

# DESPUÉS DE IRIBARREN

## El Método Sistemico Multivariable

[ AFTER IRIBARREN ]  
 [ The Multivariable Systemic Method ]

Pedro Suárez Bores

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos/Prof. Dr. Civil Engineer

Catedrático de Puertos y Costas. Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid/University Polytechnic of Madrid  
 Sucesor de Iribarren en la Cátedra de Puertos. Madrid/Successor of Iribarren in the Chair of Ports and Coasts, Madrid

### RESUMEN

La historia del dimensionamiento de las obras marítimas puede considerarse dividida en tres etapas: Artesanal, Determinista y Estadística. Iribarren (1900-1967) logrando dimensionar analíticamente todos los elementos constituyentes de los diques de escollera, es no solo pionero sino uno de los principales protagonistas de la etapa determinista. Con la Red Exterior Española de Registro del Oleaje (1968) y el Método Sistemico Multivariable (1977), explicamos el fallo puntual, con avería total, del dique de escollera, de Punta Lucero, Bilbao, (1976) y determinamos la fiabilidad de su reparación, entrando así plenamente en la tercera etapa.

### ABSTRACT

The history of the dimensioning of maritime works may be divided into three stages: Artisanal, Deterministic and Statistical. Iribarren (1900-1967), who obtained the analytical dimensioning of all the component parts of a rubble mound breakwater, was both the pioneer and one of the main protagonists of the deterministic stage. With the Spanish Offshore Network of Wave Measurement (1968) and the Multivariable Systemic Method (1977) we explain the punctual failure, with total damage, occurred in the rubble mound breakwater at Punta Lucero, Bilbao, (1976), and determine the reliability of its repair, thus entering into the third stage.

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista estructural la **historia del dimensionamiento de las obras** puede considerarse dividida en **tres etapas**: En una **primera etapa** el dimensionamiento de las obras se realiza artesanalmente, sin la aplicación de modelo matemático alguno. La experiencia personal y algunas **recomendaciones** de afamados tratadistas de la antigüedad, Vitruvio, etc. eran la única guía de que disponía el constructor para el dimensionamiento de éstas.

En una **segunda etapa**, el dimensionamiento se realiza ya mediante modelos matemáticos más o menos sofisticados, pero todos ellos analíticas y en los que se consideran todas las

### 1. INTRODUCTION

From a structural point of view, the **history of sizing of works** may be divided into **three stages**: In the **first**, early stage, works were dimensioned on the basis of experience without applying any mathematical model. Personal experience and **recommendations** passed on by renowned early writers such as Vitruvius, etc., served as the only guidelines available to the constructor for the sizing of works.

In the **second stage**, works were sized by mathematical models of greater or lesser sophistication, but all analytical, and where all the **deterministic variables** were considered.

**variables deterministas.** Esta fase tecnológica, no artesanal, se fundamenta, en el mar, a mediados de siglo XIX con la integración de la ecuación de las ondas, Airy (1842). Sin embargo la aplicación de estos resultados al estudio del oleaje se demora, de hecho, hasta casi mediados del siglo XX, cuando **Iribarren**, admitiendo que la refracción y difracción del oleaje real sobre profundidades reducidas puede estimarse mediante la Teoría de las Ondas de gravedad, publica, en 1938, su Método de los Planos de Oleaje.

Iribarren, también en 1938, racionaliza la fórmula de Castro (1933) para el dimensionamiento de los cantos del manto principal de los diques de escollera, y mejora el método de Lira (1925), para la determinación del diagrama de presiones en diques verticales. En los años siguientes introduce una fórmula para el cálculo de taludes sumergidos, en 1949, y una estima para cálculo de estabilidad de los espaldones, en 1954.

Con estas contribuciones la etapa artesanal del proyecto de los diques de escollera había llegado a su fin, pues con métodos analíticos era ya posible calcular todos los elementos, al menos, de esta obra emblemática en la construcción marítima: Los diques de escollera. De la etapa determinista Iribarren es no solo pionero sino uno de sus principales protagonistas.

## **2. LA ETAPA ESTADÍSTICA**

Sin embargo, la mayor parte de los fenómenos y procesos naturales, y muchos de los debidos a la acción del hombre, pocas veces admiten modelos deterministas. La altura de ola, el caudal de un río, la velocidad del viento, la aceleración sísmica, el contenido de un cierto contaminante en el agua o en el aire, las fuerzas de atraque, etc. son variables cuyas magnitudes no tienen límites concretos, como presuponen los modelos deterministas, estando asociados sus valores a una probabilidad de excedencia, con un período de retorno en el caso de procesos estocásticos cíclicos.

A mediados de siglo se instalan registradores de oleaje, principalmente con motivos de investigación –estructura, propagación del oleaje, etc.– y basándose en las investigaciones de Rice (1944), (1945), sobre el ruido blanco, Pierson (1952) –análisis espectral– y Longuet-Higgins (1952) –geometría estadística– se introducen los métodos estadísticos en el estudio del oleaje. Tan solo un año después son publicados, en términos de la altura de ola significativa, los primeros trabajos sobre regimenes de oleaje y de excedencias, Saville (1953).

### **2.1. Red Exterior Española de Registro del Oleaje**

La primera gran diferencia, práctica, entre el modelo estadístico y el determinista, consiste en que las variables ambientales, que determinan el proyecto de las obras marítimas, provienen de agentes tales como el oleaje, viento, etc., cuyos modelos corresponden a procesos estocásticos, algunos de

*This technological stage, no longer based on experience or received knowledge, were used for sea calculations in the mid-nineteenth century on the integration of the wave equation, Airy (1842). However, it was not until the mid-twentieth century that these results were applied to wave study, this finally occurring with the publication in 1938 of **Iribarren's Wave Plan Method** in which it was recognised that real wave refraction and diffraction in shallow depths could be estimated by the Gravity Wave Theory.*

*In the same year of 1938, Iribarren rationalized Castro's formula (1933) for the sizing of the armour layer of rubble mound breakwaters and improved Lira's method (1925) for establishing the pressure diagram in vertical breakwaters. In following years he was to introduce a formula for the calculation of submerged slopes in 1949 and an estimate for the calculation of berm stability in 1954.*

*The artisinal design of rubble mound breakwaters reached its conclusion with these contributions. Since then it was possible to calculate all of the elements of this emblematic harbour work: the rubble mound breakwater. In this deterministic stage Iribarren was both pioneer and one of the main protagonists.*

## **2. THE STATISTICAL ERA**

*However, the majority of natural phenomenons and processes and many of those caused by human activity, rarely admit deterministic models. Wave height, river flow, wind speed, seismic acceleration, pollution content in water or air, berthing forces, etc., are all variables without the specific limits established by deterministic models, these values being associated with a probability of exceptions, with a return period in the case of stochastic cyclical processes.*

*In the mid-twentieth century wave recorders were installed mainly for research purposes –structure, wave propagation, etc.– and statistical methods were brought to the study of waves on the basis of the investigations by Rice (1944) (1945) into white noise, those of Pierson (1952) on spectral analysis and Longuet-Higgins (1952) into statistical geometry. Just one year later the first work on wave systems and excess in terms of significant wave height was published by Saville (1953).*

### **2.1. The Spanish Offshore Network of Wave Measurement**

*The first significant practical difference between statistical and deterministic models lies in the fact that the environmental variables, which determine the design of harbour works, arise from factors such as wave and wind etc. The models of these factors correspond to stochastic*

ellos cíclicos, con ciclo anual e hiperciclos de once, etc., años, lo que obliga a **largas series de observaciones**, como mínimo comprendiendo un hiperciclo de once años, y a ser posible un múltiplo de este valor, para promediar no solo sobre el hiperciclo sino entre hiperciclos.

Además, en la costa, donde se construyen las obras marítimas, algunas de las variables características – la altura de ola, por ejemplo – **substantialmente pueden variar entre dos puntos de observación próximos**, como consecuencia de la refracción, difracción y configuración del fetch.

Con una planificación perfecta, cabe la instalación de los correspondientes registradores en los puntos de ubicación de las futuras obras, en donde vayan a realizarse estudios geomorfológicos, ecológicos, obras portuarias, etc., con antelación suficiente.

Ya que pocas veces es posible una planificación tan previosa, una segunda alternativa consistiría en la instalación de registradores en todos los puntos de la plataforma costera, en los que en el futuro se requiriese esa información, lo que supone la instalación de un número desmesurado de registradores y un presupuesto imposible.

Una tercera alternativa fue la introducida en 1968 por el que suscribe con el proyecto de la Red Española de Registro del Oleaje. Esta tercera alternativa está basada en el hecho de que en una buena parte de las costas de la Tierra, afectadas por oleajes generados por perturbaciones meteorológicas de grandes dimensiones, tales como los anticiclones, ciclones extratropicales y huracanes, la variación de las características del oleaje a lo largo del borde de la plataforma costera es gradual y no muy importante, salvo en los cambios bruscos de alineación de ésta. Se puede, en consecuencia, observar (registrar) a largo plazo el oleaje exterior a lo largo de la plataforma costera, en puntos con profundidades suficientes y situación adecuada para cumplir con las siguientes condiciones:

- ▼ 1. Ausencia de Refracción
- ▼ 2. Ausencia de efecto de configuración del fetch local
- ▼ 3. Posibilidad de interpolación lineal entre los registros de cada dos estaciones adyacentes

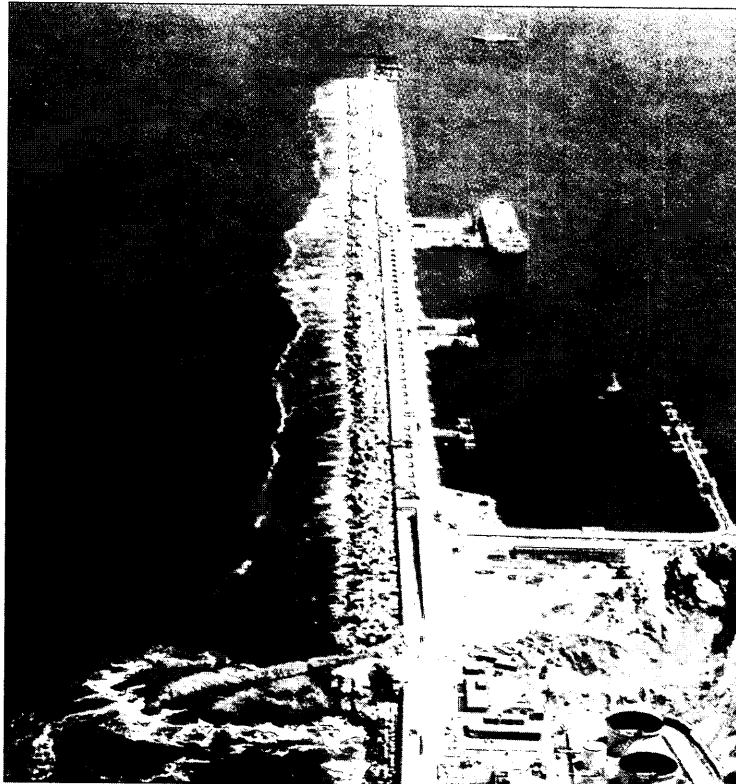


Figura 1. Dique de Punta Lucero, Bilbao. Vista antes de la avería/  
Figure 1. Breakwater of Punta Lucero, Bilbao. View before failure.

processes, some of which are cyclical, with annual cycles and hypercycles of eleven years, etc. This then requires **long periods of observations** over one eleven year hypercycle at least, and, if possible, a multiple of this period in order to establish the mean, not only within a hypercycle but also between hypercycles.

Furthermore, on the coastline where the harbour works are to be constructed, some of the characteristic variables, such as the wave height, may **substantially vary between two neighbouring observation points** as a result of the refraction, diffraction and form of fetch.

Under perfect planning it would be possible to install the corresponding recorders at the location points of

future harbour works with sufficient foresight prior to the geomorphological, ecological and port studies.

However, such foresight in planning is rarely possible and, therefore, the second alternative would consist of placing recorders at all points on the coastline which would require this information in the future. This would then imply the installation of an inordinate number of recorders and an exorbitant budget.

The third alternative is the one introduced by the author in 1968 under the Spanish Offshore Network of Wave Measurement. This third alternative is based on the fact that in the majority of the world's coastline, affected by waves caused by large scale meteorological disturbances such as anticyclones, extratropical cyclones and hurricanes, the variation of the wave characteristics throughout the coastal platform edge is gradual and insignificant except where there are sharp changes in the topography of the same. It is, therefore, possible to observe (record) the long term external wave effects throughout the coastal platform at points of sufficient depth and adequate location to suit the following conditions:

- ▼ 1. Lack of refraction
- ▼ 2. Lack of local fetch formation
- ▼ 3. Possibility of lineal interpolation between the recordings of all adjacent stations.

- ▼ 4. Posibilidad de correlación entre los puntos exteriores, de la Red, y los puntos de la plataforma costera, con profundidades reducidas, correspondientes a las áreas de posibles estudios futuros.

De esta manera transformamos el problema bidimensional de observación del oleaje, en un problema unidimensional, mediante la instalación de la **RED EXTERIOR**.

Nuestro proyecto de la **RED EXTERIOR ESPAÑOLA DE REGISTRO DEL OLEAJE, REMRO**, fue aprobado técnica y económicamente por el Ministerio de Obras Públicas aquel mismo año de 1968, para diez puntos de observación, Bores (1973), (1974). Estos puntos fueron conectados por vía telegráfica con la Central de Proceso de Datos, Tejedor (1974), instalada en el Laboratorio de Puertos de Madrid, actuando así la Red en tiempo real. Aunque la configuración y ubicación de esta Red está, según hemos visto, determinada por la observación y registro del oleaje, otras variables ambientales pueden, evidentemente, ser registradas.

La colaboración institucional – Dirección General de Puertos, Juntas de Puertos, Telégrafos – empresarial y personal fue inolvidable, debiendo destacarse al entonces Subdirector General de Puertos, Francisco Enriquez Agos, cuya comprensión y apoyo, en un momento en que la palabra estocástico era malsonante, fue decisivo.

Ya con treinta años la RED EXTERIOR ESPAÑOLA DE REGISTRO DEL OLEAJE, primera del mundo y durante muchos años la única, y merced al continuado esfuerzo de la Administración en su mantenimiento y progreso, nos permite disponer en la actualidad de unas series de registro únicas en el mundo, aplicables al proyecto de cualquier obra marítima situada en cualquier punto de nuestro litoral, lo que sitúa a España a la cabeza del mundo en información sobre clima marítimo.

## 2.2. Métodos Estadísticos Univariados

Un primer paso en la aplicación de los métodos estadísticos en el mar lo dan Blume & Keith (1959), siguiendo el ejemplo hidráulico, en donde el concepto de periodo de retorno de la avenida de cálculo era ya antiguo. Introducen, así, en el mar, el concepto de **período de retorno**,  $\tau$ , del temporal de cálculo. Equiparando la altura de ola correspondiente a este periodo de retorno con la altura de ola máxima utilizada en los métodos deterministas, surge así una metodología de transición, entre los métodos deterministas y los propiamente estadísticos.

Van der Kreek y Paape (1964) **optimizan económicamente** el peso de los cantos del manto principal de los diques de escollera y Bores (1968) modifica la probabilidad de avería del manto propuesta por estos autores, introduciendo un modelo de Borgman (1963) metodiza el análisis económico de las construcciones marítimas, tanto rígidas (**fallo instantáneo**) como deformables (**fallo gradual**), considerando tanto las averías

- ▼ 4. Possibility of correlation between the outer points of the network and the points on the coastal platform with reduced depths, corresponding to areas of possible future studies.

In this way the **OFFSHORE NETWORK** converts the bidimensional problem of wave observation into a one-dimensional problem.

Our project for the **SPANISH OFFSHORE NETWORK OF WAVE MEASUREMENT (REMRO)**, was technically and financially approved by the Ministry of Public Works in 1968 at ten observation points, Bores (1973) (1974). The points of the network were connected by telegraph to the Data Processing Centre, Tejedor (1974), installed at the Port Research Laboratory in Madrid, and transmitted data in real time. While the arrangement and location of this network is established for wave observation and measurement, it is obvious that other environmental factors could also be recorded at the same.

The collaboration of institutions –Port Department, Port Authorities, Telegraph Department– businesses and individuals was essential and particular mention should go out to the then Sub-director of the Ports Department, Francisco Enriquez Agos, whose understanding and support was decisive at a time when the term “stochastic” was not exactly well considered.

Thirty years on this SPANISH OFFSHORE NETWORK OF WAVE MEASUREMENT, which was the first of its kind in the world and for many years the only network, can now provide a series of recordings that are unique in the world largely as a result of the continued efforts of the Administration in terms of maintenance and progress of the system. These recordings can be applied to any harbour work anywhere on the Spanish coastline which, subsequently, sets Spain in the leading position in the world with regards to information on maritime climate.

## 2.2. Univariate Statistical Methods

One of the first advances in the application of statistical methods to the sea was provided by Blume & Keith (1959), who followed the hydraulic example, where the concept of a return period of swell was already well known. This concept of a **recurring period**,  $\tau$ , was then applied to the sea for a storm. When comparing the wave height corresponding to this period with the maximum wave height employed in the deterministic methods, there then arises a transitional methodology between deterministic and statistical methods.

Van der Kreek and Paape (1964) **optimised in economical terms** the weight of the cover layers for rubble mound breakwaters and Bores (1968) modified the probability of failure of the cover layers proposed by these authors, introducing a Borgman model (1968) in the economic analysis of harbour works for both rigid (**instantaneous failure**) and

parciales del manto como la ruina completa de la obra.

Otros **análisis económicos univariados**, considerando otras variables aleatorias que la altura de ola, ha sido propuestos por Van Dantzig y Kriens (1960), para los niveles del mar, etc.

### 3. MÉTODO SISTÉMICO MULTIVARIABLE, MSM

Rara vez, sin embargo, las construcciones son simples, elementales, formadas por un solo elemento, ni están sometidas a la acción de una sola variable. Las construcciones, marítimas y terrestres, la contaminación, y, en general, todos los problemas de la Ciencia y de la Técnica son complejos, formando sistemas, de estabilidad, de funcionalidad, etc., constituidos cada uno de ellos por varios elementos, iguales o diferentes, dependiendo el fallo de cada uno de ellos de varias variables, muchas de las cuales, como hemos dicho, serán aleatorias.

En algunos problemas, relacionados con la biología, composición de suelos, etc. las variables pueden considerarse lineales y su relación, sinergia, aditiva, siendo aplicable el conocido Análisis multivariado, Kendall (1975).

Por otra parte, cuando existen relaciones analíticas entre las variables exógenas (de acción) y entre las endógenas (de respuesta) cabe determinar las distribuciones de probabilidad de estas variables compuestas a partir del Algebra de las Variables Aleatorias, Springer (1979), y resolver el problema mediante el **Método de interferencia**, desarrollado por Freudental (1956) y otros. Este método ha sido utilizado, principalmente, en el diseño estructural, en donde ha recibido también, por tal motivo, la denominación de **Método Esfuerzo / Resistencia**, Bores (1982).

En 1976 el Dique de Escollera de Punta Lucero, del Puerto Exterior de Bilbao, calculado con la mejor tecnología determinista de su tiempo, incluidos ensayos con onda monocromática, antes de quedar totalmente terminado tuvo una avería total localizada en un punto que afectó gravemente a las instalaciones del terminal para petroleros de Petronor. En esta situación la Junta de Obras del Puerto, siendo director de la misma el insigne Ingeniero de Caminos Fernando Rodríguez Pérez, se

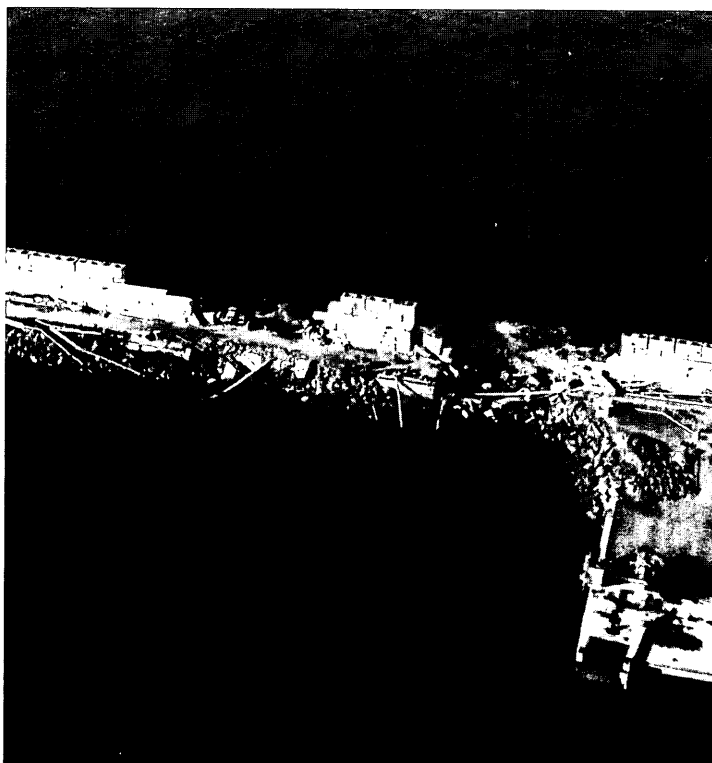


Figura 2. Dique de Punta Lucero, Bilbao. Vista de la avería/  
Figure 2. Breakwater of Punta Lucero, Bilbao. View of the damage.

deformable (**gradual failure**) constructions, considering both partial failure in the cover layers as well as the complete collapse of the work.

Other **univariate economic analysis**, considering other random variables such as wave height, have been proposed by Van Dantzig and Kriens (1960) for sea levels, etc.

### 3. THE MULTIVARIABLE SYSTEMIC METHOD, MSM

However, harbour works are rarely simple, basic constructions formed by one single element or subject to the action of merely one variable. Sea and land constructions, pollution and all the problems that science and technology can pose are complex. It is then necessary to create stable, functional

systems composed of similar or different elements, where the failure of any part of the system will depend upon a host of variables, many of which are random.

In some problems related to biology or soil composition, the variables may be considered as lineal and their relation one of accumulated synergy, and in which case it is then possible to apply Kendall's multivariate analysis (1975).

Additionally, when analytical relationships exist between exogenous (action) and endogenous (reaction) variables, it is possible to establish the probability distributions of these compound variables by means of The Algebra of Random Variables, Springer (1979) and solve the problem by the **Interference Method** developed by Freudental (1956) and others. This method has mainly been employed in structural design, where it has subsequently received the name of the **Force/Strength Method**, Bores (1982).

In 1976 the rubble mound breakwater at **Punta Lucero**, the outer Port of Bilbao, was calculated with the best deterministic technology available at the time including testing with monochromatic waves. However, prior to final completion the breakwater suffered a complete failure at one point which seriously affected the installations of the Petronor oil terminal. At that time the Director of the Port was the renowned civil engineer Fernando Rodríguez Pérez, who thought it was necessary to reconsider the project and in 1976 entrusted the

planteó una reconsideración de los métodos de cálculo, para lo cual, en Agosto de 1976, encargó al ingeniero que suscribe el estudio de la explicación de la avería y el redimensionamiento del dique.

Desafortunadamente ninguno de los dos métodos antes mencionados era apto para su aplicación al caso del manto principal de los diques de escollera: El análisis multivariado porque las variables, en este caso, son no lineales –potenciales (H), trascendentes ( $\alpha$ ), etc.,– y sus relaciones no son aditivas y el Método Esfuerzo / Resistencia porque las relaciones analíticas obtenidas hasta el momento, fórmula de Iribarren ó sus análogas, no incluyen todas las variables: Persistencia, periodo, dirección, niveles, etc., presentes en el problema. Por otra parte el fallo del dique, de la obra, podía haber sido producido por el fallo del manto principal, pero también por el fallo del espaldón o por el de las bermas. El dimensionamiento de las obras marítimas, en general, es, pues, un problema **sistémico, multivariable, no lineal**.

Nos planteamos entonces el dimensionamiento del dique de Punta Lucero con toda generalidad, enunciando el problema en los siguientes términos Bores (1977), (1979):

▼ Toda **obra** (dique, pantalán, puente, edificio, etc.) se construye para cumplir con una cierta función –abrigo, viabilidad, vivienda, etc.– y, como tal, generalmente, es un elemento, un subsistema, de algún sistema de jerarquía superior –puerto, autopista, ciudad, etc. durante un cierto tiempo, que denominamos **vida de servicio** o **previsible** de la obra.

▼ Para cumplir correctamente con esta función, la obra (dique, puente, etc.) deberá diseñarse y dimensionarse adecuadamente para evitar el fallo del sistema –puerto, autopista, etc.– respetando y mejorando, si fuese posible, la calidad paisajística, ambiental y ekística del entorno.

▼ En consecuencia, durante este tiempo, la obra deberá mantener la integridad física, sin fallo –estructural (estabilidad) y material (durabilidad)– de cada uno de sus elementos y de la totalidad de la obra, considerada ésta como un conjunto, frente a la acción combinada, sinérgica, de todas las variables –muchas de las cuales serán aleatorias– de todos los agentes ambientales, antrópicos, etc., con una fiabilidad, **fiabilidad de diseño**, que debe depender de la importancia del Sistema (puerto, etc.).

### 3.1. Fiabilidad de los componentes de fallo, Bores (1980)

Todas las obras, consideradas como **sistemas de diseño**, tienen una ó más posibilidades de fallo, que denominamos **componentes de fallo**. En general, cada componente de fallo es función de varias **variables endógenas**, dependientes de la propia realización, y de varias variables **exógenas**, dependientes del entorno. Las variables pueden ser **simples**, como el talud del manto principal de los diques de escollera, o **compues-**

*author of this paper to study the reasons for the failure and to redimension the breakwater.*

*But, unfortunately, none of the two methods above mentioned were applicable to the case of the armor layer of rubble mound breakwaters : the Multivariate analysis being insufficient as the variables in this case were non linear –potential (H), transcendental ( $\alpha$ ), etc.,– and not additive, and the Interference Method was similarly inapplicable as the analytical relations obtained to date : the Iribarren formula or similar formulas, did not include all the variables which are present in this problem : Persistence, period, direction, level, etc.,*

*Furthermore, the failure of the breakwater could have been caused by the failure of the armor layer, or by that of the crest or the berms. The dimensioning of maritime works is, in general, therefore, a **systemic, multivariable and non linear problem**.*

*We then considered the overall dimensioning of the Punta Lucero breakwater, setting out the problem in the following terms, Bores (1977), (1979):*

▼ **All work** (breakwater, jetties, bridges, buildings, etc) are built to serve a particular function –shelter, traffic circulation, housing, etc.– and, as such, generally form a part or element of a larger system such as a port, motorway, city, etc., over a specific time known as the **working or predicted life** of the structure.

▼ *In order to fulfil this function, the work (breakwater, bridge, etc) must be suitably designed and specific dimensions determined to avoid the failure of the system –port, motorway, etc.,– while respecting and, if possible, improving the environmental, landscape and aesthetics quality of this surroundings.*

▼ *Consequently, during this period, the work must retain its physical integrity, without any structural (stability) or material (durability) failure, of its component parts or of the whole, which must withstand the combined action of all the variables –many of which are random– of all the agents –environmental, anthropic, etc.– acting against the work. This work must have a **design reliability**, which must depend on the importance of the work and of the system to which it belongs.*

### 3.1. Reliability of failure components, Bores (1980)

*All works, when considered as **design systems**, have one or more possibilities of failure which we shall refer to as failure components. Each **failure component** is generally a function of several endogenous or **internal variables**, dependent on the construction itself, and various exogenous or **external variables** dependent on the environment. These variables may be **simple**, such as the armour slope in rubble mound breakwaters, or **composite**, such as the weight of the parapet*

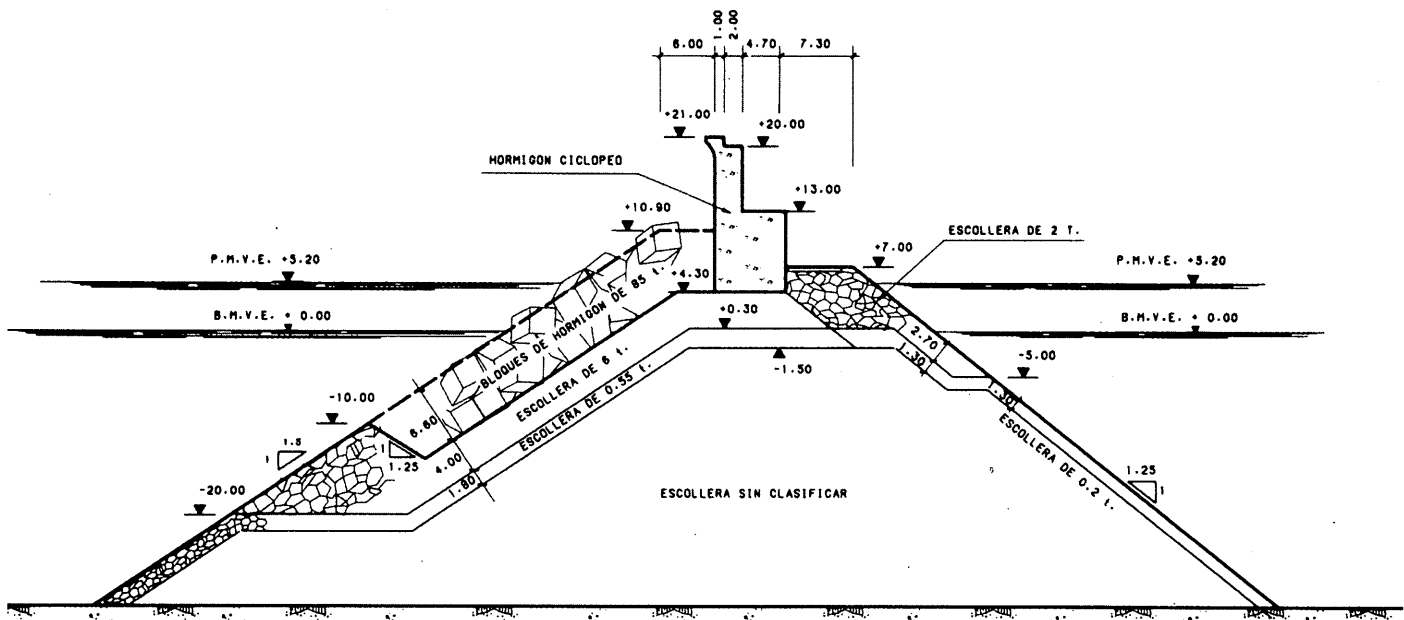


Figura 3. Dique de Punta Lucero, Bilbao. Sección primitiva 85 tons./Figure 3. Breakwater of Punta Lucero, Bilbao. Primitive cross section 85 tons.

tas como el peso del espaldón de los diques de escollera, que depende de su altura, anchura, peso específico, etc.

Cabe distinguir entre **variables endógenas fijas**, prefijadas por Reglamentos, razones funcionales y/o constructivas, etc., que en general pueden ser consideradas como deterministas, y **libres**, dependientes únicamente del comportamiento –estructural, funcional, etc.– de cada elemento de cada obra.

Tanto los componentes de fallo como las variables de las cuales dependen éstos tienen un amplio repertorio de posibilidades, que deberán concretarse con unas determinadas **especificaciones de diseño**.

Con el criterio de **modo de fallo** especificamos el tiempo con que las obras fallan. En particular, el **fallo estructural** de las obras puede ocurrir según una de las tres posibilidades siguientes: Una sola acción, varias acciones consecutivas, interactuantes, o varias acciones separadas, sin interacción. El fallo según las dos primeras posibilidades ocurre siempre, en su totalidad, en un corto período de tiempo, por lo que lo hemos denominado **modo de fallo instantáneo**. El fallo según la tercera posibilidad ocurre a lo largo de un cierto tiempo, es decir, gradualmente, presentando una **fase de averías**, por lo que lo hemos denominado **modo de fallo gradual**, Bores (1968). El **nivel de averías** o de **daño**, puede variar entre **avería** o **daño inicial** que el caso de los diques de escollera con consideramos 3% hasta la avería ó **daño total**, con desaparición de todos los cantos del manto principal, 100%.

En **obras lineales** como son los diques verticales, con tramos separados por juntas de dilatación, etc. la **extensión**

of the breakwater which depends on its height, breadth, specific weight, etc.

We must distinguish between **fixed endogenous variables**, established by regulations, functional and/or constructive reasons, etc., and which may generally be considered as deterministic, and **free variables** which only depend on the behavior –structural, functional, etc.– of each element of each structure.

Both, the failure components as well as the variables on which they depend, have a broad spectrum of possibilities which should be covered by certain **design specifications**.

With the specification **failure mode** we consider the **tempo** with which the works fail. In particular, the structural failure of a work may occur according to one of the three following possibilities: A single action, various consecutive interactive actions or various separate actions without interaction. Failure under the first two instances always occurs in its entirety within a short period of time, and this has subsequently been referred to as the **instantaneous failure mode**. Failure according to the third possibility occurs gradually over a certain period, showing different damage stages, and is referred to as the **gradual failure mode**, Bores (1968). The **level of damage** can vary between the **initial damage**, which in the case of rubble mound breakwaters we consider 3%, up to the **total damage**, with the disappearance of all blocks in the armor, 100%.

**del fallo** puede ser **puntual** afectando a un solo tramo, el menos estable del conjunto. Continuando el temporal, la avería puede extenderse a varios tramos e incluso a la totalidad de la obra, fallo **total**. Lo mismo ocurre con otras obras lineales, como el manto principal de los diques de escollera, en donde, debido al proceso constructivo, ni los ángulos del talud, ni la trabazón de los cantos, ni, en ocasiones, el peso de éstos, es idéntico a lo largo del dique, resultando dividido en una serie de tramos de distinta estabilidad.

Por otra parte, salvo en algunos casos excepcionales, como puede ocurrir en el diseño de algunos elementos de las centrales nucleares, de ciertas instalaciones y dispositivos militares, etc., en que obligada la máxima seguridad, no es lógico considerar a todas las variables de todos los agentes ambientales, antrópicos, etc., en condiciones extremas –que hemos denominado **diseño límite**–. Usualmente se considera una sola variable, aquella a la cual es más sensible el fallo del elemento, como extremal, denominándola **variable principal** y el **diseño extremal**. Para las restantes variables, en este caso, se considerarán las distribuciones medias, pero obtenidas estas medias de los temporales máximos anuales. Finalmente existen sistemas de diseño –funcional y ambiental, principalmente– en los que cabe la utilización de las distribuciones medias de todas las variables, en las condiciones que se especifica en el proyecto, a lo que denominamos **diseño medio**.

El uso directo de las estimas de las distribuciones de las variables no es, obviamente, más que una posibilidad, la más sencilla, de diseño, en la que se consideran de igual precisión todas las fuentes de información, todos los datos, –sean observaciones visuales o registros de alta precisión– y se admite un nivel de confianza de la fiabilidad del 50 %. En su caso, deben ponderarse las distribuciones, y admitir otros niveles de confianza –(0,75), (0,9), etc.– aumentando, así, la garantía de la estima.

Finalmente, conocidas las distribuciones de probabilidad de **todas las variables exógenas** –mediante los correspondientes registros y solo en último término, mediante observación visual– y decididas las **especificaciones** aplicables, así como el valor de las **variables endógenas fijas**, se dimensionarán los valores de las **variables endógenas libres** de cada uno de los elementos componentes de fallo del sistema de estabilidad, de la obra, de manera que –como hemos señalado– la fiabilidad del elemento sea igual, ó superior, a la fiabilidad admisible para éste.

Una solución totalmente general, Bores (1977), (1982), puede obtenerse mediante observación, bien sea en la naturaleza o simulación en laboratorio mediante modelos físicos, químicos, etc., del comportamiento de cada elemento componente de fallo, determinando, en el espacio n-dimensional –siendo (n) el número de variables, simples o compuestas– la **superficie característica** que separa dominio de fallo del de no-fallo.

*In linear works such as vertical breakwaters with stretches separated by expansion joints, the extension of the failure may be local and only affect the weakest stretch of the assembly. In continued storm conditions the damage may extend to various stretches or even the total work, leading to total failure.*

*The same occurs with other linear structures, such as the armors of rubble mound breakwaters where, due to the construction process, neither the slope angles, nor the interlock among the blocks, nor, on occasions, the weight of the blocks is identical along the breakwater. These linear structures are thus divided into a series of stretches with different levels of stability.*

*Furthermore, except in a very few circumstances, such as in the design of particular elements for nuclear power stations or certain military installations, which require maximum security, it is illogical to consider all the variables of all the environmental agents under extremal conditions, situation which we have denominated as **limit design**. Usually only one variable is considered as extremal, and is the one which is most liable to cause the failure of an element. We have denominated this as the **principal variable** within **extremal design**. For the remaining variables, in this case, the mean distributions are taken under maximum annual storm conditions. Finally there are functional and environmental systems where it is possible to employ the mean distributions of all the variables under the conditions specified for the design, and which is referred to as **mean design**.*

*The direct use of the estimates of the variable distributions is obviously the simplest design possibility in which all the sources of information and data are considered with the same accuracy, be these visual observations or high precision recordings, and then accepting a level of confidence of 50%. Where necessary the distributions should be weighted and higher levels of confidence - (0.75) (0.9), etc. - be considered, in order to increase the guarantee of the estimate.*

*Finally, when the probability distributions of **all** of the **exogenous variables** are known, through the corresponding measurements and only in the last extreme by visual observation, and when the applicable **specifications** have been decided and the fixed **endogenous variables** established, the values of the **free endogenous variables** for each of the failure component elements of the stability system of the work are then established in such a way that the reliability of the element is equal to or greater than the admissible reliability established for the same.*

*A general solution, Bores (1977) to (1982), may be obtained by observation, either in situ or by laboratory simulation with physical, chemical models, etc of the behaviour of each failure component established in the n-dimensional space, where (n) is the number of simple or composite variables, in order to establish the **characteristic surface** which separates the failure domain from that of non-failure.*

Para cada conjunto de valores de las (n) variables observadas, considerados estos valores como constantes haremos variar los valores de una determinada variable libre hasta que se produzca el fallo del elemento. Este **punto característico** nos separa, en el espacio n-dimensional, los **dominios de fallo** y de **no-fallo** y vendrá definido por el conjunto –matriz unidimensional– formado por los valores de las (n) variables características: t, ... z, y, x., particularizadas en este punto (1)

$$t_1 \dots z_1 y_1 x_1$$

Cuando las variables endógenas y/o exógenas son aleatorias el valor (x<sub>1</sub>) obtenido en cada observación (experimento) será distinto. Como valor característico se considerará el valor medio de estas observaciones, (p=0,5), ( $\bar{x}$ ), o cualquier otro valor que se decida, al nivel de probabilidad (0,75), (0,90), etc., según se especifique.

Cuando el fallo del elemento es instantáneo existe un solo valor (x<sub>1</sub>), mientras cuando el fallo es gradual existirán tanto valores como niveles de avería (x<sub>1</sub>)<sub>n.a</sub> se determinen.

Incrementando, ahora, el valor de la variable característica (y)

$$y_2 = y_1 + \Delta y$$

y repitiendo el proceso obtenemos el siguiente punto o puntos característicos

$$t_1 \dots z_1 y_2 x_2$$

y sucesivamente

$$t_1 \dots z_1 y_i x_i$$

cuyo conjunto constituye una matriz bidimensional

$$\begin{matrix} t_1 \dots z_1 y_1 x_1 \\ \dots \\ t_1 \dots z_1 y_i x_i \\ \dots \\ t_1 \dots z_1 y_k x_k \end{matrix}$$

que nos define una **curva característica de fallo**, en el plano [y-x].

Para cada uno de los planos (j), de las variables (x) e (y), definidos por la variable (z) podemos determinar las correspondientes matrices bidimensionales

$$\begin{matrix} t_1 \dots z_j y_1 x_1 \\ \dots \\ t_1 \dots z_j y_i x_i \\ \dots \\ t_1 \dots z_j y_k x_k \end{matrix}$$

*For each group of values of the (n) variables observed, when considering these values as constants, we then vary the values of a specific free variable until provoking the failure of the element. This **characteristic point** separates the **failure and non-failure domains** in the n-dimensional space and is defined by the unidimensional matrix formed by the values of the (n) variable characteristics: t, ... z, y, x., specified in this point (1)*

$$t_1 \dots z_1 y_1 x_1$$

*When the endogenous and/or exogenous variables are random, the value (x<sub>1</sub>) obtained in each observation (experiment) will be different. The characteristic value is taken to be the mean value of these observations, (p = 0.5), ( $\bar{x}$ ), or any other value decided at a specified probability level of (0.75), (0.90), etc.*

*When the failure of the element is instantaneous there is only one value (x<sub>1</sub>), while when the failure is gradual both the values (x<sub>1</sub>)<sub>n.a</sub>, as well as the fault levels (n.a) are established.*

*When increasing the value of the characteristic variable (y)*

$$y_2 = y_1 + \Delta y$$

*and repeating the process, we obtain the following characteristic point or points*

$$t_1 \dots z_1 y_2 x_2$$

*and successively*

$$t_1 \dots z_1 y_i x_i$$

*the combination of which forms a bidimensional matrix*

$$\begin{matrix} t_1 \dots z_1 y_1 x_1 \\ \dots \\ t_1 \dots z_1 y_i x_i \\ \dots \\ t_1 \dots z_1 y_k x_k \end{matrix}$$

*which defines the **characteristic failure curve** in the plane [y-x].*

*For each plane (j) of the variables (x) and (y), defined by the variable (z), we may then establish the corresponding bidimensional matrices*

$$\begin{matrix} t_1 \dots z_j y_1 x_1 \\ \dots \\ t_1 \dots z_j y_i x_i \\ \dots \\ t_1 \dots z_j y_k x_k \end{matrix}$$

cuyo conjunto nos determina una matriz tridimensional, que define una **superficie característica de fallo**, en el espacio  $[z-y-x]$ .

Generalizando, podemos determinar la matriz n-dimensional, que define la **hipersuperficie característica de fallo**, en el espacio n-dimensional  $[t, \dots z, y, x]$

El listado a continuación corresponde (en mg/litro) a dos puntos consecutivos de la **curva característica**, en el plano formado por las dos variables (Flúor-Cobre) del componente tóxico de la contaminación a en la ría de Huelva para un valor de la tercera variable (fenoles = 24,96), Arribas (1999):

Fenoles	Flúor	Cobre
24,96	9,1	0,49 mg/litro
24,96	10,8	0,43

para las especificaciones

Eficiencia de adsorción	AE = 0,25 %
Tasa de aclaramiento	TA = 1 litros/hora
Tiempo de permanencia	TP = 6 horas

y con una

Dosis Proporcional de Riesgo DRP = 1.000

Cuando las variables son aleatorias, cada una de ellas (t), ..., (z), (y), (x), vendrá definida por su correspondiente distribución de probabilidad y la **probabilidad de fallo del elemento** vendrá dada por la probabilidad de que los puntos de esas variables se encuentren en el dominio n-dimensional de fallo. Determinada esta probabilidad para cada elemento componente de fallo y especificada la **vida previsible de la obra** inmediatamente conocemos **fiabilidad del elemento**, Bores (1980).

Si esta fiabilidad es menor que la fiabilidad admisible correspondiente a este elemento –ver apartado 3.2– se modificarán los valores de las variables de diseño –peso de los cantos, talud, etc.– hasta lograr que esa fiabilidad sea igual, o mayor que la admisible. En Ingeniería no cabe el fallo. Un tratamiento detallado del MSM puede verse en Bores (1979), (1980), (1982).

El MSM permite la consideración de todas las variables presentes en el problema, sin excepción, con sus límites físicos correspondientes –como la rotura del oleaje, etc.– y en consecuencia la solución de los auténticos **problemas de contorno**.

El fallo del dique de Bilbao coincidió con la aparición del IBM 5100, el primer PC, que no permitió programar el MSM en APL, un lenguaje matricial muy conveniente para este de problemas n-dimensionales.

which together establishes a three-dimensional matrix which defines the characteristic failure surface in the space  $[z-y-x]$ .

When generalising we may then establish the n-dimensional matrix defining the **characteristic failure hypersurface** in the n-dimensional space  $[t, \dots z, y, x]$

The following list refers (in mg/litres) to two consecutive points on the **characteristic curve** within a plane formed by two variables (Fluorine-Copper) of the toxic component of contamination found in the river Huelva with a third variable value (phenol = 24.96), Arribas (1999):

Phenols	Fluorine	Copper
24.96	9.1	0.49 mg/litre
24.96	10.8	0.43

for the specifications

Adsorption efficiency	AE = 0.25 %
Clearing rate	CR = 1 litre/hour
Standing time	ST = 6 hours

and with a

Proportional Risk Dosage PRD = 1,000

When the variables are random, each of these (t), ..., (z), (y), (x), shall be defined by its corresponding probability distribution and the **failure probability of the element** shall be given by the probability that the points of these variables be found within the n-dimensional failure domain. On establishing the probability for each failure component element and on specifying the **expected life of the work**, it is then possible to know the **reliability of the element**, Bores (1980).

In the case that the reliability is lower than the corresponding admissible reliability for this element (see section 3.2), the values of the design variables shall be modified - boulder weight, slope, etc., - until obtaining a reliability equal or over the admissible value. No failure can be permitted in engineering. A detailed analysis of the Multivariate System Method (MSM) may be seen in Bores (1979), (1980), (1982).

The MSM allows us to consider each and every one of the variables present in the problem, including their corresponding physical limits –such as the breaking of waves, etc.–, permitting us to obtain the complete solution of the contour problem.

The failure of the Bilbao breakwater coincided with the appearance of the IBM 5100, the first PC, which permitted us to program the MSM in APL, a matrix language very convenient for this type of n-dimensional problem.

SECCION TIPO

ESCALA GRAFICA

0 10 20 m

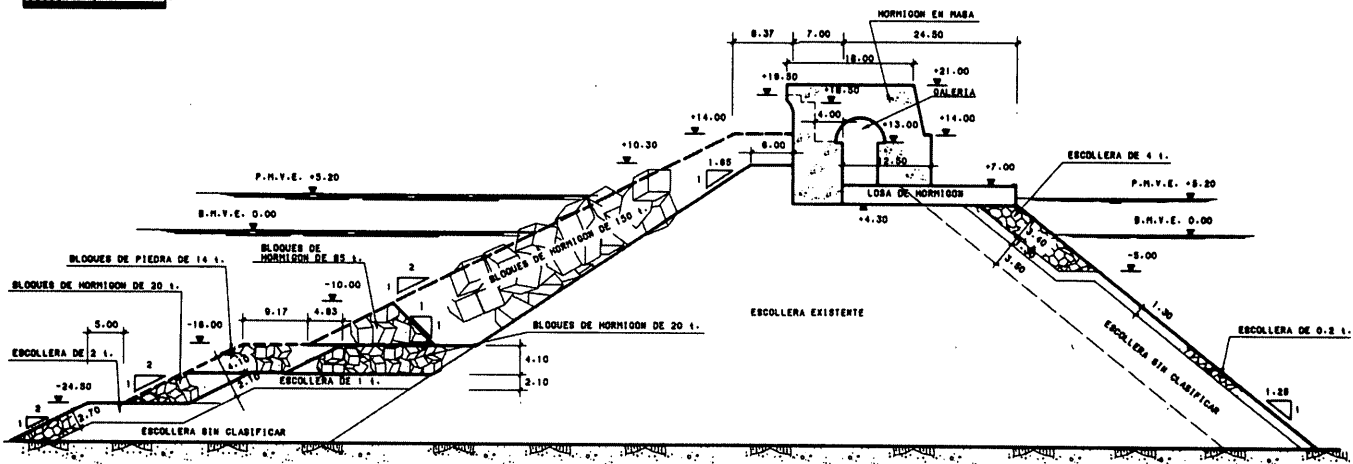


Figura 4. Dique de Punta Lucero, Bilbao. Sección actual 150 tons./Figure 4. Breakwater of Punta Lucero, Bilbao. Actual cross section 150 tons.

3.1.1. Aplicación a diques de escollera,  
dique de Punta Lucero

No disponiendo en España de instalaciones productoras de oleaje complejo tridimensional, los ensayos para determinar las curvas características de fallo del **manto principal**, del espaldón y del morro fueron realizados en los años 1976 y 1977, bajo nuestra dirección, en el Danish Hydraulic Laboratory, con la inestimable colaboración de Sorensen (director del Lab.), H. Gravesen y O. J. Jensen, y en el Hovercraft Co. Lab., con Sticland (director del Lab.).

Una estima de la fiabilidad de las bermas, en donde las variables exógenas son las mismas, excepto los niveles, y sus distribuciones también son las mismas, excepto la altura de ola —que disminuye por efecto de la profundidad, que es una variable determinista— puede ser obtenido utilizando el programa de superficie con la corrección de las alturas de ola modificadas por el efecto de la profundidad.

Del estudio general determinista sobre estabilidad de los cantos de manto principal de los diques de escollera, Bores (1973), inmediatamente se deduce que la reducción de la altura de ola al nivel (Z), (H<sub>Z</sub>/H), sobre fondos a la profundidad (Z = d = h), viene dada por la expresión

$$\frac{H_z}{H} = Ch^2 \frac{2\pi Z}{L}$$

Los experimentación de Van der Meer (1995) y otros muestra el buen comportamiento de esta expresión, cuyo rango de validez se extiende de la superficie, en donde lógicamente, (H<sub>Z=0</sub>/H)=1, al fondo y considera a diferencia de la

3.1.1. Application to rubble mound breakwaters.  
The Punta Lucero breakwater.

At the time of this investigation there were no complex three-dimensional wave simulators available in Spain, so the tests to establish the characteristic failure curves of the **cover layer**, parapet and inner mound were carried out under our auspices at the Danish Hydraulic Laboratory, with the invaluable collaboration of Sorensen (Laboratory Director), H. Gravesen and O.J. Jensen, and at the Hovercraft Co. Laboratory with Mr. Stickland as Lab Director.

An estimate of the reliability of the berms, in which the exogenous variables are the same, except for the levels, and where the distributions are also the same, except for the wave height, which reduces with depth and which is a deterministic variable, may be obtained by using the surface programme with a correction for wave heights modified by depth effect.

From the general deterministic study into the stability of the boulders in the cover layers to rubble mound breakwaters, Bores (1973), it may then be immediately established that the reduction in wave height at a level (Z), (H<sub>Z</sub>/H), over bottoms of a depth (Z = d = h), is given by the expression:

$$\frac{H_z}{H} = Ch^2 \frac{2\pi Z}{L}$$

The experiments by Van der Meer (1995) and others prove the correct response of this expression, the validity of which extends from the surface, where logically (H<sub>Z=0</sub>/H) = 1, to the sea bottom and takes into consideration, unlike Van der Meer's

fórmula de Van der Meer, la influencia del periodo, al cual es tan sensible la distribución de velocidades en profundidades reducidas.

### 3.2. Fiabilidad admisible de la obra y de sus elementos componentes de fallo.

A diferencia de los métodos deterministas, en que se admiten unos valores extremos de las variables –altura de ola, presión del viento, etc.– y unos coeficientes de seguridad sobre un riesgo que, en realidad, solo intuimos, los métodos estadísticos siempre dejan claro que las obras pueden fallar. Siempre existe un riesgo de fallo, una fiabilidad, de los componentes, sobre la que hemos de decidir si es asumible ó no.

En términos de probabilidad la seguridad absoluta, a todas y cada una de las clases de fallo –material y/o estructural– es una utopía. **El riesgo de fallo siempre existe.** En general debieran ser mas seguros los sistemas cuyo fallo puede ocasionar la pérdida de vidas humanas, afectar a la seguridad nacional, la integridad del medio y/o producir la perdida y/o inmovilización de bienes importantes. No debe valorarse, así, únicamente, la importancia económica del fallo, sino, también, y en ciertos casos de manera preponderante, la **importancia** de las consecuencias del fallo de la obra.

Hemos distinguido, Bores (1980), cuatro **factores de importancia**, con tres niveles cada uno de ellos. Ni su número ni su naturaleza, han tenido modificaciones en estos veinte años, aunque sí el detalle de su contenido y alcance.

Los dos primeros **factores** se refieren al Sistema, el primero a la **Actividad (Defensa-Servicios-Recreo)** y el segundo a la **Indispensabilidad, (Total-Sectorial-Nula)** del mismo. El fallo del puente Golden Gate, en San Francisco, por ejemplo, paralizaría al menos parcialmente la ciudad y el fallo del puerto Rotterdam la actividad industrial y económica del corazón de Europa. Este factor es, así mismo, determinante en el caso de puentes insulares únicos.

El **Coste** de la obra y de los bienes afectados por el fallo, incluidas las obras, servicios y propiedades defendidas y/o dependientes, así como la reparación de la obra y, en ciertos casos, la pérdida de imagen, es un factor de importancia cuyos órdenes de magnitud estimamos en: Cien, diez y un millón de dólares, y que denominamos (**Límite-Extraordinario-Ordinario**)

La **Peligrosidad** derivada del fallo de la obra sobre los asentamientos humanos y, en su caso, sobre el medio ambiente. Hemos distinguido, Bores (1980), tres escalones cuyo contenido corresponde exactamente al significado de las denominaciones dadas: (**Genética-Catastrófica-Accidental**)

En razón de la variedad de las obras construidas por el hombre, y de los Sistemas a los que sirven, los **factores** de importancia deben venir ponderados por los correspondientes **grados** de importancia, que dependerán del **ámbito**: (Planeta-rio-Regional-Local) y del **rango**: (Alto-Medio-Bajo) de esos factores de importancia.

*formula, the influence of period which greatly affects the speed distribution in shallow depths.*

### 3.2. Admissible failure of the work and of its failure component elements

*Statistical methods reveal that a construction may always fail, as opposed to deterministic methods which admit certain extreme values of variables such as wave height, wind pressure, etc and certain safety coefficients of risk which is really only inferred. There is always a reliability based risk of failure of the components which we have to assess in terms of acceptability or not.*

*The probability of total safety of each and every type of material or structural risk is a utopia, as **the risk of failure always exists.** In general those systems whose failure may lead to the loss of life, or which might affect national safety, the environment or lead to loss or detriment of property, should be established as the safest constructions. Consideration should not only be given to the economic importance of the failure but also, and on some occasions predominantly to, the **importance** of the consequence of failure.*

*Four **priority factors** have been established, with three different levels for each, Bores (1980). Neither the number nor nature of these factors has altered over the last twenty years, though the detail and scope has changed somewhat.*

*The first two **factors** refer to the system, the first to Activity (**Defence - Services - Recreation**) and the second to **Indispensability (Total - Sectorial - Null)** of the same. A failure of the Golden Gate Bridge in San Francisco, for example, would lead to the partial paralysation of the city and a failure in the Rotterdam Bridge would bring industrial and economic activity to a halt in the heart of Europe. This factor is then of vital importance in the case of single insular bridges.*

*The Cost of the work and the property affected by the failure, including service works and protected or dependent property, together with the repair of the same and, in certain cases, the loss of face, is a priority factor which may range in magnitude, from a hundred to ten or one million dollars, and which is referred to as (**Limit - Extraordinary - Ordinary**).*

*The **danger** posed by the failure of the work to human settlements and the environment. Bores (1980) established three levels which correspond to the significance of the threat: (**Genetic - Catastrophic - Accidental**).*

*By virtue of the variety of work built by man and the systems which these serve, these **priority factors** should be weighted by the following degrees of importance which depend on the **scope** (International - Regional - local) and **ranking** (High - Medium - Low) of these priority factors.*

Los valores estimados de estos factores y grados de importancia, junto con la función empírica primeramente propuesta, Bores (1980), se han modificado ligeramente con la experiencia adquirida.

Con el programa actual y los factores y grados de importancia aplicables al dique de Punta Lucero indicados en el cuadro a continuación

Factor		Grado
Actividad	Servicios –	Regional Media
Indispensabilidad	Sectorial–	Regional Media
Coste	Propiedad–	Límite Medio
Peligrosidad	Accidental–	Local Baja

se obtiene la fiabilidad admisible  $\phi = 0,731$  que para una Vida previsible, de servicio, de 50 años, corresponde a un periodo de retorno de las condiciones de fallo  $\tau = 160$  años.

Otros ejemplos que muestran el amplio campo de aplicación de este modelo son presentados a continuación:

	$\phi$	$\tau$
Puerto deportivo José Banús	0.712	148
Base Naval de ROTA	0,747	172
Presa del Río de las PIEDRAS, Huelva	0.705	144
Presa de RICOBAYO	0.971	1.730
Presa de ASSUAN	0.998	24.500
Puente de GOLDEN GATE	0.992	6.350
Buque mercante medio	0.836	
Avión DC 10	0,959	

En obras formando sistemas de estabilidad compuestos por diversos elementos, como es lo mas frecuente, es de fundamental importancia valorar cual debe ser el reparto de esta **fiabilidad admisible del sistema**, de la obra, entre los diversos elementos del sistema, es decir, cual debe ser la **fiabilidad admisible** de cada uno de los elementos del sistema.

Es bien sabido que en los sistemas en serie, como puede considerarse el fallo de estabilidad de las obras, el fallo de un solo elemento del sistema es causa de la colapso de la totalidad de la obra, pudiendo ocurrir, así, que el fallo de un solo elemento de costo insignificante, comparado con el de la totalidad de la obra, sea el responsable del fallo de ésta.

El problema de asignación de fiabilidades a los diversos elementos componentes de fallo del sistema se basa en criterios puramente económicos, pues la valor de la fiabilidad admisible del sistema esta previamente decidida, obteniéndose el **óptimo económico** de esa asignación cuando el fallo del sistema se produce en el elemento más caro, pues el incremento de fiabilidad de este elemento repercute más sobre el coste total de la obra. Al contrario los elementos de bajo costo deben ser

*The estimated values for these factors and the degrees of importance, together with the empirical function primarily proposed, Bores (1980), has only been modified slightly with hindsight.*

*When applying the current programme and the following factors and degrees of importance to the Punta Lucero breakwater:*

Factor		Degree
Activity	Services-	Regional Average
Indispensability	Sectorial-	Regional Average
Cost	Property-	Limit Average
Danger	Accidental-	Local Low

*an admissible reliability of  $\phi = 0.731$  is obtained which for a predicted working life of 50 years would correspond to a return period of failure conditions of  $\tau = 160$  years.*

*Further examples, which reveal the broad range of this application of this model, are indicated below:*

	$\phi$	$\tau$
José Banus Pleasure harbour	0.712	148
ROTA Naval Base	0.747	172
LAS PIEDRAS River Dam, Huelva	0.705	144
RICOBAYO Dam	0.971	1.730
ASSUAN Dam	0.998	24.500
GOLDEN GATE Bridge	0.992	6.350
Standard Merchant Ship	0.836	
DC10 Aeroplane	0.959	

*In works which form stability systems composed of various elements, as is more frequent, it is of vital importance to establish the distribution of the **admissible reliability of this system** between the different elements forming the same, that is to say the **admissible reliability** of each of the **system elements**.*

*In series systems, where the failure of the stability of the works must be considered, the failure of one single element of the system will cause the total collapse of the work, and it is possible that the failure of one element of insignificant cost, when compared to the total, could be responsible for the failure of the entire work.*

*The problem of assigning reliability factors to the different failure component elements of the system is based purely on economic criteria. As the value of admissible reliability of the system is previously decided, the **economic optimum** for this assignation is obtained when the system failure occurs in the most expensive element, as any increase in the reliability of this element will be reflected in the total cost of the work. To the contrary, the cheapest elements should be the most reliable,*

más fiables, tanto más cuanto menos cuesten y menor sea el costo de la mejora de su fiabilidad.

La optimización económica de esta asignación de fiabilidades puede, entonces, presentarse en los siguientes términos :

El coste total de una obra (C), considerada como un sistema de estabilidad, será la suma del coste de los (n) elementos componentes de fallo (C<sub>i</sub>), es decir,

$$[1] \quad C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

y su fiabilidad (φ), ya que se trata de un sistema en serie,

$$[2] \quad \phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots \cdot \phi_n$$

En nuestros Apuntes de Fiabilidad de los Sistemas de Diseño, Bores (1980), propusimos como proposición complementaria, en una **primera estima**, hemos propuesto, Bores (1980), la proporcionalidad entre el costo de los diversos elementos y sus correspondientes riesgos de fallo, es decir,

$$[3] \quad \frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{C_2}{1 - \phi_2} = \dots = \frac{C_n}{1 - \phi_n}$$

cuya solución, para solo dos componentes de fallo es

$$[4] \quad \phi_1 = \frac{-\frac{C_2 - C_1}{C_1} + \sqrt{\left(\frac{C_2 - C_1}{C_1}\right)^2 + 4 \frac{C_2}{C_1} \phi}}{\frac{2C_2}{C_1}} \quad [5] \quad \phi_2 = \frac{\phi}{\phi_1}$$

Cuando existen más de dos componentes de fallo, el problema general puede ser resuelto por iteración, separando un solo componente (1) del conjunto y considerando el costo y la fiabilidad admisible restante como componente (2), y así sucesivamente.

En el caso del dique de escollera de Punta Lucero, que nos ocupa, los elementos constituyentes de la obra son: Núcleo, Mantos secundarios, Manto principal, Espaldón y Bermas. El conjunto descansando sobre el Suelo.

Admitiendo que la construcción, calidad y granulometría del núcleo y de los mantos secundarios es adecuada, cumpliendo la ley de filtro de Iribarren, relación de pesos 1/20, podemos considerar que la estabilidad de estos elementos: **Núcleo** y **Mantos secundarios**, es segura, es decir, que la fiabilidad de cada uno de estos elementos, φ<sub>N</sub> y φ<sub>MS</sub>, respectivamente, es la unidad.

El espaldón de la parte central del dique, con mayor responsabilidad sobre los Bienes defendidos y dependientes del Sistema, se ha diseñado con una sección muy estable, tanto al vuelco como al deslizamiento, y el suelo sobre el que se asienta el dique esta formado por roca compacta y muy resistente,

as the cheaper these are, the less the cost of improving their reliability.

The economic optimization of this designation of reliability should then be presented along the following lines:

The total cost of a work (C), considered as a stability system, shall be the sum of the cost of the (n) failure component elements (C<sub>i</sub>):

$$[1] \quad C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

and its reliability (φ), in series systems,

$$[2] \quad \phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots \cdot \phi_n$$

In our notes on the Reliability of Design Systems, Bores (1980), it was proposed that as a **first estimate**, there be proportionality between the cost of the different elements and their corresponding risks of failure:

$$[3] \quad \frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{C_2}{1 - \phi_2} = \dots = \frac{C_n}{1 - \phi_n}$$

the solution of which, for only two failure components, being:

$$[4] \quad \phi_1 = \frac{-\frac{C_2 - C_1}{C_1} + \sqrt{\left(\frac{C_2 - C_1}{C_1}\right)^2 + 4 \frac{C_2}{C_1} \phi}}{\frac{2C_2}{C_1}} \quad [5] \quad \phi_2 = \frac{\phi}{\phi_1}$$

When there are more than two failure components the general problem may be solved by iteration, separating a single component (1) from the whole and taking the remaining admissible reliability and cost as component (2), and then repeating the process in the same fashion.

In the case in hand of the Punta Lucero rubble mound breakwater, the component elements of the work are the: Inner core, secondary cover layers, armour layer, Parapet and Berms. The whole arrangement resting on the bed.

When taking the construction, quality and rubble size of the inner core and secondary layers to be suitable, in accordance with 1/20 weight ratio, we may then consider the stability of these elements: Core and Secondary layers to be safe, that is to say that there is unit reliability of each of these elements φ<sub>C</sub> and φ<sub>SL</sub>.

The parapet on the central part of the breakwater, which has greater responsibility in terms of the property which is defended by and dependent on the System has, subsequently, been designed with a very stable section in order to resist both overturning and slipping. The bed on which the breakwater sits is formed of compact and very resistant rock which, therefore,

pudiendo en consecuencia, al menos como primera estima, considerar que tanto la fiabilidad del **Espaldón**,  $\phi_E$ , como la del **Suelo**,  $\phi_S$ , son igual a uno.

Los únicos elementos componentes de fallo del sistema de estabilidad constituido por el dique de escollera de Punta Lucero son, pues, al menos en primera estima, el Manto Principal y las dos bermas, que denominamos Berma 1 y Berma 2, y cuyas fiabilidades admisibles  $\phi_M$ ,  $\phi_{B1}$  y  $\phi_{B2}$  tratamos ahora de valorar.

Aplicada el MSM al Dique de Punta Lucero del primer proyecto, cuyo talud era  $\cot \alpha = 1,5$  resultan las siguientes fiabilidades de los elementos componentes del dique,

	P (tons)	h (m)	$\phi_{50}$	$\phi_1$
Manto principal	85		0,018	0,92
Berma 1	6	10	$8,0 \cdot 10^{-15}$	0,52
Berma 2	0,55	20	$1,0 \cdot 10^{-29}$	0,26

En donde: La primera columna corresponde al peso de los cantos, la segunda a la profundidad (h), la tercera a la fiabilidad del elemento componente fallo para una vida previsible de cincuenta años,  $\phi_{50}$ , y la cuarta,  $\phi_1$ , considerando únicamente un año.

Estos sorprendentes resultados muestran que a largo plazo las fiabilidades de todos los elementos eran asombrosamente bajas y que incluso para un año las fiabilidades de las bermas, particularmente de la berma 2, eran pequeñas. El riesgo de fallo para esta berma en el plazo de un año era ( $\rho_1 = 1 - \phi_1 = 0,74$ ). El riesgo de fallo era excesivo y la obra falló antes de entrar plenamente en servicio y seguramente por fallo de las bermas, probablemente de la segunda.

Los resultados para el dique restaurado, con un talud  $\cot \alpha = 2,0$ , con una primera berma construida de bloques naturales con un peso específico de  $2,8 \text{ ton/m}^3$  y con la segunda berma construida con de escolleras, son

	P (tons)	h (m)	$\phi_{50}$
Manto principal	150		0,775
Berma 1	14	16	0,727
Berma 2	2	24	0,041

Ahora bien siendo la fiabilidad admisible para la obra ( $\phi = 0,731$ ), según hemos visto anteriormente, y el costo unitario relativo, estimado, de los tres elementos componentes de fallo del dique de Punta Lucero,

Manto principal	$C_M = 0,77$
Berma1	$C_{B1} = 0,15$
Berma2	$C_{B2} = 0,08$

aplicando [4] y [5], según hemos indicado anteriormente, se obtiene

means that as a first estimate, the reliability of both the **Parapet**  $\phi_E$  and the **Bed**  $\phi_S$ , are equal to one.

The only failure component elements of the stability system formed by the Punta Lucero breakwater are then considered to be, at the outset, the Armour layer and the two berms, referred to as Berm 1 and Berm 2. The admissible reliability  $\phi_M$ ,  $\phi_{B1}$  and  $\phi_{B2}$  shall then be as follows.

When applying the MSM to the first design of the Punta Lucero Breakwater, with a slope angle of  $\cot \alpha = 1.5$ , this then gives the following reliabilities of the component elements of the breakwater

	W (tons)	h (m)	$\phi_{50}$	$\phi_1$
Armour layer	85		0.018	0.92
Berm 1	6	10	$8.0 \cdot 10^{-15}$	0.52
Berm 2	0.55	20	$1.0 \cdot 10^{-29}$	0.26

Where: The first column refers to the boulder weight, the second to the depth (h), the third to the reliability of the failure component element over a estimated life of fifty years,  $\phi_{50}$  and the fourth,  $\phi_1$ , when only considering one year.

These surprising results reveal that the reliabilities of all the elements over a long period was amazingly low and that even for one year the berm reliabilities, and particularly that of berm 2, were very low. The risk of failure of this berm over a period of one year was ( $\rho_1 = 1 - \phi_1 = 0.74$ ). This risk of failure was excessive and the work failed before fully coming into service and undoubtedly as a result of the berm failure, and most probably that of the second berm.

The results for the refurbished breakwater, with a slope angle  $\cot \alpha = 2.0$ , and with the first berm built in natural rock boulders with a specific weight of  $2.8 \text{ ton/m}^3$  and with a second berm built in rubble, were as follows:

	W (tons)	h (m)	$\phi_{50}$
Armour layer	150		0.775
Berm 1	14	16	0.727
Berm 2	2	24	0.041

Where the admissible reliability for the work ( $\phi = 0.731$ ), as we have already seen, and the estimated relative unit cost for the three failure component elements of the Punta Lucero breakwater are as follows:

Armour layer	$C_M = 0,77$
Berm 1	$C_{B1} = 0,15$
Berm 2	$C_{B2} = 0,08$

and applying [4] and [5], as previously indicated, we then obtain:

Manto principal	$\phi_M = 0,782$
Berma 1	$\phi_{B1} = 0,957$
Berma 2	$\phi_{B2} = 0,977$

en donde debemos destacar el altos valores obtenidos para las fiabilidades admisibles de las bermas, debido a sus reducidos costos, comparados con el del manto principal.

**En la reconstrucción, desafortunadamente, sucede lo contrario, la fiabilidad de las bermas, en lugar de crecer, decrece. ■**

<i>Armour layer</i>	$\phi_M = 0,782$
<i>Berm 1</i>	$\phi_{B1} = 0,957$
<i>Berm 2</i>	$\phi_{B2} = 0,977$

*and where we should underline the high values obtained for the admissible reliabilities of the berms as a result of their lower cost when compared with the armour layer.*

***Unfortunately, in the reconstruction the opposite occurs and the reliability of the berms decreases instead of increasing. ■***

## **BIBLIOGRAFÍA/REFERENCES**

- AIRY G. "Tides and waves", Encyclopaedia Metropolitana 1842
- ALMAZAN J. L. (1990) - "Criterios de evaluación económica de macro-proyectos de infraestructuras para el transporte". - Tesis doctoral E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. Politécnica de Madrid. (Aplicación MSM)
- ARRIBAS R. (1999) - "Jerarquización de impactos en la dinámica estuarina de la Ría de Huelva" - Tesis doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. Politécnica de Madrid. (Aplicación MSM)
- BLUME, J. A. & KEITH, J.M. (1959) - "Rincón offshore island and open causeway" - Proc. A.S.C.E. WW. 3.
- BORES P.S. (1968) - "La ola de cálculo"-4B Ministerio de Obras
- 1973 - "Apuntes de Diques", Escuela de Caminos, Canales y Puertos", cuarta reimpresión 1982
- (1973) "Geomorfología y Dinámica Litoral Análisis, Planeamiento y Gestión del Medio Litoral" Colegio de Ing. de Caminos.
- (1974) - "Sea Observation in Coastal Areas: The Spanish Offshore Network", Proc. A.S.C.E. Waves 74.
- (1977) - "Análisis Aleatorio Multivariado. Terminología y Conceptos Básicos" R.O.P., Madrid.
- (1979) - "Sistemas Aleatorios Multivariados. Aplicación a Obras Marítimas". R.O.P., 4 artículos en número extraordinario. Abril.

- (1980) - "Obras Marítimas Exteriores : Análisis de Fiabilidad de los Sistemas de Diseño" - 2ª Ed. en (1982) - Servicio de Publicaciones de La E.T.S de Ingenieros de Caminos. UPM
- BORGMAN, L. (1963) - "Risk Criteria" - Proc. A.S.C.E. WW. 3.
- KENDALL, M. (1975) - Multivariate Analysis. Griffin Londres
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1952) - "On the statistical distribution of the heights of sea waves" - Journal Mar. Research II.
- PAAPE, A. & WALTHER, A.W (1963) - "Akmon armor unit for cover layers of rubble mound breakwaters" - Proc. 8<sup>th</sup> Coastal Conference.
- PIERSON, W.J. (1952) - A Unified Mathematical Theory - Part. I y II College of Eng. Res. Div. New York Univ.
- (1955) - Advances in Geophysics vol. 2 - Academic Press.
- RICE, S. O. (1944) - Bell System Techn. Journal no. 23.- (1945) - Bell System Techn. Journal no, 24.
- SAVILLE, Th. (1953) - B.E.B. Techn. Mem. 36, 37 y 38.
- SPRINGER M.D. (1979) - The Algebra of random variables. Wiley New York.
- TEJEDOR L.(1974) A Teleprocess System, The Spanish Offshore Network Proc. A.S.C.E. Waves 74.
- Van der KREEKE, J. & PAAPE, A. (1964) - "On Optimum breakwater design" - Proc. 9<sup>th</sup> Coastal Conference.
- Van der MEER y otros (1995) -"Toe structure stability of rubble mound breakwaters"- Coastal Structures and Breakwaters. Telford, Inst. of Civil Engineers. ■