impuesto por un oleaje en rotura, aunque la respuesta estructural del cajón a los acelerogramas indica mucho acerca de su comportamiento posible con el oleaje y su interacción con la banqueta, incluso en la búsqueda de efectos resonantes en la respuesta estructural del cajón

Los resultados obtenidos en los ensayos y la metodología utilizada para interpretar los movimientos resultantes coinciden con bastante aproximación, aunque los efectos del escalado es evidente que se mantienen e interaccionan para proporcionar solamente resultados aproximados a los que serían encontrados en prototipo.

V. INSTRUMENTACIÓN DE DIQUES VERTICALES EN ESPAÑA

La historia de la instrumentación de diques en España comienza con la instrumentación del Dique de la Dársena de los Llanos, en el Puerto de Santa Cruz de Tenerife (1988), instalación ésta que no produjo toda la información que se esperaba, pero que evidenció la utilidad de la instrumentación en prototipo de diques. A esta instrumentación siguieron: la del espaldón del dique de escollera del Puerto de Gijón, de la que se obtuvieron y presentaron algunos resultados; la del dique vertical Reina Sofía en el Puerto de las Palmas de Gran Canaria, que también produjo datos pero que no dio los resultados esperados y fue reinstrumentado en 2005; y las instrumentaciones de los diques de Punta Lucero y del nuevo Dique de Levante del Puerto de Málaga, este último reinstrumentado también en 2005. Así, la instrumentación de diques verticales en España, que comenzó hace 18 años con las lógicas dificultades de cualquier nueva empresa, no dio los resultados esperados en los primeros intentos.

En el año 2002, cuando no existía ninguna instrumentación de diques verticales en funcionamiento en España, el Sistema Portuario Español, a través de la Autoridad Portuaria de Baleares, se planteó una instrumentación para el nuevo dique vertical de cajones de Botafoc, en el Puerto de Ibiza, que resolviera las dificultades detectadas en las instrumentaciones anteriores y que avanzase en la concepción del propio sistema partiendo del desarrollo inicial. Tras el diseño inicial, al que se incorporaron aportaciones, además de las provenientes de Almazán Ingenieros, Drace y de la Autoridad Portuaria de Baleares. Se iniciaron los trabajos de instalación, que concluyeron en la primavera de 2003,

pudiéndose decir que la instrumentación de Botafoc era en ese momento la única instrumentación en el Sistema Portuario Español en servicio. Esta instrumentación se realizó con las mas modernas tecnologías disponibles en ese momento y presentaba, además de la medida de presiones y subpresiones, varias novedades en la concepción de la instrumentación de diques verticales: la medida de aceleraciones y giros del cajón; la medida de presiones en los tres paramentos del cajón en contacto con el agua; y un telecontrol en tiempo real de todos los parámetros de la instrumentación.

La instrumentación de Botafoc, gracias al esfuerzo conjunto de todas las personas, empresas e instituciones intervinientes, y con base en las experiencias anteriores, está conceptualmente en vanguardia de la instrumentación de diques a nivel mundial y, desde el año 2003, ha dado multitud de resultados técnicos, algunos de los cuales se introducen en este artículo, que dan pie a numerosas investigaciones, unas ya en curso y otras pendientes de realización.

VI. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS FRENTE A LOS DATOS RECOGIDOS

Para ilustrar la necesidad de investigar sobre datos recogidos en instrumentaciones de diques verticales se exponen a continuación un par de ejemplos de instrumentación en los que no se cumplirían las predicciones de los modelos anteriormente descritos.

1. DIQUE DE BOTAFOC (IBIZA)

El dique de Botafoc, construido en el año 2002, con orientación Sureste y cajones fondeados a la cota -19.50 m. Durante su construcción se



Figura 11: Dique de Botafoc. Puerto de Ibiza.

previeron alojamientos para instrumentar dos secciones idénticas en el cajón número ocho con el objetivo inicial de comprobar los coeficientes de seguridad al vuelco y deslizamiento del dique, y en un segundo estadio, desarrollar teorías que liguen las fuerzas actuantes sobre el dique con los movimientos reales del cajón.

En cada una de las secciones instrumentadas se instalaron doce sensores de presión y subpresión ubicados en los tres paramentos en contacto con el agua a diferentes cotas, tal y como se muestra en la figura 14, 7 sensores en el paramento vertical entre las cotas $-12,00$ m. y $+5,00$ m., 4 sensores de subpresión, y otro sensor adicional en el paramento abrigado y a cota $-4,00$ m. para medir la presión hidrostática real y de la eventual agitación interior presente en la dársena abrigada.

Además, y para registrar los movimientos sufridos en el cajón, se instaló en una de las secciones un sistema de medida totalmente independiente y autónomo del anterior, capaz de medir los movimientos angulares del cajón y sus aceleraciones en torno a los tres ejes cartesianos, reconstituyendo los seis grados de libertad que presenta el cajón en su movimiento como sólido rígido.

La instrumentación cuenta además con un perfilador del oleaje que permite determinar altura de ola, periodo y dirección del oleaje incidente.

El sistema completo, sensores de presión, sistema de medida de movimientos y aceleraciones y perfilador de oleaje, así como la descarga y procesamiento de datos se controlan de forma remota a tiempo real.

Como complemento de los sistemas descritos se instaló un sensor de presión atmosférica para evaluar la posible descalibración de los sensores de presión y subpresión instalados que, aunque miden la presión relativa (sobre la atmosférica) gracias a un tubo de venteo, pueden sufrir algún tipo de descalibración o de obstrucción en dicho tubo.

1.2. Leyes de presiones y subpresiones relativas sobre el cajón

Los datos de esta instrumentación se adquieren de forma continua, desde el año 2003 habiendo recogido una gran cantidad de información, y por tanto ofreciendo unos registros razonablemente fiables, de los que se obtienen leyes de presiones como la siguiente (en rojo) en contraste con los valores teóricos del modelo de Goda (en verde).

Incluso con los correspondientes coeficientes correctores, pueden observarse diferencias en la comparativa de los datos registrados frente al modelo de presiones de Goda, para una misma altura de ola.

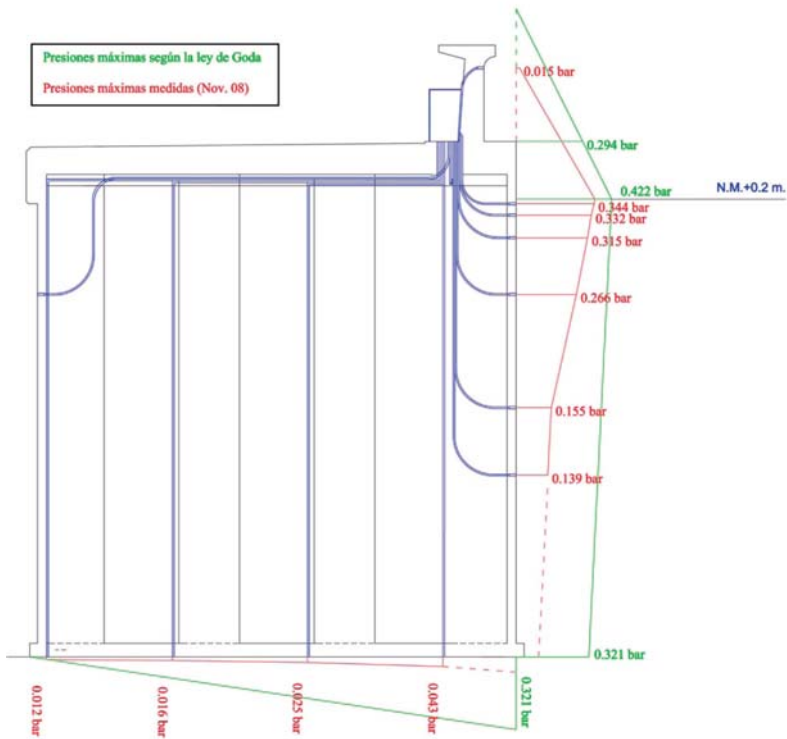


Figura 12: Instrumentación del dique de Botafoc. Puerto de Ibiza.
(José Luis Almazán et al. Año 2008)

Estudio del comportamiento estructural del cajón instrumentado

Una de las aplicaciones más interesantes de la instrumentación es la de permitir relacionar oleaje con las aceleraciones medidas en el dique, de tal manera que se pueda predecir el comportamiento del cajón en función de las características de la ola incidente.

Se trata de una relación con tantas indeterminaciones (densidad, centro de gravedad, comportamiento de la banquetta, rigidez de los “arriostramientos” del cajón, que la única forma posible de estudiarla es mediante la instrumentación directa del propio dique.

La teoría dice que suponiendo el conjunto cajón-espaldón-cimentación como un sólido rígido ficticio, se debe cumplir la siguiente relación (masa por aceleración igual a fuerza):

$$Mx \cdot (x'' + b \cdot r'') + Cx \cdot (x' + b \cdot r') + Kx \cdot (x + b \cdot r - a) = Px$$

No obstante la compleja estructura formada por cajón, banquetta, espaldón, superestructura y cajones adyacentes difícilmente puede estudiarse desde un plano teórico, siendo lo más indicado su análisis a través de los datos recogidos por la instrumentación.

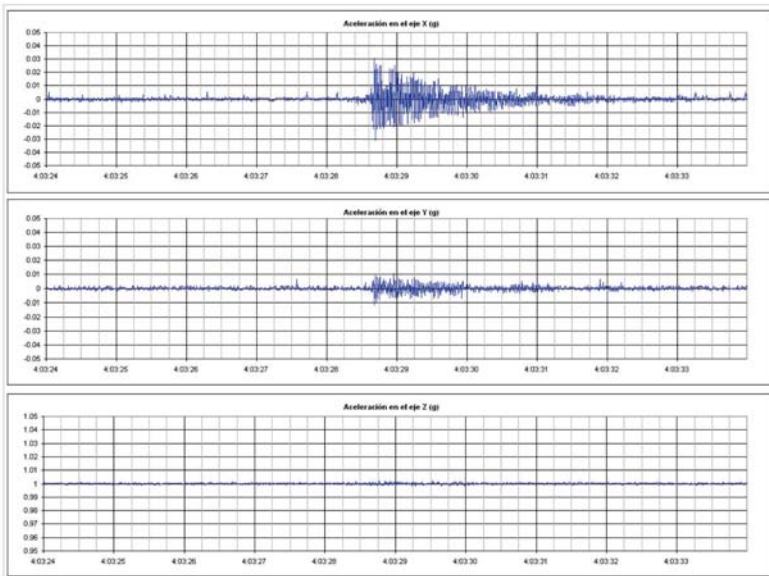


Figura 13: Aceleraciones producidas por el oleaje en el dique de Botafoc. Puerto de Ibiza. (José Luis Almazán et al. Año 2008)

Las características del conjunto estructural no pueden ser reproducidas en un modelo a escala, dadas las limitaciones de las semejanzas empleadas, y por tanto el comportamiento no es el mismo. Como ejemplo se compara el tipo de aceleración registrada en laboratorio (figura 10) frente al registrado por la instrumentación de Botafoc por oleaje (figura 13).

2. DIQUE PRÍNCIPE HUMBERTO (GÉNOVA)

Otra instrumentación digna de mención por ser pionera en la investigación de diques en la década de los sesenta, es la llevada a cabo en el dique Príncipe Humberto de Génova, por el insigne profesor e ingeniero, internacionalmente reconocido, D. Ramón Iribarren Cavanilles, con los siguientes resultados:

SEGUNDA ONDA

Dique Príncipe Humberto (Génova)

Características $\left\{ \begin{array}{l} \text{Longitud } 2L = 110 \text{ m.} \\ \text{Altura } 2h = 4,50 \text{ m.} \\ \text{Profundidad } H = 15 \text{ m.} \end{array} \right.$

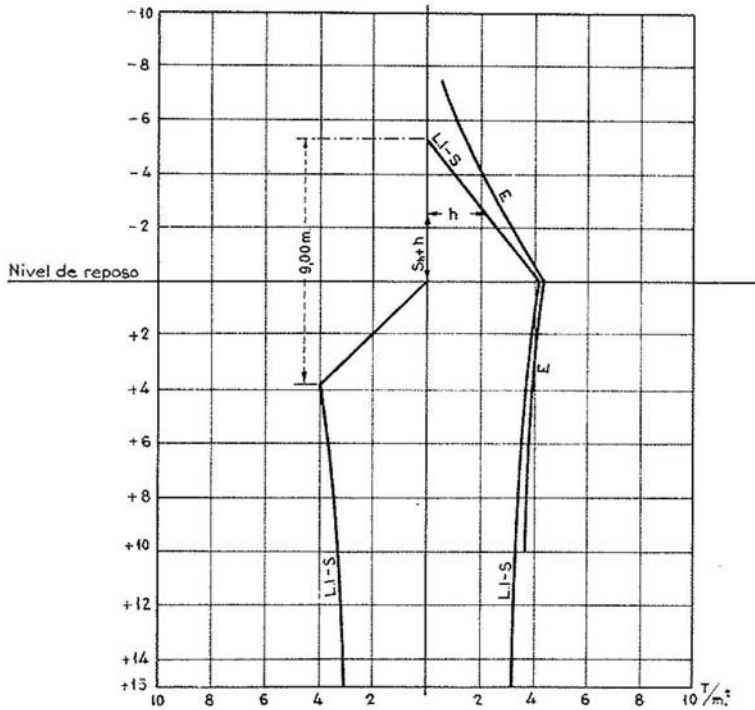


Figura 14: Ensayos sobre el dique Príncipe Humberto. Puerto de Génova. (Ramón Iribarren Cavanilles).

Como puede observarse la ley de presiones obtenida no es lineal sino parabólica.

VII. VENTAJAS DE LAS INSTRUMENTACIONES DE OBRAS MARÍTIMAS:

La principal ventaja de las instrumentaciones de obras marítimas es la de obtener mediciones reales, directamente obtenidas de la observación

del fenómeno, lo cual garantiza un punto de partida correcto a la hora de elaborar teorías que lo expliquen.

Por otra parte la cantidad de datos recogido en una instrumentación no tiene punto de comparación con un laboratorio, puesto que se dispone de registros ininterrumpidos de oleaje durante toda la vida útil de la instrumentación. Esto permite realizar tratamientos masivos de datos y disponer de una amplia base de datos para su estudio estadístico.

Por último debe destacarse que por muy grande que sea un modelo a escala, se ensaya en un canal de un laboratorio y las condiciones de contorno no son las mismas que en mar abierto, lo cual inevitablemente afectará a las mediciones realizadas.

IX. CONCLUSIONES

Ensayos a escala demuestran que las leyes de presiones resultantes en el paramento de los diques verticales, como acción del oleaje incidente, resultan sobreestimadas por los modelos existentes. La calibración de estos modelos se lleva a cabo mediante ensayos a escala. Sin embargo, estos ensayos están sujetos a efectos de escala propios del tipo de semejanza empleada. Por esta razón, la calibración se optimiza cuando las mediciones se realizan a escala 1:1, es decir, sobre diques reales instrumentados, en condiciones ambientales reales exactas, con enorme ventaja.

Los resultados obtenidos en estas instrumentaciones no dejan de sorprender y plantear algunas dudas sobre los modelos desarrollados por Goda, Sainflou o el programa PROVERBS, en cuanto a la linealidad de la ley de presiones resultante, razón por la cual las investigaciones han de seguir por el camino de la instrumentación de diques en detrimento de los ensayos en laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, H. 1988. Les modèles réduits au laboratoire national d'hydraulique. Épure. Paris. Nº18

ALMAZÁN GÁRATE, J.L et al. (2000). Descripción, medida y análisis del oleaje. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

ALMAZÁN GÁRATE, J.L et al. (1999). Estática de Fluidos. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

AMORÓS, J.R; LLORCA, J; ELVIRA, A.R; LOPEZ, J.D; LARRAZ, M.A. (1997). Instrumentación en prototipo de un dique de cajones. Caso del Dique de Reina Sofía del Puerto de Las Palmas. IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Mayo de 1997. Universidad de Cádiz.

BLACKMORE, P.A.; HEWSON, P. (1984). Experiments on full scale impacts pressures. Coastal Engineering, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V. , vol 8, pp 331-346

FRANCO, L. (1994). Vertical breakwaters: the Italian experience. Coastal Engineering, vol 22: pp 31-55

FRANCO, L.; PASSONI, G. (1992). Further analysis on the failure of Naples breakwater. In: Proc. Third Project Workshop – MASTG6-S, Project 2, Hannover.

GODA, Y. (1985): Random seas and design of maritime structures. Tokyo: University of Tokyo Press.

GODA Y. (1994): Dynamic response of upright breakwaters to impulsive breaking wave forces. Proceedings International Conference Coastal Engineering, 22 p . 135-158.

IRIBARREN, R (1964) : Obras Marítimas: Oleaje y diques. Ed Dos-sat

KIYOSHI, H. (1988): Nearshore Dynamics and Coastal Processes; Theory, Measurement, and Predictive Models. University of Tokyo Press.

KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H.; ALLSOP, N. W. H.; MCCONNELL, K. J.; VAN GELDER, P. H. A. J. M.; HEWSON, P. J. ET AL. (1999): Wave impact loads - pressures and forces. MAST III, PROVERBS:

KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H. (1998): Clasificación de wave loading on monolithic coastal structures. Proceedings International Conference Coastal Engineering (ICCE), ASCE, no.26, Volume 1, pp. 867-880

KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H. (1994): Analysis of dynamic

response of caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, Special Issue on "Vertical Breakwaters", Eds: Oumeraci, H. et al., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., vol 22. pp. 159-183

LUNDGREN, H.; JORGEN J. (1995). Optimisation of caisson breakwater design. Wave forces on inclined and vertical wall structures, *ASCE* pp 181-204

MARTÍN, F.L.; VIDAL, C.; LOSADA, M.A.; DÍAZ RATO, J.L. (1997): Campaña de medidas en el dique Príncipe de Asturias del puerto de Gijón. IV Jornadas Españolas de Puertas y Costas., Cádiz, Spain.

MCCONNELL, K. J. (1999): Derivation, validation and use of parameter map. MAST III, PROVERBS

OUMERACI, H. 1994. Review and analysis of vertical breakwaters failures – lessons learned.

Coastal Engineering, vol 22: pp 3-29

ROM 0.2-90. 1990. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Dirección General de Puertos. MOPT, Centro de publicaciones de Secretaría General Técnica M-43311- 1990, Madrid.

TAKAHASHI, S. (1996): Design of vertical breakwaters. Breakwater design. International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Short Course

TAKAHASHI, S. (1999): Breakwater Design. Gregory P. Tsinker. Chapman and Hall. International Thomson Publishing.

TANIMOTO, K.; MOTO, K.; ISHIZUKA, S. and GODA, Y. (1976): An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters. Proc. 23rd Japanese Conf. Coastal Engineering, pp. 11-16.

TANIMOTO, K.; TAKAHASHI, S. 1994. Design and construction of caisson breakwaters – the Japanese experience. *Coastal Engineering*, vol 22: pp 57-77.