

SÍNTESIS FÍSICO-MATEMÁTICA DEL MÉTODO SISTÉMICO MULTIVARIADO

PHYSICAL-MATHEMATICAL SYNTHESIS OF THE MULTIVARIATE SYSTEMIC METHOD

PEDRO SUÁREZ BORES. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Puertos y Costas (Jubilado). Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid.
psbores@psbores.com

RESUMEN: La presente Síntesis del Método Sistemico Multivariado, MSM, sigue la exposición de nuestra primera publicación en esta Revista de Obras Públicas en Noviembre de 1977 del MSM, cuyas especificaciones mas destacadas se indican y son reproducidas literalmente en itálica. Se toma como ejemplo de aplicación el dique de Punta Lucero, de Puerto Exterior de Bilbao. En este artículo vemos como el MSM nos permite determinar la fiabilidad del componente más débil de las obras –espaldón, manto, etc.– correspondiente al tramo, al elemento, mas débil a lo largo de éstas, y , como deben optimizarse las dimensiones de los diversos componentes de las obras. El MSM es siempre aplicable, incluso como es caso de los diques de escollera en que la hipersuperficie de fallo, las ecuaciones de verificación, no existan o sean insuficientes.

PALABRAS CLAVE: ESTADOS DEL MAR, COMPONENTES, ELEMENTOS, MODOS Y CLASES DE FALLO, HIPERSUPERFICIES DE FALLO, FIABILIDAD DE LOS COMPONENTES, FIABILIDAD DE LA OBRA, FIABILIDAD DE DISEÑO

ABSTRACT: The present Synthesis of the Multivariate Systemic Method, MSM, follows our first paper on this theme in the Revista de Obras Públicas in November 1977. The most outstanding specifications are indicated and literally reproduced in italics. The Punta Lucero rubblemound breakwater of the Port of Bilbao is considered an example of its application. In this paper we see how the MSM permits us to determine the reliability of the weakest component –crest, armor, etc– of the work, corresponding to the weakest stretch, or element, along the work. Dimensions of the different work components are optimized. The MSM is always applicable, even in those cases, such as the rubblemound breakwater, in which the equations of verification don't exist or are insufficient.

KEYWORDS: STATE OF THE SEA, COMPONENTS, ELEMENTS, MODES AND CLASSES OF FAILURE, HYPERSURFACE OF FAILURE, COMPONENT RELIABILITY, WORK RELIABILITY, DESIGN RELIABILITY

INTRODUCCIÓN

El Método Sistemico Multivariado, nace como consecuencia de los criterios propuestos para la reparación de las graves averías sufridas en el dique de escollera de Punta Lucero, Bilbao en 1976, y que resumimos en la siguiente definición:

"Toda obra debe construirse para cumplir con la función a que se destina, debiendo resistir, en consecuencia, cada una de sus partes y en su conjunto (como un sistema), la acción sinérgica de todos los agentes –ambientales, antrópicos, etc.– a toda clase de fallos –estructurales, funcionales, ambientales, etc.– durante toda la vida de diseño (previsible) para la obra y a un nivel de fiabilidad de diseño (admisible)", Bores (1977).

INTRODUCTION

The Systemic Multivariate Method was developed in accordance with the criteria established for the repair work on the Punta Lucero rubble mound breakwater after it had been seriously damaged in 1976. This criteria may be summarized as follows:

"All structures must be built to fulfil the purpose for which they are intended and, as such, all their component parts and the work as a whole must resist the synergic action of all natural or anthropic agents, all manner of structural, operational and environmental failures throughout the entire (predicted) design life of the work with an (admissible) design reliability level". Bores (1977).

1. ACCIÓN DE LOS AGENTES EXÓGENOS (OLEAJE, ETC.). ESTIMA DISTRIBUCIÓN MULTIVARIADA DE PROBABILIDAD

En general, el fallo de la obras marítimas se origina por la acción del oleaje, que origina corrientes y presiones entre y sobre los cantos de los diques de escollera, extrayéndoles de su posición, y provoca el vuelco, deslizamiento ó rotura de las obras monolíticas. Las variables determinan estas corrientes, presiones, etc. son mecánicas: velocidad, cantidad de movimiento, etc., pero, mediante la teoría de las ondas, Airy (1845), hacemos un cambio de esas variables dinámicas, reales, a variables geométricas: $(H_{1/3})$, (L_{opt}) , etc. que, a su vez, estimamos mediante las variables aleatorias de estado $H_{1/3}$, T_{opt} , etc. Evidentemente estas variables, geométricas y aleatorias, sólo "virtualmente" son representativas de la acción del oleaje. En consecuencia, la utilización de estos modelos matemáticos generará incertidumbres.

Las variables de estado que determinan el oleaje son: la altura de ola significativa $(H_{1/3})$, el período óptimo (T_{opt}) y la dirección (θ) que nos definen el estado del mar, y la persistencia (N) que nos determina su duración a lo largo del tiempo. A estas variables se agrega el nivel del mar $(S = S_M + S_A + \dots)$, que nos localiza la posición de la acción del oleaje sobre la obra.

Pero estas variables exógenas, fundamentales, no son las únicas posibles. Otras variables como la anchura del espectro (ϵ) , que nos define la edad y constitución del oleaje, también existen y no son consideradas en esta aproximación. Evidentemente, esta limitación del número de variables exógenas, introduce nuevas incertidumbres.

Siendo el oleaje un proceso estocástico de dos componentes: uno de corto periodo, que nos determina los estados del mar, y otro de largo periodo, cuyo periodo básico es el año, en el que se suceden los estados del mar dando lugar a temporales, marejadas y calmas, su conocimiento requiere la observación, adecuada e ininterrumpida durante un plazo al menos de 11 años y mejor un múltiplo de este plazo, que constituye el hiper ciclo fundamental.

Esta observación debe realizarse en el punto de ubicación de las futuras obras, punto que no se conoce con antelación suficiente para garantizar los plazos antes mencionados. El problema así planteado fue la génesis de la Red Exterior Española de Registro del Oleaje, siendo aprobado nuestro proyecto por el entonces Ministerio de Obras Públicas en 1968. Sus especificaciones tomadas, literalmente, de Bores (1973), (1974), fueron:

- 1. Ausencia de Refracción: Todos los sensores de la Red Exterior se instalan sobre fondos superiores a los cuarenta metros.
- 2. Ausencia del efecto de configuración del fetch: Salvo en el caso de costas rectilíneas, como Valencia, por

1. ACTION OF EXOGENOUS AGENTS (WAVE ACTION, ETC.) ESTIMATION OF MULTIVARIATE PROBABILITY DISTRIBUTION

The failure of coastal structures generally occurs as a result of wave action, which causes currents and pressure between and over the rocks of rubble mound breakwaters and eventually dislodges the same and causes the overturning, slipping or breakage of the monolithic structures. The variables determining these currents, pressures, etc. are mechanical: speed, quantity of movement, etc., though by Airy's wave theory (1845) we may change these real dynamic variables to geometric variables: $(H_{1/3})$, (L_{opt}) , etc., which are, in turn, estimated by random state variables $H_{1/3}$, T_{opt} , etc. Obviously these geometrical and random variables only provide a "virtual" representation of the wave action and, as such, the employment of these mathematical models creates uncertainties.

The state variables determining wave action are: the significant wave height $(H_{1/3})$, optimum period (T_{opt}) and the direction (θ) which define the sea state, and the persistence (N) which establishes its duration in time. To these variables it is necessary to add the sea level $(S = S_M + S_A + \dots)$, which indicates the position of wave action on the structure.

However, these fundamental exogenous variables are not the only ones possible. While other variables exist, such as the spectral width (ϵ) which defines the age and formation of the wave, these have not been taken into account in this estimate and this restriction in the number of external variables obviously introduces additional uncertainties.

Wave action is a stochastic process with two components: one of short duration established by the sea state and another of longer duration and of a basic period of one year in which successive sea states give rise to storms, rough seas and calms. These elements subsequently require suitable and continuous observation over a period of no less than 11 years and optimally over a multiple of this period, serving to form the basic hypercycle.

This observation should be carried out at the site of the new coastal structures, though the location is not generally known with sufficient foresight to guarantee the said observation periods. This problem gave rise to the creation of the Spanish Wave Recording Network (REMRO) which was approved by the former Ministry of Public Works in 1968. The specifications, which were literally taken from Bores (1973), (1974), were as follows:

- 1. Absence of Refraction: All sensors within the network are set at depths of over forty metres.

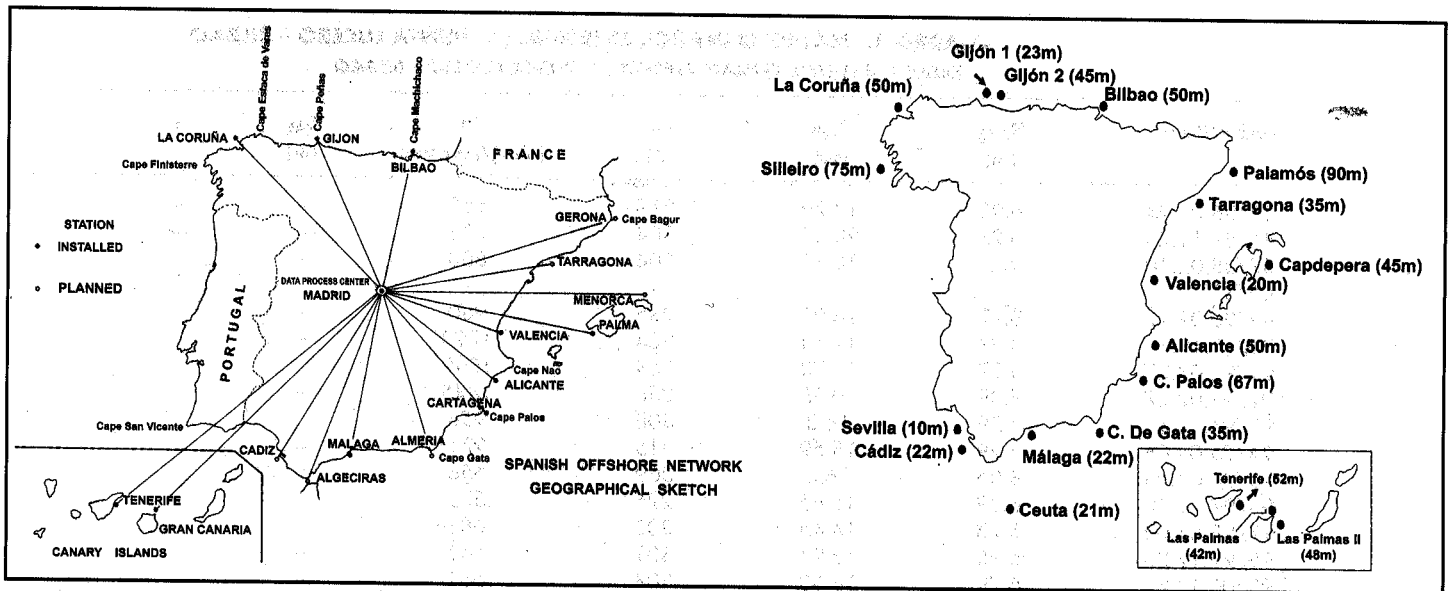


Fig. 1. La Red Exterior Española REMRO (1968).
A) Proyecto 1968.
B) Situación actual.
The Spanish Offshore Network (REMRO) (1968)
A) Original layout 1968.
B) Current layout

ejemplo, los sensores se instalan frente a cabos pronunciados –cabo Machichaco, por ejemplo–, a ser posible situados en cambios de dirección de la costa –cabo Palos, por ejemplo–.

- 3. Posibilidad de interpolación lineal entre cada dos estaciones: La distancia entre cada dos estaciones consecutivas se proyecta suficientemente pequeña para permitir la estima de las características del oleaje en cualquier punto intermedio por simple interpolación lineal entre las dos estaciones contiguas.

- 4. Posibilidad de correlación entre los puntos exteriores de la RED y los correspondientes de la plataforma costera, con profundidades reducidas (en donde se realiza el estudio correspondiente): Se prevé su estima por métodos numéricos y/o mediante la función de transferencia obtenida entre los sensores de la RED y los sensores instalados, al menos durante un año, en los puntos en estudio.

Los datos requeridos para un diseño estructural extremo constituyen un estadístico de extremos anuales, y la Matriz Climática Extremal correspondiente deberá formarse, al menos, con los valores de las variables fundamentales ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ , (N) , (S) ocurrientes durante el máximo de los temporales máximos anuales en el punto, o puntos, del trazado de la obra correspondientes a las secciones tipo.

En aproximaciones de mayor precisión debieran incluirse, según hemos indicado, la anchura del espectro (ϵ), etc.

En el Cuadro 1 presentamos el clima correspondiente al diseño estructural del dique de escollera de Punta Lucero del puerto de Bilbao.

- 2. Absence of fetch formation effect: With the exception of straight coastlines, such as that around Valencia, all sensors are set off prominent headlands such as that of Cape Machichaco, and, where possible, are located where the coastline changes directions such as that off the cape of Palos.

- 3. Possibility of lineal interpolation between adjacent stations: Adjacent stations were designed to be sufficiently close together to allow estimations of wave characteristics at any intermediate point by means of simple lineal interpolation between the adjacent stations.

- 4. Possible correlation between offshore points on the Network and nearshore points set at lesser depths (where the corresponding study is carried out). Estimation by means of numerical methods and/or via the transfer function obtained between sensors within the Network and those installed, for at least one year, in the study area.

Extreme structural design requires extreme annual statistics and the corresponding Extreme Climate Matrix should, at the very least, be established on the basis of the basic variables ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ , (N) , (S) occurring during the maximum of the annual maximum storms at the layout point or points of the prospective structure.

When greater precision is required, these calculations should take into account additional factors such as the spectral width (ϵ) in accordance with that indicated above.

The following table shows the corresponding conditions taken into account in the structural design of the Punta Lucero rubble-mound breakwater at the port of Bilbao. (Table 1).

CUADRO 1. MATRIZ CLIMÁTICA EXTREMAL (*) PUNTA LUCERO - BILBAO
TABLE 1. EXTREME CLIMATE MATRIX (*) PUNTA LUCERO - BILBAO

Fecha/Date	H _{1/3} (m)	T _{opt} (s)	θ (°)	N (olas)/(waves)	S _M (m)	S
85/86.03.24	6.92	14.79	277	563	-	-
86/87.11.23	6.27	20.03	304	873	-	-
87/88.02.10	6.6	18.71	304	880	-	-
88/89	-	-	-	-	-	-
89/90.02.12	6.77	14.97	285	980	-	-
90/91.12.11	4.87	11.14	304	1792	-	-
91/92.03.27	5.27	11.73	264	1049	-	-
92/93.02.27	4.89	10.25	256	1445	-	-
93/94.12.16	5.79	14.8	308	956	-	-
94/95.03.08	5.29	15.59	315	971	-	-
95/96.02.08	8.05	16.8	309	556	-	-
96/97.11.20	6.89	15.65	295	572	-	-
97/98.01.02	5.28	14.46	300	681	-	-
98/99.12.20	5.98	12.97	301	643	-	-
99/00.12.27	6.79	13.53	304	661	-	-
00/01.11.06	5.97	13.48	306	1264	-	-
01/02.11.09	4.61	9.84	295	2062	-	-
02/03.12.02	4.98	14.22	292	978	-	-

(*) El año climático se extiende desde el solsticio de verano hasta el solsticio de verano del año siguiente. En este caso consideramos que la marea meteorológica, en esta costa y a esa profundidad es pequeña comparada con la marea astronómica. Por consiguiente estimamos que $S = S_A$ y, en consecuencia, (S) será una variable independiente del estado del mar por lo que su determinación la realizamos independientemente. Uno de los problemas más importantes de las redes de registro es la vulnerabilidad de los registradores particularmente ante los temporales. Por este motivo pueden quedar fuera de servicio durante un plazo mayor o menor perdiéndose una información de altísimo interés. La solución más correcta desde el punto de vista de la información es la redundancia de la información, lo que puede conseguirse simplemente multiplicando el número de registradores en el punto. Pero ya que esto es insostenible por su coste puede al menos obtener la información en el mismo punto y sincronizadamente mediante registro directo y mediante previsión con métodos numéricos. Dada la sincronía durante los tiempos de servicio los métodos de previsión podrían tararse con la mayor precisión y en caso de avería del registrador los métodos de previsión podrían proporcionar una información valiosísima y suficientemente aproximada del oleaje. Esta podría considerarse como una especificación más a las cuatro propuestas en los años setenta.

(*) The climatic year runs from one year's summer solstice to that of the following year. In this case we consider that the meteorological tide on this coast and at this depth is small compared to the astronomical tide. As such, it is considered that $S = S_A$ and that S will subsequently be an independent variable from the sea state and will have to be established independently. One of the most important problems of the Wave Recording Networks is the vulnerability of the recorders, particularly during the biggest storms. For this reason, they can be put out of service, during a time that can be short or long, thus losing very interesting information. A solution to this problem consists in obtaining redundant information at each point of the Network, which can be achieved by multiplying the number of recorders at each point. Another cheaper solution is to obtain the information by means of direct recording and numerical forecasting at each point. With this solution, the forecasting methods used can be tested with great precision at each point and, in the case of failure of the recorders, these forecasts could provide an accurate information about wind waves. We can consider this procedure as an additional specification to the four proposed in the seventies.

Cómo decíamos en la Revista de Obras Públicas de Noviembre 1977:

"Ciertas variables -altura de ola, periodo, etc.,- dependen de un mismo agente, y aunque para un cierto estado del proceso pueda existir independencia entre ellas, al evolucionar todas ellas con el componente de estado, de alguna forma estarán relacionadas, ligadas, entre si. En general, siendo (E) la variable representativa del estado del proceso.

$$v_i = \sigma_{v_i}(E)y_{v_i} + \mu_{v_i}(E) \quad (1)$$

As we indicated in the Revista de Obras Públicas in November 1977:

"Certain variables - wave height, period, etc., - depend on the same agent, and while there may be independence between these variables for a certain state of the process, as they all develop with the state component, they are all somewhat interrelated. In general, where (E) is the variable representing the state of the process

$$v_i = \sigma_{v_i}(E)y_{v_i} + \mu_{v_i}(E) \quad (1)$$

o bien, en diseños con rango extremal, si (v_p) es la variable principal,

$$v_i = \sigma_{v_i}(v_p) y_{v_i} + \mu_{v_i}(v_p) \quad (2)$$

siendo (μ) el valor medio de la distribución, (σ) la desviación estándar e (y) la variable unitaria".

Tanto $\sigma_{v_i}(v_p)$ como $\mu_{v_i}(v_p)$ pueden ser funciones lineales, polinómicas, trascendentes, etc., correladas con la variable principal (v_p) y, sólo en caso de independencia, constantes.

Ya que consideramos que la variable principal es representativa del estado del mar, en el caso de rango de diseño extremal, sólo la variable principal sigue una distribución extremal, (Gumbel), mientras que el resto de la variables, correladas con ésta, siguen distribuciones medias (Gauss).

Admitiendo, entonces, una aproximación lineal,

$$\begin{aligned} \sigma(H_{1/3}) &= \sigma \\ \mu(H_{1/3}) &= bH_{1/3} + c \end{aligned}$$

las variables fundamentales, deducidas de la Matriz Climática Extremal correspondientes al Dique de Punto Lucero, Bilbao, vienen dadas por

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 0.888 y + 5.494 && \text{Gumbel} \\ T_{opt} &= 2.197 y + 1.789 H_{1/3} + 3.639 && \text{Gauss} \\ \theta &= 16.24 y + 3.948 H_{1/3} + 271.7 && \text{Gauss} \\ N_{1/3} &= 431.2 y + 995.4 && \text{Gauss} \\ S &= 0.402 y + 2.5 && \text{Gauss (*)} \end{aligned}$$

en donde (y) es la variable unitaria que relaciona las variables fundamentales ($H_{1/3}$, etc.) con la distribución de probabilidad correspondiente: Gumbel, Gauss, etc.

(*) Pendiente de un mejor ajuste.

Desde un punto de vista estrictamente matemático, cualquier otra distribución, Weibull, etc., puede ser utilizada. Nosotros utilizamos la distribución Gauss porque es la que siguen los procesos y fenómenos naturales, cuando el número de elementos es suficiente, y la distribución de Gumbel porque es, precisamente, la asíntota de las distribuciones de tipo exponencial, como es la de Gauss.

Por otra parte además de la correlación "simple" con una sola variable, la principal, caben estimas de la distribución multivariada de probabilidad más "complejas", con dos y mas variables de correlación.

and in designs with extreme range, where (v_p) is the main variable,

$$v_i = \sigma_{v_i}(v_p) y_{v_i} + \mu_{v_i}(v_p) \quad (2)$$

where (μ) is the mean distribution values, (σ) the standard deviation and (y) the unit variable".

Both $\sigma_{v_i}(v_p)$ and $\mu_{v_i}(v_p)$ may be lineal, polynomial, transcendental functions, etc., correlated with the main variable (v_p) and shall only be constant in the case of independence.

As it has been considered that the main variable is representative of the sea state, in the extreme design range only the main variable will follow an extreme distribution (Gumbel), while the remainder of the variables correlated with this one will follow mean distributions (Gauss).

When accepting a lineal approximation

$$\begin{aligned} \sigma(H_{1/3}) &= \sigma \\ \mu(H_{1/3}) &= bH_{1/3} + c \end{aligned}$$

the basic variables deduced from the Extreme Climatic Matrix for the Punto Lucero Breakwater in Bilbao, are given by:

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 0.888 y + 5.494 && \text{Gumbel} \\ T_{opt} &= 2.197 y + 1.789 H_{1/3} + 3.639 && \text{Gauss} \\ \theta &= 16.24 y + 3.948 H_{1/3} + 271.7 && \text{Gauss} \\ N_{1/3} &= 431.2 y + 995.4 && \text{Gauss} \\ S &= 0.402 y + 2.5 && \text{Gauss (*)} \end{aligned}$$

where (y) is the unit variable relating the basic variables ($H_{1/3}$, etc.) with the corresponding probability distribution: Gumbel, Gauss, etc.

(*) Pending greater adjustment

From a strictly mathematical point of view, any other distribution, such as Weibull or others, may be used. We have used the Gauss distribution when there is a sufficient number of elements because this is the form followed by natural processes and occurrences, and the Gumbel distribution as this is precisely the asymptote of exponential type distributions such as those of Gauss.

In addition to the "simple" correlation with just the main variable, it is also possible to make more "complicated" estimates of the multivariate probability distributions, using two or more correlation variables.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS OBRAS MARÍTIMAS. DOMINIO DE FALLO

Las diversas partes de las obras —por ejemplo, espaldón, manto principal, bermas, etc., en el caso de los diques de escollera—, así como la obra completa, como un conjunto, pueden fallar de diferentes maneras, con distintos modos de fallo, que dependen de muy variados factores y producen distintos efectos: Ruina de la obra, agitación en las dársenas, etc. Algunos de los modos de fallo de los componentes de las obras pueden ser *excluyentes*, como por ejemplo fallo al vuelco y al deslizamiento de los espaldones y del cuerpo de los diques verticales.

Agrupamos en *clases* a todos aquellos modos de fallo, (*homogéneos*), que producen los mismos efectos. No deberían combinarse fiabilidades de distintas *clases* de fallo; Por ejemplo la extracción de cantos del manto (Fallo Estructural), con el rebase del dique (Fallo Funcional).

Las diferentes *clases* pueden, a su vez, dividirse en *subclases* de fallo, según los diferentes enfoques —estático, mecánico, químico, etc.— de cómo se origina el fallo. En la *clase estructural* distinguimos: fallo de *estabilidad*, fallo *mecánico* y fallo *material*.

Las obras puede considerarse como *compuestas* cuando están formadas por partes (*elementos*) que se repiten pretendidamente iguales, sólo diferenciadas por la incertidumbres propias de su *construcción*. Son obras *singulares* en caso contrario. Son ejemplos de obras *compuestas* las obras *lineales*, como los diques y pantalanés, y de obras *singulares* las plataformas de perforación petrolífera y los diques de Alba.

En las obras *compuestas* cabe entonces distinguir entre fallo *elemental*, cuando el fallo afecta a un sólo elemento, o *integral* cuando afecta a todos. En el caso de las obras *singulares* sólo cabe la alternativa de *fallo integral*.

Salvo en el caso de resonancia, que se procura evitar, el fallo de los componentes se produce según dos alternativas: de forma *gradual*, con una fase de averías crecientes (por la acción de varias olas grandes, superiores a un cierto umbral, que hemos denominado *olas activas*, Bores (1968)) o de forma *instantánea* (por la acción de una sola ola, la mayor del temporal máximo anual, del año pésimo durante el periodo de retorno previsto para la obra). Las averías, el daño, del componente pueden ser *inicial*, *parcial* o *total*, con fallo gradual, o sólo *total* con fallo instantáneo.

Para resistir la acción de los agentes exteriores ó exógenos, definidos por sus correspondientes variables, cada componente de las obras viene determinado por los valores de sus variables endógenas, peso de los cantos, talud del dique, etc. En principio, todas estas variables, exógenas y endógenas, pueden ser: *Libres*, dependiendo, únicamente, del azar, como las variables climáticas, el encaje de los cantos, etc.; *fi*-*jas*, impuestas por *decisiones de rango superior* (análisis fun-

2. STRUCTURAL BEHAVIOR OF COASTAL STRUCTURES. DOMINIUM OF FAILURE

The various components of the coastal structure, e.g., crown wall, armour layers, berms, etc., in the case of rubble mound breakwaters, and the structure as a whole, may fail in different ways: with different failure modes and effects which depend on a broad range of factors. Some of the failure modes may be exclusive to the component in question, such as the overturning or slipping of the crown walls and the body of vertical breakwaters.

We may then group all homogeneous failure modes which produce the same effects. However, one should not combine the reliabilities against different types of failure: e.g. the dislodging of rock units (Structural failure) with the overtopping of the breakwater (functional failure).

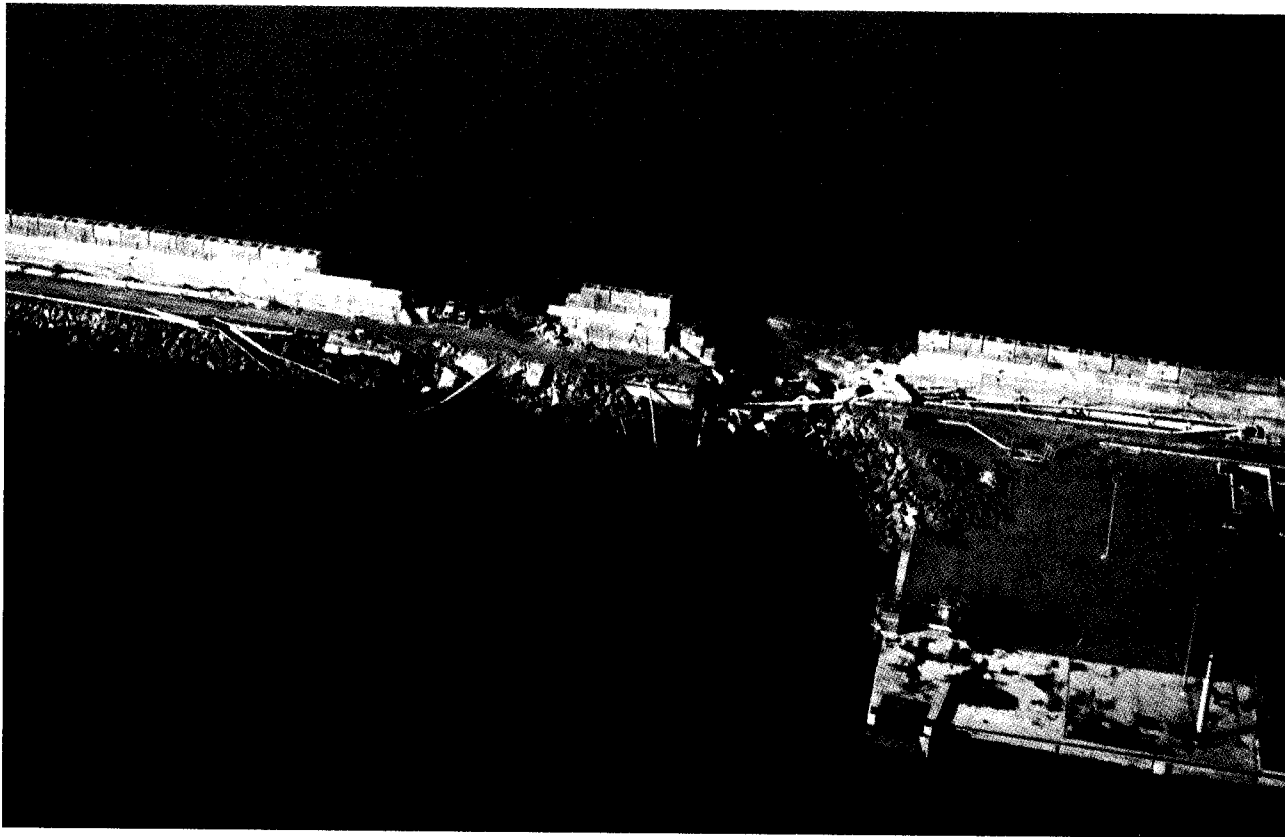
The different classes may be divided, in turn, into failure subclasses, according to different perspectives on how the failure originated and whether it be static, mechanical or chemical, etc. In this structural class we may consider: stability failure, mechanical failure and material failure.

Coastal works may be considered as composite structures when they are formed by parts (elements) which are repeated in a similar fashion and may only be distinguished by the inherent uncertainties in any construction. When this is not the case, these structures are considered as individual or single structures. Composite structures may be seen in the form of lineal works such as breakwaters and jetties while drilling platforms and dolphins are examples of single structures.

In composite structures it is necessary to distinguish between component failure, when the failure affects just one element, and integral failure when it affects the whole. In single structures it is only possible to consider integral failure.

Component failure, except in the case of resonance which should be avoided, usually arises in two ways: gradual failure with increasing deterioration (due to the action of various large waves, over a certain threshold, and which we have referred to as active waves, Bores (1968) or instantaneous failure or collapse (by the action of a single wave, the greater of the maximum annual storm waves in the worst year of the structure's established return period). Under gradual failure the damage to the component may be initial, partial or total but under instantaneous failure the damage will be total.

In order to resist the action of external or exogenous agents, defined by their corresponding variables, each structural component is established in accordance with the values of their endogenous variables, rock weight, slope of breakwater, etc. At the outset these external and internal variables may be divided into: free variables, which depend on random factors, such as climatic variables, the setting of the rock, etc; fixed variables, imposed by decisions of a higher order (functional analysis, layout, etc.); and design



Fallo elemental
en el dique de
Punta Lucero,
Bilbao en
1976/
Elemental
failure of the
Punta Lucero
breakwater
in Bilbao in
1976.

cional, trazado, etc.); y de *diseño*, que siguiendo patrones sancionados por la experiencia, la economía, etc., se establecen cómo *estándares* y simplifican el proceso de dimensionamiento de las obras: espesor de los mantos, etc.

Cuando la desviación estándar (σ) de alguna variable endógena, ó exógena, es muy pequeña, comparada con su correspondiente valor medio (μ), tal cómo sucede con el peso de los bloques artificiales (W_b), esta variable puede considerarse cómo *determinista*, quedando entonces determinada esta variable por un sólo número (μ), Bores (1980) (1982), constante, ($W_b = \mu_b$), en lugar de tres (σ, μ, p), o mas, cómo ocurre con las variables *aleatorias*, por ejemplo ($H_{1/3} = \sigma y + \mu$).

Muy distinto es el caso de la variable ($\cot \alpha$), cuya dispersión afecta no sólo al ángulo del talud (α) sino a la propia construcción del dique, ya que, por estar colocados los cantos al azar, tanto su orientación como su encaje y el espesor de los mantos ofrecen una gran variedad, tanto a lo largo como a lo ancho del manto.

La construcción del *modelo físico* introduce, pues, nuevas *incertidumbres*, físicas, que se agregan a las anteriormente señaladas. Estas incertidumbres son mayores en la naturaleza.

En la *Revista de Obras Públicas* de noviembre 1977, decíamos :

"Las variables exógenas de las acciones, sobrecargas, sollicitaciones, etc. de los agentes climáticos, geodinámi-

variables, which follow guidelines laid down by experience, economy, etc., and which are established as standards and help simplify the dimensioning of the structures, thickness of layers, etc.,

When the standard deviation (σ) of an endogenous or exogenous variable is very small when compared to its corresponding mean value (μ), as is the case with the weight of artificial blocks (W_b), this variable may be considered as a determinant variable which is established as just one number (μ), Bores (1980) (1982) which is constant ($W_b = \mu_b$), instead of three (σ, μ, p) or more as is the case with the random variables such as ($H_{1/3} = \sigma y + \mu$).

A completely different case is that of the variable ($\cot \alpha$) where the dispersion does not only affect the angle of the slope (α) but the construction of the breakwater itself, as the stone is set randomly in terms of both direction and housing and the thickness of the layers varies widely throughout its length and breadth.

The construction of the physical model subsequently introduces further physical uncertainties in addition to those indicated above. These uncertainties are greater in nature.

In the *Revista de Obras Públicas* of November 1977, we stated that:

"In all random multivariate analysis the exogenous variables of actions, loading, stresses, etc., and of

cos, etc. pueden ser relacionados en cada análisis aleatorio multivariado con las variables endógenas, estructurales, funcionales, etc. por medio de un modelo matemático, físico, etc. definido por la función:

$$\kappa(v_1, \dots, v_i, \dots) = 0 \quad (8)$$

que caracteriza las condiciones críticas de falla y sirve de límite de integración de

$$p = \int_{\kappa} f(v_1, \dots, v_i, \dots) dg(v_1) \dots dg(v_i) \dots \quad (9)$$

(integral de Lebesgue-Stieltjes) que representa la probabilidad multivariada de fallo al nivel de riesgo (de averías) que se considere".

En el caso de los diques de escollera, el límite de integración, ($\kappa = 0$) viene dado por la hipersuperficie característica

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S_M, S_A, \dots; \cot \alpha, W_b, \gamma_b, \gamma_a) = 0 \quad (8)_a$$

que, considerando la variable

$$S = S_M + S_A + \dots$$

como compuesta y las variables (W_b), (γ_b), (γ_a), como deterministas, toma la forma

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S; \cot \alpha) = 0 \quad (8)_b$$

que es un funcional, que por afectar a un problema físico, en donde la experimentación es habitual, tiene una fácil, aunque algo laboriosa, solución.

Para simular la acción del oleaje en condiciones tales como ocurren en la naturaleza, los ensayos se realizaron fijando un estado ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ) y un nivel del mar, (S), constantes. En esta situación, en cada ensayo (e_1), se mantuvo el ataque de forma continua, chequeando el crecimiento de la avería en función del número de olas (N).

Como consecuencia de las incertidumbres originadas tanto por el modelo matemático como por el modelo físico, etc., según ya hemos indicado, si realizamos un segundo ensayo idéntico al anterior (e_2), con el mismo estado, ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ), y con el mismo nivel, (S), del mar, las averías del componente en función de (N) son distintas, evolucionan de forma diferente. Lo mismo ocurre en los sucesivos ensayos (e_i) iguales y posteriores. También lo mismo ocurre y en mayor medida, en la naturaleza.

climatic or geodynamic agents, etc., may be related to the endogenous, structural and functional variables by means of a mathematical or physical model defined by the function:

$$\kappa(v_1, \dots, v_i, \dots) = 0 \quad (8)$$

which characterizes the critical failure conditions and serves as the integration limit of

$$p = \int_{\kappa} f(v_1, \dots, v_i, \dots) dg(v_1) \dots dg(v_i) \dots \quad (9)$$

(Lebesgue-Stieltjes integral) which represents the multivariate probability of failure at the considered level of risk (of damage)".

In the case of rubble mound breakwaters, the integration limit, ($\kappa = 0$) is given by the characteristic hypersurface

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S_M, S_A, \dots; \cot \alpha, W_b, \gamma_b, \gamma_a) = 0 \quad (8)_a$$

which, when taking the variable

$$S = S_M + S_A + \dots$$

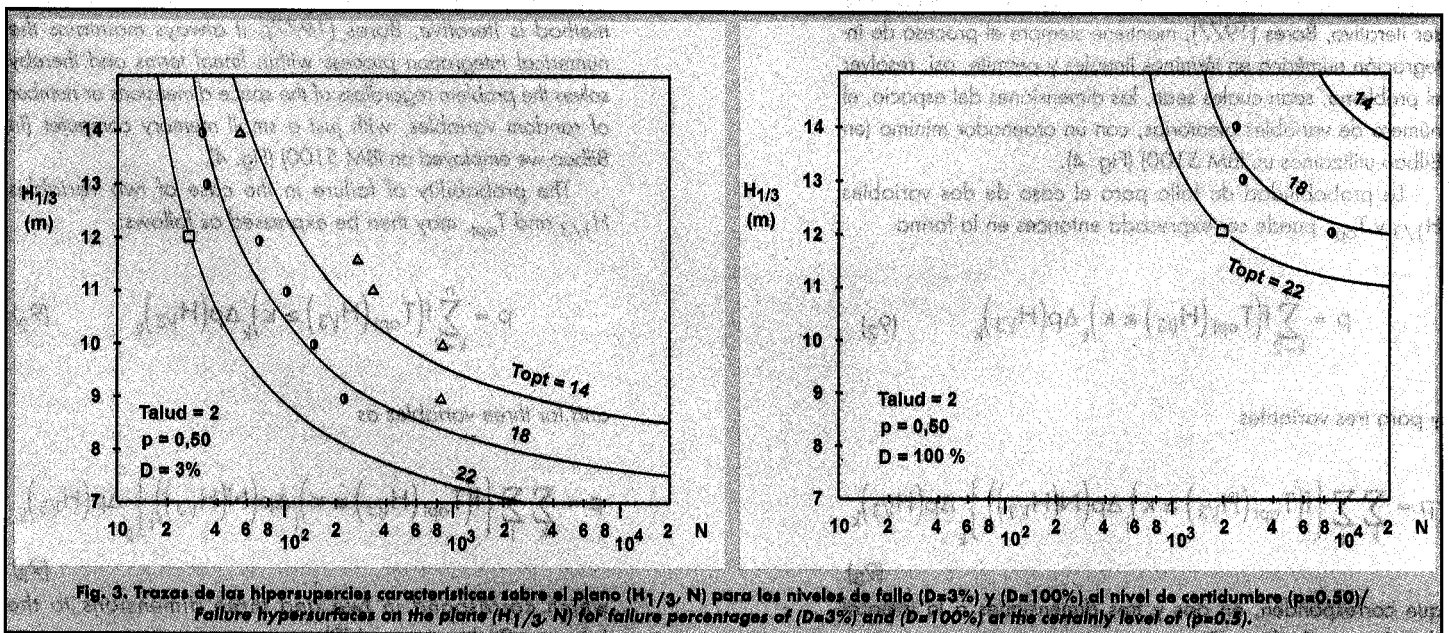
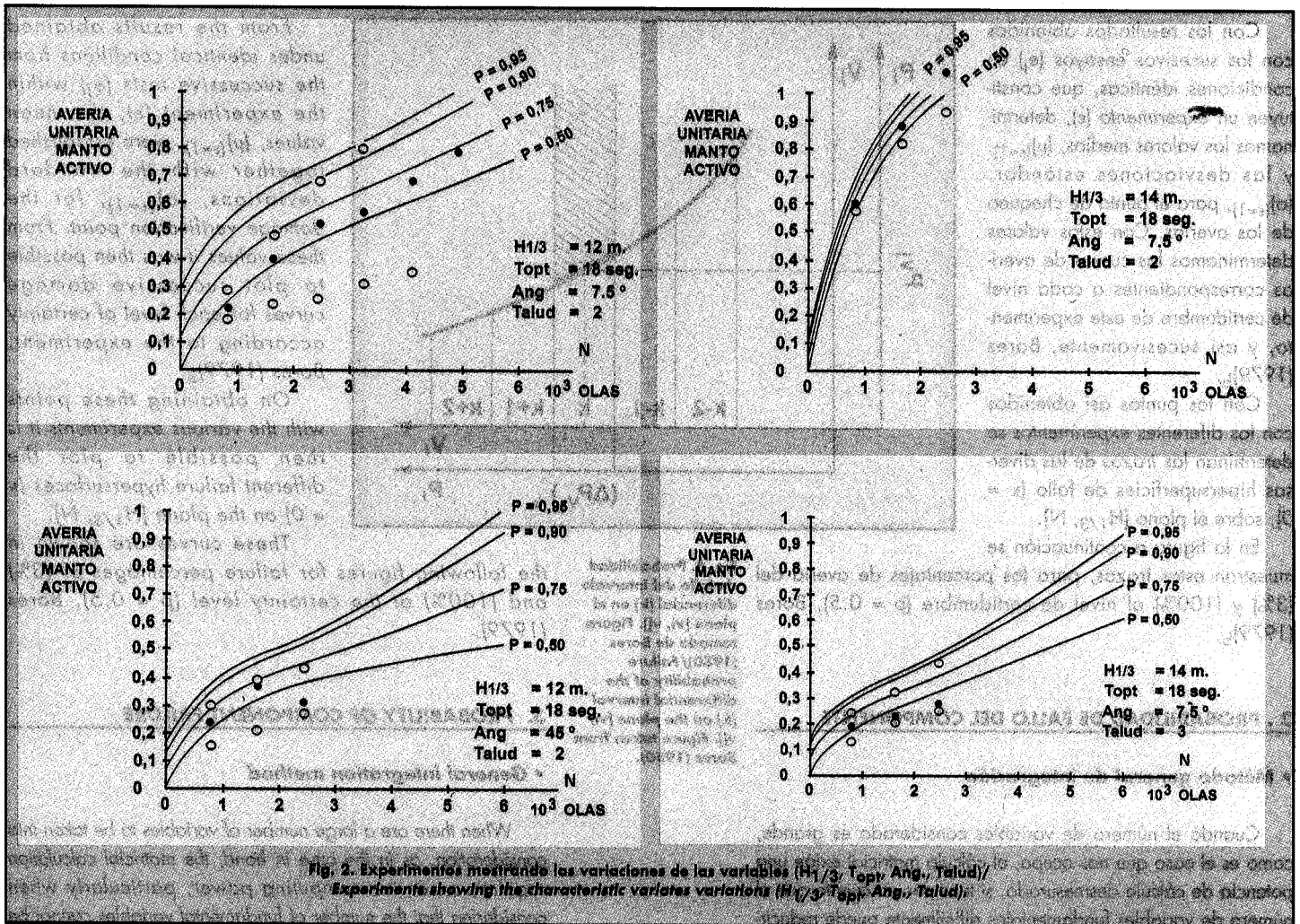
as a composite and the variables (W_b), (γ_b), (γ_a), as deterministic, takes the form of

$$\kappa(H_{1/3}, T_{opt}, \theta, N, S; \cot \alpha) = 0 \quad (8)_b$$

which is a functional which affects a physical problem where experimentation is common and, therefore, has an easy, though somewhat laborious, solution.

In order to model wave action under natural conditions, tests are carried out by establishing a constant state ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ) and sea level (S). In this way, the attack was continuously maintained in each test (e_1) and the increase in damage verified in accordance with the number of waves (N).

Due to the uncertainties arising from both the mathematical and physical model, when a second test (e_2) was carried out in an identical fashion to the first, with the same state ($H_{1/3}$, T_{opt} , θ) and sea level (S), the component damage in accordance with (N) was seen to be different and developed in a different way. This also occurred in subsequent identical tests (e_i), in much the same manner as occurs in nature.



Con los resultados obtenidos con los sucesivos ensayos (e_i) en condiciones idénticas, que constituyen un experimento (ϵ), determinamos los valores medios, $(\mu)_{(\epsilon=1)}$, y las desviaciones estándar, $(\sigma)_{(\epsilon=1)}$, para el punto de chequeo de las averías. Con estos valores determinamos las curvas de averías correspondientes a cada nivel de certidumbre de este experimento, y así sucesivamente, Bores (1979)_b.

Con los puntos así obtenidos con los diferentes experimentos se determinan las trazas de las diversas hipersuperficies de fallo ($\kappa = 0$), sobre el plano $[H_{1/3}, N]$.

En la figura a continuación se muestran estas trazas, para los porcentajes de avería del (3%) y (100%) al nivel de certidumbre ($p = 0.5$), Bores (1979)_b.

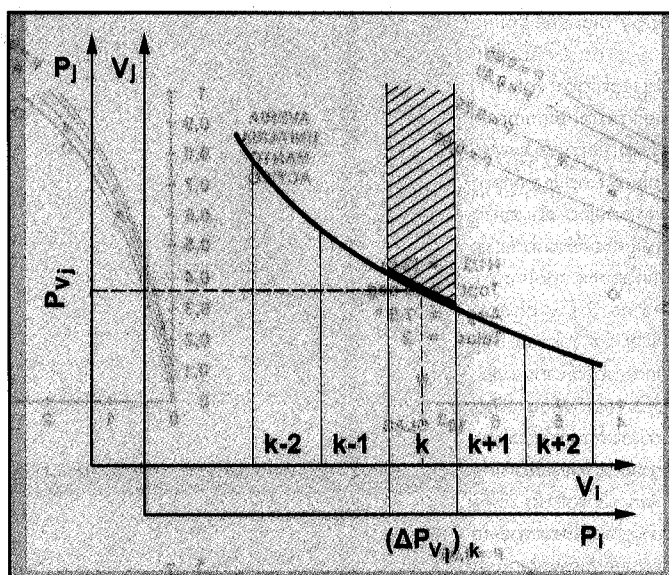


Fig. 4. Probabilidad de fallo del intervalo diferencial (k) en el plano $[v_i, v_j]$. Figura tomada de Bores (1980)/Failure probability of the differential interval (k) on the plane $[v_i, v_j]$. Figure taken from Bores (1980).

From the results obtained under identical conditions from the successive tests (e_i) within the experiment (ϵ), the mean values, $(\mu)_{(\epsilon=1)}$, were established together with the standard deviations, $(\sigma)_{(\epsilon=1)}$, for the damage verification point. From these values it was then possible to plot successive damage curves for each level of certainty according to the experiment, Bores (1979)_b.

On obtaining these points with the various experiments it is then possible to plot the different failure hypersurfaces ($\kappa = 0$) on the plane $[H_{1/3}, N]$.

These curves are shown in the following figures for failure percentages of (3%) and (100%) at the certainty level ($p = 0.5$), Bores (1979).

3. PROBABILIDAD DE FALLO DEL COMPONENTE

• Método general de integración

Cuando el número de variables considerado es grande, como es el caso que nos ocupa, el cálculo matricial exige una potencia de cálculo desmesurado, si tenemos en cuenta que el número de variables fundamentales difícilmente puede reducirse por debajo de seis. El método de integración numérica, por ser iterativo, Bores (1977), mantiene siempre el proceso de integración numérica en términos lineales y permite, así, resolver el problema, sean cuales sean, las dimensiones del espacio, el número de variables aleatorias, con un ordenador mínimo (en Bilbao utilizamos un IBM 5100) (Fig. 4).

La probabilidad de fallo para el caso de dos variables $H_{1/3}$ y T_{opt} , puede ser expresada entonces en la forma

$$p = \sum_{k=2}^n f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_k \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_2)$$

y para tres variables

$$p = \sum_k \sum_i \left\{ f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_i \Delta p(N(H_{1/3}))_i \right\} \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_3)$$

que corresponden, en dos y tres dimensiones a la integral de Lebesgue-Stieltjes, (9).

3. PROBABILITY OF COMPONENT FAILURE

• General integration method

When there are a large number of variables to be taken into consideration, as in the case in hand, the matricial calculation requires excessive computing power, particularly when considering that the number of fundamental variables cannot be reduced by any lower than six. As the numerical integration method is iterative, Bores (1977), it always maintains the numerical integration process within lineal terms and thereby solves the problem regardless of the space dimensions or number of random variables, with just a small memory computer (in Bilbao we employed an IBM 5100) (Fig. 4).

The probability of failure in the case of two variables $H_{1/3}$ and T_{opt} , may then be expressed as follows:

$$p = \sum_{k=2}^n f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_k \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_2)$$

and for three variables as

$$p = \sum_k \sum_i \left\{ f(T_{opt}(H_{1/3}) \geq \kappa)_i \Delta p(N(H_{1/3}))_i \right\} \Delta p(H_{1/3})_k \quad (9_3)$$

which correspond in two and three dimensions to the Lebesgue-Stieltjes integral (9).

La extensión a mas de tres variables aleatorias, a mas tres dimensiones, es inmediata.

4. FIABILIDAD DE DISEÑO ADMISIBLE PARA LA OBRA

Conocida la fiabilidad del sistema, de la obra, ineludiblemente se nos plantea una cuestión fundamental: ¿Es alta o baja la fiabilidad obtenida para el dique, para el sistema?, ya que en términos de probabilidad la seguridad absoluta es una utopía. El riesgo de fallo siempre existe.

En nuestros Apuntes de la Escuela, "Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño", Bores (1980), propusimos que la Fiabilidad de diseño de las obras marítimas debía estar basada en los siguientes tres principios fundamentales:

- I. Todas las obras, todos los sistemas de diseño, responsablemente diseñados deben tener una fiabilidad admisible o de diseño, (Φ), que, obviamente, debe cumplir la condición fundamental

$$1 \geq \Phi \geq 0.50$$

ya que, por razones obvias, incluso las obras mas insignificantes debieran tener una fiabilidad no inferior a ($\Phi = 0.50$).

- II. La fiabilidad admisible, (Φ), lógicamente debe depender del grado de importancia que en principio consideramos dependiente del ámbito geográfico a que afectan estas obras, así como al rango de importancia dentro de ese ámbito.
- III. La fiabilidad de diseño de las obras debiera ser también función de diversos factores que afectan a las consecuencias del fallo de las obras dentro de su ámbito. En principio debieran ser mas seguras, tener mayor fiabilidad (Φ), las obras, los sistemas, cuyo fallo puede ocasionar la pérdida de vidas humanas o quebranto de su bienestar, afectar a la seguridad nacional, a la integridad y estabilidad ambiental del medio y/o producir la pérdida y/o inmovilización de bienes importantes.

Es decir, la fiabilidad admisible o de diseño es un problema multivariado en el que consideramos como "variable principal" el grado de importancia de las obras, (G), compuesta por dos variables simples: El ámbito y el rango de importancia.

Consideramos que esta "variable principal" se distribuye, como primera estima, siguiendo la distribución de Gumbel, por ejemplo, ya que tratamos de determinar con la mayor garantía posible su comportamiento en los extremos.

En 1980, consideramos el espacio geográfico/económico dividido en tres ámbitos (Planetario/Regional/Local), cualitativamente bien diferenciados y con connotaciones cuantitativas del orden de ($10^4/10^2/10^0$ M€), lo que, dada la enor-

The extension to over three random variables, to over three dimensions, is immediate.

4. ADMISSIBLE DESIGN RELIABILITY OF THE COASTAL STRUCTURE

On ascertaining the reliability of the system or structure, we then have to ask a fundamental question: Is the reliability of the breakwater high or low with regards to the system? as in probability terms, absolute security is an unobtainable goal and the risk of failure is always present.

In our Course Notes, "Analysis of the reliability of design systems", Bores (1980), we proposed that the design reliability of maritime works be based on the following three essential principles:

- I. All responsibly designed works and systems should have an admissible reliability or design reliability (Φ), which obviously has to comply with the fundamental condition

$$1 \geq \Phi \geq 0.50$$

as for, obvious reasons, even the most insignificant works should have a reliability of no less than ($\Phi = 0.50$).

- II. The admissible reliability (Φ) logically depends on the degree of importance that we attach to the geographical environment affecting the work and the level of importance within this environment.
- III. The design reliability of coastal structures should also be considered in terms of the consequences of the failure of the structure within its environment. At the outset, coastal structures should be more reliable and safer when their possible failure poses a risk to human life or welfare, when it may affect national safety, environmental integrity or stability and/or cause the loss and/or inserviceability of important assets.

The admissible or design reliability may then be seen as a multivariate problem in which the "main variable" is the degree of importance of the works (G), composed of two simple variables: The environment and the level of importance.

At the outset, this "main variable" is taken to be distributed in accordance with Gumbel distribution, as we are attempting to establish extreme behaviour with the highest possible degree of certainty.

In 1980 we considered economic/geographic space to be divided into three areas (World/Regional/Local), which are qualitatively very different and with quantitative connotations of around ($10^4 / 10^2 / 10^0$ M€), which, given the vast breadth of the areas in question, can be subdivided

me amplitud de los ámbitos considerados, cabe, evidentemente, matizar mediante una división tricotómica adicional, con rangos, (alto / medio / bajo), (H / M / L).

La unión de ambos criterios nos produce un espacio aleatorio bidimensional de decisión, que podemos representar como una matriz simétrica sencilla en la que se valoran con la misma importancia la situación de (ámbito local/rango alto) y (ámbito planetario/rango bajo).

Estimando las sucesivas bandas de partición del dominio

$$1 \geq \Phi \geq 0,50$$

de acuerdo con el principio I, y admitiendo una partición de la distribución de probabilidad con incrementos (Δy) de la variable unitaria (y) crecientes, según una progresión geométrica de razón tres, obtenemos:

GRADOS de IMPORTANCIA, Matriz de incrementos (Δy)				
ámbito geográfico (nivel económico)		planetario 10 ⁴ M€	regional 10 ² M€	local 10 ⁰ M€
rango	alto	8.1	2.7	0.9
	medio	2.7	0.9	0.3
	bajo	0.9	0.3	0

Considerando como valor inicial de (y) el correspondiente a una probabilidad ($p = 0.50$) que en el caso de la distribución de Gumbel es ($y = 0.367$), y sumando esta cantidad a todos los distintos miembros de la matriz anterior resulta:

GRADOS de IMPORTANCIA, Matriz de la variable unitaria (y)				
ámbito geográfico (nivel económico)		planetario 10 ⁴ M€	regional 10 ² M€	local 10 ⁰ M€
rango	alto	8.467	3.067	1.267
	medio	3.067	1.267	0.667
	bajo	1.267	0.667	0.367

de la cual, inmediatamente, se deduce la matriz de probabilidad reflejada en el Cuadro 2.

Ahora bien el principio III nos señala que la fiabilidad de las obras debiera depender también de otros factores entre los cuales se encuentra, como no, el coste de la obra, pero no solo el coste. Existen otros factores, no fácilmente valorables económicamente, que también deben ser considerados.

La actividad ó actividades –portuaria, defensa de costas, etc.– del sistema en la que se integran las obras es también un factor importante en la decisión sobre la fiabilidad de diseño de éstas, pues el fallo de las obras repercutiendo sobre el funcionamiento del sistema tiene unas consecuencias muy distintas según esa actividad o actividades.

into levels of importance (high / medium / low) (H / M / L).

The combination of both criterions provides a random two-dimensional area of decision, which may be represented as a simple symmetrical matrix in which the same degree of importance is given to (local area / high level) and (world area / low level).

By estimating the successive partition bands of the domain

$$1 \geq \Phi \geq 0.50$$

In accordance with the first principal, and when accepting a partition in the probability distribution with increasing increments (Δy) of the unit variable (y) according to the geometrical progression of point three, we obtain:

DEGREE OF IMPORTANCE Increment matrix (Δy)				
geographical area (economic level)		world 10 ⁴ M€	regional 10 ² M€	local 10 ⁰ M€
rank	high	8.1	2.7	0.9
	medium	2.7	0.9	0.3
	low	0.9	0.3	0

When taking the initial value of (y) to be that corresponding to a probability ($p = 0.50$) which in the case of Gumbel distribution is ($y = 0.367$), and adding this sum to all the different members of the previous matrix, we get:

DEGREE OF IMPORTANCE Unit variable matrix (y)				
geographical area (economic level)		world 10 ⁴ M€	regional 10 ² M€	local 10 ⁰ M€
rank	high	8.467	3.067	1.267
	medium	3.067	1.267	0.667
	low	1.267	0.667	0.367

from which, we may then deduce the probability matrix. (Table 2).

In the 3rd principle we indicated that the reliability of port and coastal works also depends on other factors which obviously include cost but which are not purely limited to this. There are additional factors which cannot easily be considered in financial terms but which need to be taken into account.

The port or coastal defence activity or activities provided by the system formed by the coastal works also serves as an important factor in any decision regarding the reliability of the same, as any failure will have repercussions on the operation of the system and will have very different consequences according to the activity or activities.

CUADRO 2/TABLE 2
G. GRADOS de importancia, Matriz de probabilidad (p) - Gumbel/G. DEGREE OF IMPORTANCE, Probability matrix (p) - Gumbel

ámbito geográfico/geographical area (nivel económico medio/economic level)		planetario/world 10 ⁴ M€	regional/regional 10 ² M€	local/local 10 ⁰ M€
rango/rank	alto/ high	0.9999957	0.98607	0.81158
	medio/medium	0.98607	0.81158	0.5984
	bajo/low	0.81158	0.5984	0.5

Una más clara y precisa asignación de la estima de equivalencias entre los conceptos lingüísticos, cualitativos, y los "equivalentes" cuantitativos de los valores medios y de los límite de las bandas viene dado a continuación:

A clearer and more precise allocation of the estimated equivalence between the qualitative concepts and the quantitative "equivalence" of the average values and band limits, is given below:

CUADRO 3/TABLE 3
G. GRADOS de importancia, Bandas de probabilidad (p) - Gumbel/G. DEGREE of importance, Probability bands (p) Gumbel

Ámbito / Rango Area / rank			Fiabilidad/Reliability	Valores/Average medios/values bandas/band	Valores/Average límites/limits bandas/band
Planetario/World	Regional/Regional	Local/Local			
alto/high			0.9999957	10 ⁴	5.10 ³
medio/medium	alto/high		0.98507	10 ³	5.10 ²
bajo/low	medio/medium	alto/high	0.8116	10 ²	5.10 ¹
bajo/low	medio/medium		0.598	10 ¹	5.10 ⁰
		bajo/low	0.5	10 ⁰	

La paralización de un puerto deportivo por fallo de alguna de las obras que lo integran es, evidentemente, indeseable pero ello supone, en el peor de los casos, que los usuarios tengan que cambiar su deporte preferido por otro deporte durante el tiempo de reparación.

Distinto es el caso de los puertos comerciales, en cuyo caso lo que se paraliza es la actividad económica y comercial directa o indirectamente relacionada con el puerto.

Las bases navales constituyen una modalidad portuaria que deben tener la máxima fiabilidad, pues perder una guerra o aunque solo sea una batalla por el fallo de una obra portuaria, de un buque, etc. puede tener consecuencias históricas. Recordemos la Armada Invencible.

Distinguimos, así, tres niveles de actividad: *Defensa, producción/servicios* y recreo, incluyendo en defensa no solo la militar sino la de protección civil, sanidad, etc.

Cabe extender la reflexión sobre el factor actividad a un aspecto que consideramos, de alguna manera, complementario de éste y que nos merece la mayor atención: La *indispensabilidad*.

Desde el punto de vista de la teoría de sistemas las obras marítimas pueden resultar *indispensables* al ser nudos del sistema de transporte y su fallo puede paralizar partes fundamentales de este sistema, afectando, en ocasiones decisivamente, entornos geográficos fundamentales y/o sectores comerciales básicos, sin posibilidad, razonable, de otras alternativas.

Por ejemplo, el puerto de Rotterdam es indispensable para tránsito de mercancías de la Europa Occidental, su paralización repercute sobre la totalidad del planeta en forma importan-

The closure of a pleasure harbour due to the failure of any component structure is obviously undesirable but even in the worst of cases only prevents users from pursuing their activities during the period of repair.

However, in the case of a commercial port, this stoppage affects economic and commercial activity which is both directly and indirectly related to the port in question.

Naval bases form a type of port which require maximum reliability, as to lose a war or even just a battle as a result of the failure of port works, a ship, etc. may have historic consequences. One only has to recall the Spanish Armada.

We may then establish three levels of activity: Defence, production / services and recreation, where defence includes civil protection, sanitation etc., as well as military defence.

These deliberations on the activity factor should also include one aspect which may be considered as supplementary to the same, but one which requires our utmost attention: the indispensability of the maritime work.

From a theoretical point of view all port and coastal works may be considered indispensable as they form connections within the transport system and any failure may paralyze essential parts of this system which may decisively affect fundamental geographic areas and/or vital commercial sectors without leaving any other reasonable alternative.

By way of example the port of Rotterdam is essential for the transport of goods to and from western Europe and any closure would have important repercussions around the globe, as it could not be replaced by any nearby port. A stoppage at the fishing port of Bermeo would force vessels to employ neighbouring port or ports such as Lequeitia, Motrico or even

te, no puede ser substituido por ningún puerto cercano. La paralización del puerto pesquero de Bermeo obliga a derivar su tráfico a algún otro puerto o puertos cercanos, como Lequeitio, Motrico, e incluso al propio Bilbao. Su indispensabilidad es baja y su ámbito meramente local. La *indispensabilidad* puede entonces ser *total, sectorial o nula*.

Factor de fundamental importancia en el diseño de las centrales nucleares, industrias químicas de alta toxicidad, etc., es la *peligrosidad*.

Por las consecuencias del fallo distinguimos tres niveles de *peligrosidad*: *accidental, catastrófica, genética*.

Consideramos que la *peligrosidad* del fallo de un sistema es accidental cuando sus efectos se restringen al marco personal, individual, y al presente, aunque pueda haber varios individuos afectados y alguno pueda quedar inválido.

Tal es el caso de la mayor parte de los accidentes de circulación, de los accidentes laborales, etc.

Cuando las consecuencias del fallo del sistema alcanzan a un gran número de personas, como en el caso de la rotura de presas, de accidentes de aviación, etc., afectando al cuerpo social, la *peligrosidad* será denominada *catastrófica*.

En los niveles anteriores se excluye todo daño genético a la especie. Cuando este daño ocurre la *peligrosidad* será denominada *genética*.

El *coste económico*, considerado desde el siglo XX como básico no debe valorar únicamente los gastos derivados de la restauración de la obra sino también los bienes directamente, afectados y/o dependientes, así como la restauración del entorno ambiental y social afectados, incluido el *daño psicológico* (por pérdida de imagen, alarma social, etc.). Cabe entonces considerar tres niveles, acumulativos, de consideración del coste económico: El *coste menor* (bajo) correspondiendo únicamente a los gastos de reparación de la obra, el *coste medio* al anterior mas la compensación de los bienes directamente afectados o dependientes y mayor (alto) al anterior mas los de restauración del entorno ambiental y social afectados, incluido el *daño psicológico* (por pérdida de imagen, alarma social, etc.).

Existen, pues, diversos factores que modifican el grado de importancia, *principio III*, y que hacen el problema multivariado. En cada caso particular, para cada uno de los cuatro factores considerados: Actividad, Indispensabilidad, Coste y Peligrosidad, existe un valor del grado de importancia (G), que resulta modificado, ponderado, por dicho factor.

Como primera estima consideramos que estos *factores de importancia*, como en el caso de los *grados de importancia* siguen progresiones geométricas sencillas, de razón (1/2) para

CUADRO 3. FACTORES de importancia
TABLE 3. FACTORS of importance

Actividad Activity	Sectores/Sectors		
	Defensa Defence	Producción Production	Recreo Recreation
Indispensabilidad Indispensability	1 / 4 Total	1 / 2 Sectorial	1 Ninguna None
Coste (Restauración) Cost (Restoration)	1 / 4 Ambiental Environmental	1 / 2 B. Defendidos Defended property	1 Obra Work
Peligrosidad (Vidas humanas) Risk (Human life)	1 / 25 Genética Genetic	1 / 5 Catastrófica Catastrophic	1 Accidental Accidental

Bilbao. The indispensability of this port is, therefore, low and its incidence is purely local. Indispensability may then be seen to be total, sectorial or null.

A factor of vital importance in the design of nuclear power stations, highly toxic chemical plants, etc., is that of the danger level.

Three risk levels may, in turn, be established in accordance with the potential consequences of a failure:

accidental, catastrophic, genetic.

The risk of a system failure may be considered to be accidental when the effects of the same are restricted to personal, individual and present risk even though various individuals may be affected and there is a risk that somebody could become disabled. This is the case of the majority of road accidents, accidents at work, etc.

When the risk of a system failure affect a larger number of people, as in the case of the failure of a dam, aeroplane accidents, etc., this then affects a social group and the risk may be classified as catastrophic.

The two preceding levels exclude all types of genetic damage to the species. when there is a risk of this damage occurring, the danger is then referred to as genetic risk.

Considerations regarding economic cost should not only include the cost of rebuilding the work, but also that of restoring directly affected property and services, repairing the environment and compensating affected groups for loss of earnings, loss of esteem, social alarm, etc. The total economic cost may then be taken to be formed by three accumulative levels: The minor (lower) cost corresponding simply to the repair of the works, the medium cost, involving the preceding costs and that of compensation for directly affected property or services and the major (higher) cost, taking into account all preceding costs together with those of repairing the environment and the affected society, including redress for psychological damages (loss of image, social alarm, etc.).

There are then several factors which modify the degree of importance indicated in the 3rd principle and which make the problem a multivariate one. In each individual case and for each of the four considered factors: Activity, Indispensability, Cost and Risk, there is a degree of importance (G) which is modified or weighted by the said factor.

As an initial estimate we shall consider that, as with the degrees of importance, these factors of importance follow simple geometric progressions, to the order of (1/2) for the

los tres primeros casos y (1/5) en el cuarto, en la forma que mostramos en el Cuadro 3).

En estas condiciones, consideramos como valor representativo de la fiabilidad la media potencial, resultante de la raíz enésima ($n = 4$) del producto de los (n) grados de importancia (G_A), (G_I), (G_C) y (G_P) elevados a (ponderados por) los (n) factores correspondientes (F_A), (F_I), (F_C) y (F_P).

$$IV_e \quad \Phi = \sqrt[4]{G_A F_A \cdot G_I F_I \cdot G_C F_C \cdot G_P F_P}$$

Según podemos comprobar, ni la estructura matemática de la estima, ni los valores asignados a los grados y factores, ni los resultados obtenidos con la estima propuesta en el 1980 han cambiado apreciablemente, excepto en el sentido de una mayor coherencia y simplificación conceptual. Y esto por dos razones: *Primero* porque los valores de la fiabilidad admisible o de diseño obtenidos para todos los casos considerados, abarcando un espectro muy amplio, corresponden muy bien con lo que dicta el sentido común y la opinión de los especialistas. *Segundo* porque, precisamente desde entonces, se vienen imponiendo en el mundo métodos de análisis, tales como la "fussy logic", en ciertos aspectos similares a nuestra propuesta.

APLICACIÓN PUERTO DE BILBAO

Factores de importancia		Grados de importancia	
Sector		Ámbito/Nivel	Rango
actividad	servicios	regional	medio
indispensabilidad	sectorial	regional	medio
coste	defendidas	102 M€	bajo
peligrosidad	accidental	local	bajo
Factores =	0.5	0.5	0.5
Grados =	0.812	0.812	0.598
Radm =	$0.812^{0.5} \times 0.812^{0.5} \times 0.598^{0.5} \times 0.5^1 = 0.749$		

lo que con una vida previsible o de diseño de 50 años corresponde a un período de retorno (τ)

$$\tau = 173 \text{ años}$$

Nos parece interesante, incluso a nivel de resumen, comparar estos resultados con otros ejemplos de la técnica marítima e incluso con otros casos de la ingeniería

PUERTO DE RECREO JOSÉ BANUS

actividad	recreo	local	alta
indispensabilidad	ninguna	local	baja
coste	obra	10° M€	media
peligrosidad	accidental	local	bajo
Factores =	1	1	1
Grados =	0.812	0.5	0.598
Radm =	0.59	$\tau = 95 \text{ años}$	

first three cases and (1/5) for the fourth, in the manner indicated in the following table 3.

Under these conditions, we may then consider the representative reliability value as the potential average, resulting from the n th root ($n = 4$) of the product of the (n) degrees of importance (G_A), (G_I), (G_C) and (G_P) raised to (weighted by) the (n) corresponding factors (F_A), (F_I), (F_C) and (F_P).

$$IV_e \quad \Phi = \sqrt[4]{G_A F_A \cdot G_I F_I \cdot G_C F_C \cdot G_P F_P}$$

As may be seen, neither the mathematical structure of the estimate, nor the values assigned to the degrees and factors, nor the results obtained by the estimate proposed in 1980 have changed appreciably, except in terms of greater coherence and conceptual simplicity. This is due to two reasons: *Firstly*, because the values of admissible or design reliability obtained for all the considered cases, and covering a very broad spectrum, correspond very well to that indicated by common sense and specialist opinion. *Secondly*, since the time of the original publication, methods of analysis such as fuzzy logic have been introduced which, in certain aspects, are similar to our proposal.

APPLICATION PORT OF BILBAO

Factors of importance		degree of importance	
Sector		Area/Level	Range
Activity	services	regional	medium
indispensability	sectorial	regional	medium
cost	defended		
	property	10 ² M€	low
risk	accidental	low	low
Factors =	0.5	0.5	0.5
Degrees =	0.812	0.812	0.598
Radm =	$0.812^{0.5} \times 0.812^{0.5} \times 0.598^{0.5} \times 0.5^1 = 0.749$		

which with a design or probable life of 50 years would correspond to a return period (τ)

$$\tau = 173 \text{ years}$$

It is interesting to compare these results, even by way of summary, with other examples of maritime technology and other structures.

JOSÉ BANUS PLEASURE HARBOUR

Activity	recreation	local	high
indispensability	none	local	low
cost	work	10° M€	medium
risk	accidental	local	low
Factors =	1	1	1
Degrees =	0.812	0.5	0.598
Radm =	0.59	$\tau = 95 \text{ years}$	

PRESA DE ASSUAN RÍO NILO (EGIPTO)

actividad	servicios	regional	alto
indispensabilidad	total	regional	alto
coste	+ ambiental	10 ⁴ M€	alto
peligrosidad	catastrófica	regional	alto
Factores = 0.5 0.25 0.25 0.20			
Grados = 0.986 0.986 0.999996 0.986			
Radm = 0.996 τ = 15.000 años			

PRESA RÍO DE LAS PIEDRAS (ABASTECIMIENTO HUELVA)

actividad	servicios	local	media
indispensabilidad	sectorial	local	alta
coste	work	10 ⁹ M€	alto
peligrosidad	accidental	local	media
Factores = 0.5 0.5 1 1			
Grados = 0.598 0.812 0.812 0.598			
Radm = 0.763 τ = 185 años			

PUENTE DE GOLDEN GATE (SAN FRANCISCO)

actividad	servicios	regional	alto
indispensabilidad	total	regional	alto
coste	obra	10 ² M€	alto
peligrosidad	catastrófica	local	alto
Factores = 0.5 0.25 0.25 0.2			
Grados = 0.986 0.986 0.986 0.812			
Radm = 0.985 τ = 3.370 años (50)			

4.1. Fiabilidad de Diseño admisible para los componentes.

Conocida la estima de la fiabilidad de diseño del sistema es importante estimar como debe repartirse esta fiabilidad entre los diversos componentes de fallo de la obra. Esto puede realizarse mediante el análisis económico ya que ninguno de los tres factores: *ámbito*, *necesidad* y *peligrosidad*, ni sus respectivos *grados* resultan afectados, ya que se conserva la *fiabilidad de diseño del sistema*.

En el caso de *fallo total* (100% averías) de cualquiera de los componentes, se produce la ruina de la obra, o al menos de uno de sus elementos (caso de obras compuestas), con lo cual ésta, en general, dejará de cumplir con su función. El puerto, etc., quedará entonces fuera de servicio, al menos parcialmente.

Podemos, al menos como primera estima, (Bores 80) considerar la obra como un sistema en serie, con lo cual de acuerdo con la regla de Luser

$$\Phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots = \prod \phi_i \quad (22)$$

ASSUAN DAM RIVER NILE (EGYPT)

Activity	services	regional	high
indispensability	total	regional	high
cost	+ environmental	10 ⁴ M€	high
risk	catastrophic	regional	high
Factors = 0.5 0.25 0.25 0.20			
Degrees = 0.986 0.986 0.999996 0.986			
Radm = 0.996 τ = 15,000 years			

RIO DE LAS PIEDRAS DAM (WATER SUPPLY, HUELVA)

Activity	services	local	medium
indispensability	sectorial	local	high
cost	work	10 ⁹ M€	high
risk	accidental	local	medium
Factors = 0.5 0.5 1 1			
Degrees = 0.598 0.812 0.812 0.598			
Radm = 0.763 τ = 185 years			

GOLDEN GATE BRIDGE, SAN FRANCISCO

Activity	services	regional	high
indispensability	total	regional	high
cost	work	10 ² M€	high
risk	catastrophic	local	high
Factors = 0.5 0.25 0.25 0.2			
Degrees = 0.986 0.986 0.986 0.812			
Radm = 0.985 τ = 3,370 years (50)			

4.1. Admissible design reliability for components

On estimating the design reliability of the system it is then important to estimate how this reliability is distributed among the diverse failure components of the work. This may be carried out in terms of economic analysis as none of the three factors: *area*, *need* and *risk*, nor their respective degrees are affected, as the design reliability of the system remains intact.

In the case of total failure (100% damage) of any of the components, this will totally impair the work, or at least one of its elements (in the case of composite works), and it will no longer be able to carry out its function. The port, etc., or at the very least part of the same, will then be out of service.

As an initial estimate (Bores 80) we may consider the work as a series system and where, in accordance with the Luser

$$\Phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \dots = \prod \phi_i \quad (22)$$

en donde Φ es la fiabilidad de diseño del sistema y $\{\phi_i\}$ la fiabilidad de diseño del componente (i).

Por otra parte ya que coste total de la obra (C) es, evidentemente, la suma de los costes $\{C_i\}$ de todos los componentes (i)

$$C = C_1 + C_2 + \dots = \sum_i C_i$$

En el caso de dos componentes, el sistema de ecuaciones se reduce a

$$\Phi = \phi_1 \cdot \phi_2$$

$$C = C_1 + C_2$$

cuya solución es inmediata admitiendo la siguiente hipótesis complementaria.

El riesgo de fallo de los componentes ($p_i = 1 - \phi_i$) es inversamente proporcional a sus respectivos costes $\{C_i\}$, o sea

$$\frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{C_2}{1 - \phi_2}$$

De las tres ecuaciones anteriores inmediatamente obtenemos

$$\phi_2 = \frac{(C_1 - C_2) + \sqrt{(C_1 - C_2)^2 + 4C_1C_2\Phi}}{2C_1}$$

y $\phi_1 = \Phi / \phi_2$

La extensión de este razonamiento a cualquier número de componentes es inmediata, ya que puede considerarse el sistema dividido primeramente en dos subsistemas y cada uno de éstos, a su vez, en otros dos, hasta llegar a determinar la fiabilidad de todos los componentes del sistema.

Como *ejemplo* de aplicación consideremos el dique de Punto Lucero, Bilbao, que nos está sirviendo guía en esta exposición,

Fiabilidad de diseño $\Phi = 0.749$

Considerando que la fiabilidad del espaldón, núcleo, mantos secundarios, suelo, en este caso pueden considerarse como $\phi_k = 1$, la Estima relativa de los costos y fiabilidades de los restantes componentes son

Manto principal $C_M = 100$	$\phi_M = 0.784$
Berma superior $C_{B1} = 20$	$\phi_{B1} = 0.977$
Berma inferior $C_{B2} = 10$	$\phi_{B2} = 0.992$

where Φ is the design reliability of the system and $\{\phi_i\}$ the design reliability of the component (i).

Furthermore, as the total cost of the work (C) is obviously the sum cost $\{C_i\}$ of all components (i)

$$C = C_1 + C_2 + \dots = \sum_i C_i$$

In the case of two components, the system of equations would be reduced to

$$\Phi = \phi_1 \cdot \phi_2$$

$$C = C_1 + C_2$$

and when including the following supplementary hypothesis:

The risk of failure of components ($p_i = 1 - \phi_i$) is inversely proportional to their respective costs $\{C_i\}$,

$$\frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{C_2}{1 - \phi_2}$$

From the three preceding equations we then get

$$\phi_2 = \frac{(C_1 - C_2) + \sqrt{(C_1 - C_2)^2 + 4C_1C_2\Phi}}{2C_1}$$

and $\phi_1 = \Phi / \phi_2$

This reasoning may be immediately applied to any number of components by taking the system to be divided into two sub-systems and each of these, in turn, divide into a further two, until establishing the reliability of all components within the system.

By way of example of this application, we may consider the Punta Lucero breakwater which has served as our point of reference throughout.

Design reliability: $\Phi = 0.749$

When taking the reliability of the crown wall, inner core, secondary cover layers and bed to be equal to $\phi_k = 1$ in this case, the cost and reliability estimate for the remaining components would then be as follows:

Armour $C_M = 100$	$\phi_M = 0.784$
Berm 1 $C_{B1} = 20$	$\phi_{B1} = 0.977$
Berm 2 $C_{B2} = 10$	$\phi_{B2} = 0.992$

AGRADECIMIENTOS

No quiero finalizar este artículo sin agradecer a la Administración española, a las empresas y a los doctorandos,

ACKNOWLEDGEMENTS

I don't want to finish this article without thanking the Spanish Administration, the companies, and the

que con sus encargos, tesis y consultas han facilitado, a lo largo de ya casi treinta años, el continuo desarrollo del MSM. Son ejemplos destacados: Cubiertas y Tejados S.A. (Abril, 1976), con el Terminal de graneles del Puerto de Sagunto; Junta del Puerto de Bilbao (Junio, 1976), Dique de escollera de Punta Lucero; Acantilados de los Gigantes S.A. (1979), Dique vertical de puerto deportivo de los Gigantes; Autoridad Portuaria de Las Palmas (2000), Dique vertical Princesa Sofía; Autoridad Portuaria de la Coruña (2001), Dique de escollera de Punta Langosteira.

Agradezco así mismo el interés de Administración por conocer los fundamentos físicos matemáticos de nuestro MSM firmando, con la Fundación Agustín de Bethencourt el 2001, el Convenio "Estudio del análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño por el Método Sistemático Multivariable". Personalmente agradezco a Dña. María Dolores Cancela, D. Ignacio Rodríguez y D. Obdulio Serrano, por su disposición en la auditoria de este convenio y a D. Ricardo Arribas, D. José Luis Almazán, D. Vicente Negro y un largísimo etc. de compañeros, doctorandos y alumnos, por su creciente interés en nuestro trabajo. ■

doctoral students who with their orders, consultations, and thesis have facilitated during almost thirty years, the continual development of the MSM. Some outstanding examples are Cubiertas y Tejados S.A. (April, 1976), Pier of Sagunto; Port Authority of Bilbao (June, 1976), Punta Lucero rubblemound breakwater; Acantilados de los Gigantes S.A. (1979), Los Gigantes vertical breakwater; Port Authority of Las Palmas (2000), Princesa Sofía vertical breakwater; Port Authority of La Coruña (2001), Punta Langosteira rubblemound breakwater.

I also want to thank the Administration's interest in the physical mathematical fundamentals of our MSM by signing with the Agustín de Bethencourt Foundation, in 2001, the Agreement "Study of the analysis of risk of the design systems for the Multivariate Systemic Method". I personally thank Dña. María Dolores, D. Ignacio Rodríguez, y D. Obdulio Serrano, for their interest in this agreement, and also D. Ricardo Arribas, D. José Luis Almazán, D. Vicente Negro and a long list of engineers and students for their interest in our work. ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS MÁS DESTACADAS DEL MSM

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

-(1977) - SUAREZ BORES P. - *Análisis aleatorio multivariado*. Terminología y conceptos básicos - R.O.P. nº. 3.151 pags. 831-836.
 -(1979) - SUAREZ BORES P. - *Sistemas aleatorios multivariados de estabilidad*. Aplicación a las Obras Marítimas. R.O.P. nº. 3.168. pags. 257-262.
 -Componente de fallo gradual del manto principal de los diques de escollera. R.O.P. nº. 3.168. pags. 263-282.

-(1980) - SUAREZ BORES P. - *Obras Marítimas Exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño*. Apuntes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. D.L M-32820-1980 ISBN 84-7493-024-3
 -(1982) - SUAREZ BORES P. - *Obras Marítimas Exteriores. Análisis de fiabilidad de los sistemas de diseño*. Apuntes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2ª Edición

-(1990) - ALMAZÁN J. L. - "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)
 -(1999) - 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).
 -(2001) - Suárez Bores P. - *Después de Iribarren: El Método Sistemático Multivariable* - R.O.P. nº. 3.406. pags. 13-28.

APENDICE: APLICACION DEL MSM/APPENDIX: APPLICATION OF THE MSM

INPUT BILBAO

DESIGN			ARMOR
FORM0	=	BLOCKS	
DEPT0	=	0 m.	
WEIGHT0	=	155 tons	
DENSITY1	=	2.35 tons/m ³	
TALUS1	=	2	
FORM1	=	BLOCKS	BERMS
DEPT1	=	19.8 m.	
WEIGHT1	=	14 tons	
DENSITY1	=	2.8 tons/m ³	
TALUS1	=	2	
FORM2	=		ROCKS
DEPT2	=	30.3 m.	
WEIGHT2	=	5 tons	
DENSITY2	=	2.35 tons/m ³	
TALUS2	=	2	

SPECIFICATIONS

CONFIGURATION LINEAL
 FAILURE ELEMENTAL
 DAMAGE = 100
 RANK EXTREMAL
 PRECISION HIGH
 CONFIDENCE = 0.5

LIFE = 50

OUTPUT BILBAO

FAILURE CLASS: STRUCTURAL

SUBCLASS	• STABILITY	COMPONE	RELIABILITIES	SUBCLASS	CLASS
	- ARMOR	0.784			
	- BERM1	0.977			
	- BERM2	0.992			
			0.76		
	• RESISTENCE, (estimate)		0.99		
	• DURABILITY, (estimate)		0.994		
	STRUCTURAL RELIABILITY				0.748
	ADMISSIBLE RELIABILITY				0.749