

# Reducción del número de estabilidad de diseño en elementos prefabricados monocapa para condiciones singulares de proyecto en obras de abrigo en talud

## *Reduction in Design Stability Number of Monolayer Armour Units for Singular Conditions of Projects in Rubble Mound Breakwaters*

Donini, H. J.<sup>a</sup> y del Valle, R. H.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero Civil e Hidráulico, docente e investigador de la Facultad de Ingeniería de la UNPSJB (Argentina). E-mail: hugo.donini@gmail.com

<sup>b</sup>Ingeniero Civil, Profesor Titular de la Cátedra de Puertos y Vías Navegables de la UNPSJB (Argentina). E-mail: ricardodelv@gmail.com

Recibido: 20/03/2015

Aceptado: 02/06/2015

Publicado: 27/07/2015

---

### RESUMEN

El cálculo de las obras de abrigo con elementos de hormigón monocapa se basa en la aplicación de coeficientes de diseño obtenidos en ensayos de laboratorio, primordialmente bidimensionales y bajo condiciones controladas. Con la experiencia de más de 30 años obtenida en el mundo, es importante contrastar los valores de los números de estabilidad usados en el diseño con aquellos que resultan en las obras de abrigo ya construidas. En la presente publicación, se actualizan e incrementan los datos recabados respecto de publicaciones anteriores, desarrollándose un análisis de situaciones particulares en las que se reducen los coeficientes de estabilidad de la coraza (manto). También se efectúa una serie de recomendaciones referidas al diseño con elementos Accropode® y Core-Loc™. Asimismo, se extraen conclusiones referidas a los incrementos obtenidos en el volumen y la reducción en el número de bloques necesarios para los diferentes números de estabilidad propuestos.

**Palabras clave** | Obras de abrigo; Coraza; Manto; Elementos monocapa; Número de estabilidad.

---

### ABSTRACT

*The evaluation of concrete single layer of breakwaters is based on the application of design coefficients obtained in laboratory tests, primarily two-dimensional and under controlled conditions. With the experience of more than 30 years in structures of this type in the world, it is important to compare the values of stability numbers used in the design with those who are in breakwaters as built. In this paper, update and increase the data collected with respect to previous publications, developing an analysis of particular situations in which the amour layer stability coefficients are reduced. A series of Accropode® and Core-Loc™ recommendations concerning the design elements is also made. Also there are conclusions related to increases in the volume and the reduction in the number of blocks needed for different numbers of stability proposed.*

**Key words** | Breakwaters; Armour; Monolayer armour units; Stability number.

## INTRODUCCIÓN

Los prefabricados de hormigón colocados en una capa son utilizados ampliamente en corazas (mantos) de obras de abrigo en talud, así como en obras de protección. Para obtener el criterio de diseño de los mismos, se implementan fórmulas de estabilidad sobre resultados de ensayos de laboratorio ejecutados bajo situaciones controladas, primordialmente bidimensionales y en óptima condición de colocación. Los resultados obtenidos generan números de estabilidad utilizados para el diseño con la aplicación de coeficientes de seguridad. La mayoría de los manuales y guías de proyecto de los elementos monocapa instan al uso de los coeficientes de estabilidad para playas con pendientes suaves del fondo frente al dique (entre el 0 y el 3%) basados en el ajuste de las formulaciones con datos obtenidos en ensayos tridimensionales (3D). Sin embargo, en determinadas condiciones y escenarios, existe una diferencia sustancial entre el tamaño del elemento de coraza calculado y el finalmente obtenido de ensayos tridimensionales. El objetivo de la presente publicación es comparar los datos recabados de obras de abrigo ejecutadas con los valores actuales para su diseño. A continuación, se efectuará una síntesis de los principales ensayos de laboratorio utilizados como base para el diseño de los principales elementos de coraza monocapa.

## ELEMENTOS ACCROPODE®

### Ensayos efectuados en Delft Hydraulics Laboratory por J. W. Van der Meer (1988)

La ecuación de Van der Meer (1988) es ampliamente utilizada para el cálculo de los elementos de coraza (manto), conocida por su simple y conceptual planteo basado en el número de estabilidad,  $N_s$ .

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (1)$$

donde  $H_s$  es la altura significativa de ola de diseño,  $\Delta = \rho_r/\rho_a - 1$ ,  $\rho_r$  es la densidad del hormigón,  $\rho_a$  es la densidad del agua, y  $D_n$  es el diámetro nominal del elemento que conforma la coraza (manto), correspondiente al lado del cubo equivalente de una pieza según la ecuación (2).

$$D_n = \left( \frac{M}{\rho_r} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Van der Meer (1988) realizó ensayos bidimensionales de elementos Accropode® para determinar el inicio de falla y la falla con pendientes de talud de 1:1.33. Los resultados se anexan en la Figura 1. Para los ensayos mencionados, Van der Meer (1988) utilizó periodos medios  $T_m$ , por lo que el parámetro de rotura o de Iribarren corresponde al indicado en la expresión (3).

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(H_s / L_{0,m})} = \tan \alpha / \sqrt{2\pi H_s / g T_m^2} \quad (3)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo que forma el talud externo de la obra,  $L_{0,m}$  es la longitud de onda en condiciones de aguas profundas asociada al período medio de la ola  $T_m$ .

Si bien no existe un criterio unánime respecto de lo que se considera como inicio de daño, Van der Meer (1988) lo asocia al parámetro de daño ( $S$ ) y al número de bloques desplazados ( $N_o$ ). El parámetro de daño ( $S$ ) se define como la relación entre el área media de erosión de la coraza ( $A$ ) y el diámetro nominal del elemento que la conforma elevado al cuadrado ( $D_n^2$ ) ecuación (4).

$$S = \frac{A}{D_n^2} \quad (4)$$

La situación de daño cero corresponde a  $S = 1$  ( $N_o = 0$ ) y el de inicio de daño a  $S = 2$ . Puede observarse en la Figura 1 la cercanía de los resultados obtenidos para la condición de inicio de falla (3.7) y falla (4.1). Considerando que sólo se evaluó una única

pendiente de talud, el eje de abscisas debería haberse planteado en función del peralte de la ola  $H_s/L_0$  y no de  $\xi_m$ . De todas formas, en la citada referencia se señala que no se encuentra transición del comportamiento entre olas con rotura tipo plunging (cascada o voluta) y surging (surgente u oscilación), que sí se advierte en elementos prefabricados bicapa. De acuerdo a lo expresado por Van der Meer (1987; 1988; 1999), la estabilidad de los elementos Accropode® no se vio influenciada en los ensayos por la duración de la tormenta o el período. Estos se llevaron a cabo bajo períodos  $T_m$  de 1.4; 1.7; 2.2 y 2.9 segundos, con duraciones equivalentes a 1000 y 2000 olas. Como complemento, en la publicación “*Design of concrete armour layers*” (Van der Meer, 1999) se indican las expresiones para el número de estabilidad en el inicio de daño (5) y daño (6).

$$\text{Inicio de daño, } N_{od} = 0 \qquad N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 3,7 \qquad (5)$$

$$\text{Daño, } N_{od} > 0.5 \qquad N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 4,1 \qquad (6)$$

Para el diseño, Van der Meer (1999) recomienda aplicar un coeficiente de seguridad aproximado de  $\gamma = 1.5$ . La base por la cual se utiliza este coeficiente de seguridad, entre otros factores, obedece a la cercanía que existe entre el inicio de daño y el propio daño, como se aprecia en la Figura 1. Al respecto, se indica que el Accropode® puede fallar en forma progresiva para alturas elevadas de ola.

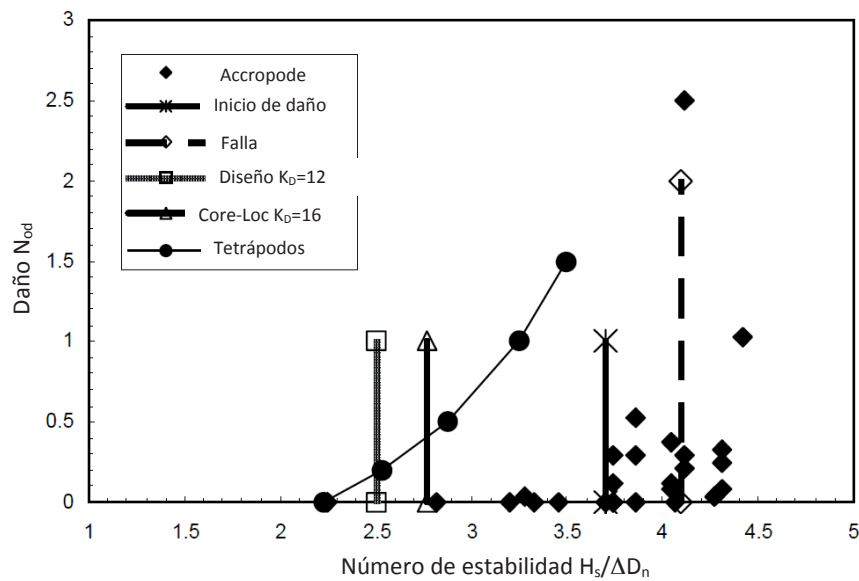


Figura 1 | Estabilidad de los elementos Accropode® (Van der Meer, 1999).

La aplicación del coeficiente de seguridad ( $3.7/1.5 \cong 2.5$ ) genera los coeficientes recomendados para el diseño. Al respecto, la firma SOGREAH (1996; 2009) indica las expresiones (7) y (8) para el proyecto de las secciones de tramo (tronco) y morro (extremo) del dique. A los efectos de diferenciar las condiciones de diseño de las correspondientes al umbral de rotura, se identifica a la condición de diseño con la nomenclatura  $N_{sd}$ .

$$\text{Tramo (tronco):} \qquad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,7 \qquad (7)$$

$$\text{Morro (extremo):} \qquad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,5 \qquad (8)$$

Los valores coinciden con el criterio adoptado por las guías de diseño para la fórmula de Hudson, donde la sección del morro (extremo) tiene asociado un valor del coeficiente de estabilidad  $K_D = 11.5$  (Sogreah, 1996; 2009), vinculado con  $N_{sd}$  por la ecuación (9).

$$N_{sd} = \sqrt[3]{K_D \cdot \cot \alpha} \quad (9)$$

### Ensayos efectuados en SOGREAH (1980)

Sogreah (1980) efectuó una serie de ensayos de laboratorio con oleaje regular y aleatorio. Para evaluar la condición de daño, consideró que la situación límite para daño cero es aquella para la cual como máximo, el 5% de los bloques ubicados en la zona de coraza está afectado por un movimiento de oscilación apenas perceptible a simple vista. Como resultado, el valor de  $N_s = 3.2$  ( $N_{sd} = 2.1$ ) e inferior a los obtenidos por Van der Meer (1988; 1999) en aproximadamente un 10%.

### Ensayos efectuados en Tianjin, China por el First Design Institute of Navigation Engineering, Ministry of Communications (1987)

El First Design Institute of Navigation Engineering (1987) desarrolló ensayos para estos elementos en Tjanjin, China, con criterios de daño similares a los expuestos. La diferencia sustancial con las condiciones anteriores, es que la profundidad al pie de la obra fue superior (a escala, 21.25 m) y una gama de períodos más grande (9-18 segundos). Los resultados para oleaje regular arrojaron un valor de  $N_s = 3.9$  ( $N_{sd} = 2.6$ ). Lo notable se observó en presencia de oleajes irregulares, con un  $N_s$  mínimo de 2 ( $N_{sd} = 1.33$ ) para  $\xi = 5$  y una dependencia con el período de la ola incidente, hecho que anteriormente no se había detectado. Los autores no han encontrado referencias respecto del período utilizado para los ensayos (medio o pico). Sin embargo, por los valores elevados de la profundidad a pie y de los períodos ensayados, se puede inferir que los períodos correspondan a picos y no medios. Probablemente el oleaje llegara al pie del dique sin romper, dejando lugar a relaciones elevadas de  $H_{\max}/H_s$  explicando la inestabilidad obtenida en esos ensayos.

### Ensayos efectuados en Aalborg University por Burcharth et al. (1998)

Burcharth et. al (1998) estudiaron la incidencia de la permeabilidad del núcleo de la obra de abrigo sobre la estabilidad de la coraza de elementos Accropode® basados en el parámetro de rotura de la ola  $\xi_p$ . Para ello, se ensayaron dos clases de materiales a escala: por un lado arena fina de 2-3 mm y por otro material granular y roca con una gradación de 5-8 mm. Los resultados indicaron que no sólo la magnitud del número de estabilidad era afectada, sino que la evolución del daño cambiaba significativamente en ambos casos. Para el material fino el valor de  $N_s$  para daño nulo fue de 2.4 ( $\xi_p = 3.75$ ) y 2.1 ( $\xi_p = 5$ ), y para el de mayor granulometría, de 3.5 ( $\xi_p = 3.75$ ) y mayor a 3.9 ( $\xi_p = 5$ ). El valor de  $N_s$  decreció con el incremento de  $\xi_p$ . La causa de esta diferencia, se debe al efecto adverso que genera el material fino del núcleo en las velocidades sobre la coraza, al no lograr percolar el agua de la misma forma que lo hace con un núcleo más permeable.

---

## ELEMENTOS CORE-LOC™

El Core-Loc™ surgió inicialmente como un reemplazo de los Dolos y se ha transformado en un elemento prefabricado con ventajas respecto del Accropode®. Posee una estabilidad superior, con menores movimientos en la coraza luego del asentamiento de la obra, y una reducción del volumen de hormigón que ronda entre el 20 y el 30% respecto de su predecesor. En contrapartida, y para algunos tamaños, exige un mayor volumen de roca de subcapa. Las pendientes usuales para su colocación son de 1:1.33 y de 1:1.5. A partir de ensayos 2D en laboratorio (Melby y Turk, 1997) se obtuvo un coeficiente de estabilidad  $K_D = 16$  (con la inclusión del coeficiente de seguridad), lo que resulta en el número de estabilidad de diseño  $N_{sd}$  para pendientes 1:1.33 indicado por la expresión (10). Se ha incluido el valor de  $N_{sd}$  para el morro (extremo) en la ecuación (11), acorde a un  $K_D = 13$ .

$$\text{Tramo (tronco):} \quad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,78 \quad (10)$$

$$\text{Morro (extremo):} \quad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,58 \quad (11)$$

Özkan C. *et al.* (2005) indican la ejecución de otros ensayos 2D con pendientes de 1:1.5, encontrándose coeficientes de estabilidad  $K_D$  superiores a 16, tanto para espectros de olas regulares como irregulares, sin influencias del peralte de la ola  $H/L_0$ . Los ensayos se efectuaron para Core-Loc<sup>TM</sup> emplazados de forma regular y aleatoria, con incidencia de espectros regulares e irregulares de olas en condiciones con y sin rotura. Bajo estas acciones se emplearon cinco valores de período diferentes (1.10; 1.20; 1.35; 1.50 y 1.65 s). El número de estabilidad para el inicio de daño resultó  $N_s = 4.33$  para una colocación regular y  $N_s = 4.43$  para una colocación aleatoria. Estos resultados superan a los anteriores para pendientes de 1:1.33 ( $N_s = 1.5 \times 2.78 = 4.17$ ). Los mismos autores publican ensayos tridimensionales efectuados en Noyo, California por Smith *et al.* (1994) para elementos Accropode<sup>®</sup> y Core-Loc<sup>TM</sup> con olas de 7 a 9 m de altura limitadas por profundidad, pero con efectos distintos. Ambos elementos requirieron rehabilitación después de ser sometidos a cinco tormentas sucesivas. La causa se atribuye principalmente a la inestabilidad del pie del talud. Los coeficientes obtenidos para el Core-Loc<sup>TM</sup> fueron  $K_D = 28$  para el mayor valor de  $H_{1/10}$  y  $K_D = 13$  para la mayor  $H_s$ . No se indica la sección para la cual se concluyen los valores señalados. Para el morro, los Accropode<sup>®</sup> debieron incrementarse hasta 48 tn, con valores de  $K_D = 16$  para  $H_{1/10}$  y  $K_D = 8$  para  $H_s$ . La coraza compuesta por Core-Loc<sup>TM</sup> se erosionó menos que la compuesta por Accropode<sup>®</sup>, lo cual se fundamenta en la mayor disipación de energía y por ende, menores valores de velocidad de sobrepaso de las olas.

## ELEMENTOS X-BLOC<sup>®</sup>

Los elementos X-Bloc<sup>®</sup> (Delta Marine Consultants, 2011) introducen en sus guías de diseño una serie de coeficientes incrementales a aplicar a los pesos de elementos de coraza (manto) según la profundidad y la permeabilidad del núcleo, entre otros aspectos del proyecto. Esto constituye un avance sustancial. Para el diseño del tramo (tronco) se utiliza la ecuación (12), lo que equivale a un  $K_D = 16$ . Para el cálculo del morro se puede realizar una estimación con la ecuación (13). Todas las expresiones poseen la aplicación del coeficiente de seguridad.

$$\text{Tramo (tronco):} \quad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,77 \quad (12)$$

$$\text{Morro (extremo):} \quad N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,57 \quad (13)$$

No obstante, estos valores deben reducirse ante condiciones particulares de proyecto, como profundidades elevadas (1.5 para  $2.5H_s < d < 3.5H_s$  y 2 para  $d > 3.5H_s$ ) y permeabilidades bajas del núcleo (1.5 para núcleos de baja permeabilidad y 2 para núcleos impermeables) (Delta Marine Consultants, 2011). Esto equivaldría a las situaciones adjuntas en la Tabla 1 expresadas en términos de  $N_{sd}$ .

**Tabla 1** | Valores del número de estabilidad de diseño para elementos X-Bloc<sup>®</sup> bajo distintas condiciones de proyecto obtenidos a partir de la guía de diseño de Delta Marine Consultants, 2011.

Fenómeno	$N_{sd}(\text{tramo})$	$N_{sd}(\text{morro})$
Núcleo permeable y $d < 2.5H_s$	2.77	2.57
Núcleo permeable y $2.5H_s < d < 3.5H_s$	2.42	2.25
Núcleo permeable y $d > 3.5H_s$	2.20	2.04
Núcleo de baja permeabilidad y $d < 2.5H_s$	2.42	2.25
Núcleo de baja permeabilidad y $2.5H_s < d < 3.5H_s$	2.11	1.96
Núcleo de baja permeabilidad y $d > 3.5H_s$	1.92	1.78

En las guías de diseño de todos los elementos prefabricados se debería hacer énfasis en la incidencia del diseño por duración (o número de olas) de estado del mar. Con el aumento del número de olas, se reduce la estabilidad de los elementos y este efecto tiene menor influencia cuando las profundidades a pie de la obra limitan la rotura de las olas de mayor altura. Las recomendaciones de X-Bloc® indican para relaciones  $H_{\max}/H_s$  superiores a 1.8-2, solicitaciones elevadas sobre la coraza (manto), generando una reducción de la estabilidad respecto de profundidades menores (Guidelines for X-Bloc® Concept Designs).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De los resultados logrados en proyectos de obras de abrigo de talud tendido con corazas de elementos prefabricados monocapa, se ha observado una disparidad entre los valores arrojados por las expresiones de diseño actual y los que surgen luego de las modelaciones físicas tridimensionales. Esto ha ocurrido cuando se presentan, entre otras, las siguientes condiciones:

- Costas con fuertes pendientes de fondo frente a la obra (1:10 - 1:5), que provocan la falta de estabilidad de los elementos prefabricados sobre el pie, acarreado la falla prematura de la coraza.
- Elevadas alturas de ola en condiciones muy expuestas.
- Olas oceánicas de largo período bajo condiciones de período pico  $T_p$  ( $H_s$  superior a los 7 m y  $T_p$  mayores o iguales a los 16 s).
- Profundidades elevadas a pie de obra.
- Interacciones en zonas de encuentro por prolongaciones de obra, especialmente en presencia de distintas alturas de coronamiento.
- Efectos adversos de las mareas meteorológicas locales.

A modo de ejemplo, la suma de algunos de los factores enumerados anteriormente generaron que los coeficientes de estabilidad  $K_D$  para Core-Loc™ en la obra de abrigo perteneciente a la “Reparación del Muelle de Camarones” fueran de 10 para el tramo ( $N_{sd} = 2.37$ ) y 7.7 para el morro ( $N_{sd} = 2.17$ ), en lugar de los usuales 16 y 13, respectivamente. Tales situaciones de inestabilidad se extendieron al pie de filtro. En la escollera sur de la “Remodelación del Puerto de Rawson – I Etapa”, fue necesario incrementar el tamaño del elemento Accropode® en la prolongación de la escollera sur, de 1 m<sup>3</sup> a 2 m<sup>3</sup> por problemas de estabilidad en la zona de encuentro con la escollera existente. Ello implicó un cambio en los coeficientes de estabilidad  $K_D$  de 15 ( $N_{sd} = 2.7$ ) a 7 ( $N_{sd} = 2.1$ ). Estos ejemplos pueden observarse en otros artículos y proyectos (Werren *et al.*, 2002; Muttray y Reedijk, 2008; Jensen, 2014, entre otras). Una de las causas de las disparidades corresponde a que la formulación del número de estabilidad no tiene en cuenta la duración del estado del mar, como sí ocurre con la expresión del Van der Meer para escolleras de roca, en la que se incluye el número de olas (N). Vidal *et al.* (2006) demostraron que el parámetro  $H_{50}$ , definido como la altura media de las 50 mayores olas en la vida útil de la obra de abrigo, es adecuado para el diseño de escolleras de roca. Asumiendo que las 50 mayores olas en la vida útil llegan con el temporal de cálculo y que la distribución sigue la función de Rayleigh (si no existe rotura), la solicitación aumenta con el número de olas y con la duración del estado del mar. Por ende, el número  $N_s$  estará influenciado por el aumento del número de olas. Esta situación no se ha manifestado en las expresiones de cálculo para corazas de elementos prefabricados.

En otros emplazamientos en donde se utilizaron los coeficientes recomendados para Accropode® se registraron roturas de elementos prefabricados y asentamientos en su disposición (Figura 2). Es necesario destacar que los ensayos en modelos no permiten representar a escala la resistencia de las piezas, que tienen en modelo una resistencia similar a las del prototipo. La resistencia de las piezas del prototipo generada por impactos se obtiene por ensayos “*in situ*” a partir de la caída de las piezas reales. No obstante, estos fenómenos deben ser contemplados en el momento de definir el tamaño del elemento a colocar en el dique, considerando las incertidumbres asociadas al modelo y a los ensayos de caída.



**Figura 2** | Asentamiento y rotura de elementos Accropode® de 6.3 m<sup>3</sup> y 9 m<sup>3</sup> ante eventos de diseño.

## METODOLOGÍA

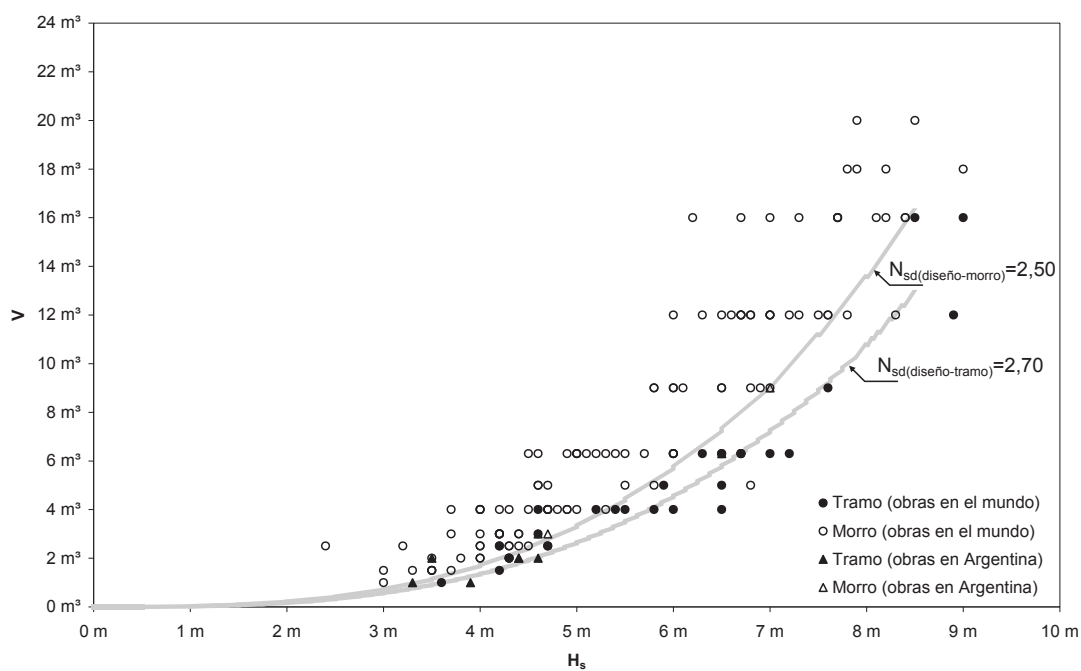
Para efectuar la comparación objeto del presente trabajo, se utilizaron las expresiones de Van der Meer (5), (6), (8) y (9) con los valores de diseño indicados por las guías de diseño de SOGREAH y CLI. Para efectuar la comparación con datos reales, se consultaron bases de datos de obras distribuidas en todo el mundo (ver Tabla 2) de las que se emplearon 200 datos relacionados con la altura de olas de diseño, período, profundidad a pie de la obra, elemento prefabricado (Accropode® o Core-Loc™), pendiente del talud, posición del elemento en la obra (morro o tramo) y volumen colocado. Los resultados fueron graficados y contrastados con los que resultan del cálculo de las ecuaciones indicadas. Se representaron los números de estabilidad de diseño  $N_{sd}$ , la profundidad y el parámetro de rotura  $\xi_p$  referido al período pico  $T_p$  (pendientes de 1:1.33, 1:1.5, 1:1.8 y 1:2).

**Tabla 2** | Referencias consultadas según el tipo de elemento prefabricado, número de datos consultados y características de los mismos.

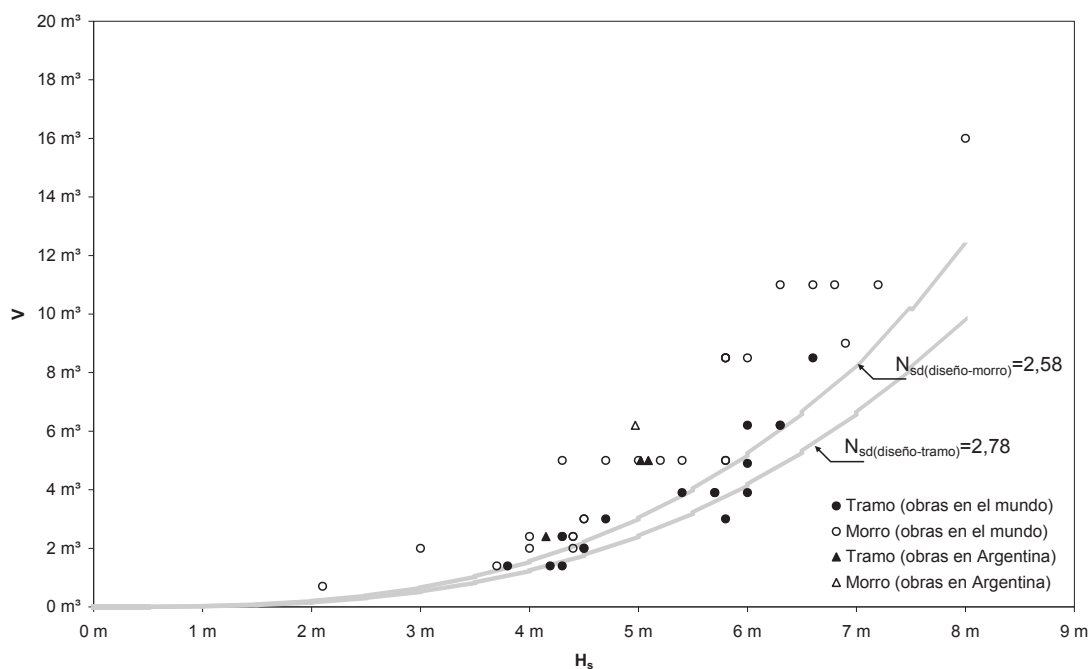
Elemento prefabricado	Número total de datos consultados	Datos empleados para la comparación	Fuente o referencia consultada	Características de los datos
Accropode®	100	150	Sogreah Ingénierie (1996-2009)	$H_s - T_p - d - V - m$
Accropode®	30		CLI. Concrete Layer Innovations	$H_s - T_p - d - V - m$
Accropode®	143		CLI. Concrete Layer Innovations.	$H_s - T_p - d - V - m$
Accropode®	10		Obras ejecutadas en Argentina	$H_s - T_p - d - V - m$
Core Loc™	12	45	CLI. Concrete Layer Innovations.	$H_s - T_p - d - V - m$
Core Loc™	45		Delft University of Technology	$H_s - T_p - d - V - m$
Core Loc™	8		Obras ejecutadas en Argentina	$H_s - T_p - d - V - m$

## RESULTADOS

Los gráficos obtenidos luego del procesamiento de los datos recabados se observan a continuación. En la Figura 3 y la Figura 4 se aprecia la existencia de una diferencia en el comportamiento de la curva de diseño existente respecto de los elementos colocados, especialmente, en las zonas correspondientes a alturas de ola elevada y para la zona del morro.



**Figura 3 |** Volumen de elementos Accropode® colocados y calculados en función de la altura de ola significativa (datos recabados de obras existentes a partir de  $H_s$  y tramos sin singularidades).

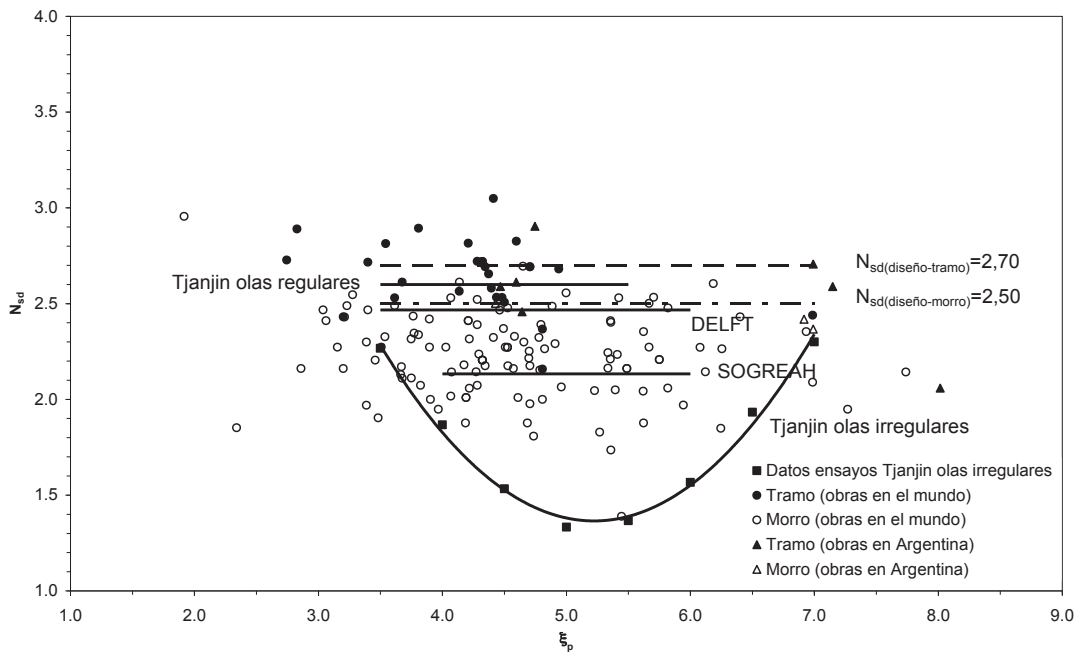


**Figura 4 |** Volumen de elementos Core-Loc™ colocados y calculados en función de la altura de ola significativa (datos recabados de obras existentes a partir de  $H_s$  y tramos sin singularidades).

En la Figura 5 se efectúa una comparación entre los datos recabados de obras de abrigo ejecutadas en el mundo mediante Accropode® con los resultados de los ensayos de laboratorio enumerados. Con la salvedad del número de estabilidad indicado por

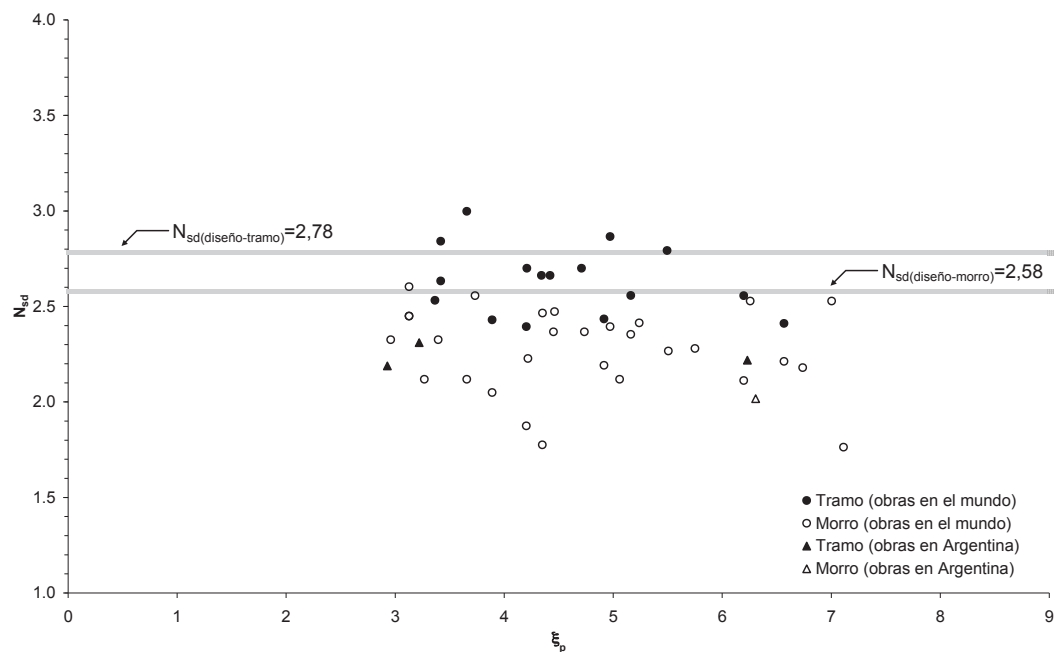


los ensayos por SOGREAH (1980) y en Tjanjin (1987) para olas irregulares, se mantiene la diferencia mencionada, especialmente cuando se representan los números de estabilidad de diseño recomendados por las guías y manuales para estos elementos.



**Figura 5 |** Comparación de los resultados de ensayos de laboratorio y de diseño actual con los valores recabados de obras de abrigo ejecutadas en el mundo para elementos Accropode® (elaborado a partir de recopilación de datos y de las referencias consultadas para  $H_s$  y tramos sin singularidades).

También se representaron los valores de  $N_{sd}$  para elementos Core-Loc™ en función del parámetro de rotura  $\xi_p$  (Figura 6), empleado en esta publicación a partir de los datos recabados de las pendientes de coraza.



**Figura 6 |** Números de estabilidad para Core-Loc™ según parámetro de rotura y la situación actual de diseño (datos recabados de obras existentes a partir de  $H_s$  y tramos sin singularidades).

Para evaluar las diferencias observadas en forma cuantitativa, se aprecia que un 90% de los casos recabados de obras en el mundo ejecutadas con elementos Accropode® los valores del número de estabilidad para no daño del morro de los diques resultaron inferiores al valor de diseño, es decir,  $N_{sd} < 2.5$  ( $K_D < 12$ ). En el caso del tramo, el 62% de los casos presentan un número de estabilidad inferior al de diseño,  $N_{sd} < 2.7$  ( $K_D < 15$ ) (Figura 7). Para los elementos Core-Loc™, existe un 97% de casos con un número de estabilidad para el morro inferior al de diseño  $N_{sd} < 2.58$  ( $K_D < 13$ ), y un 62% que no verifica el establecido para el tramo  $N_{sd} < 2.78$  ( $K_D < 16$ ) (Figura 8). Tales porcentajes señalan una infravaloración del coeficiente de seguridad para las obras con las características mencionadas.

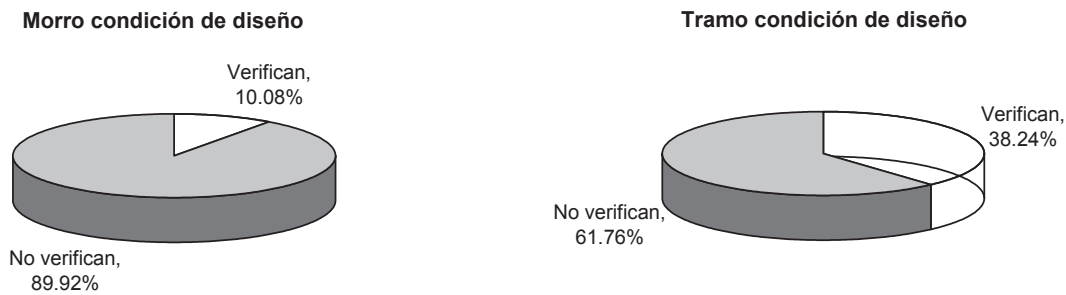


Figura 7 | Obras de abrigo con Accropode® que verifican el número de estabilidad actual de diseño.

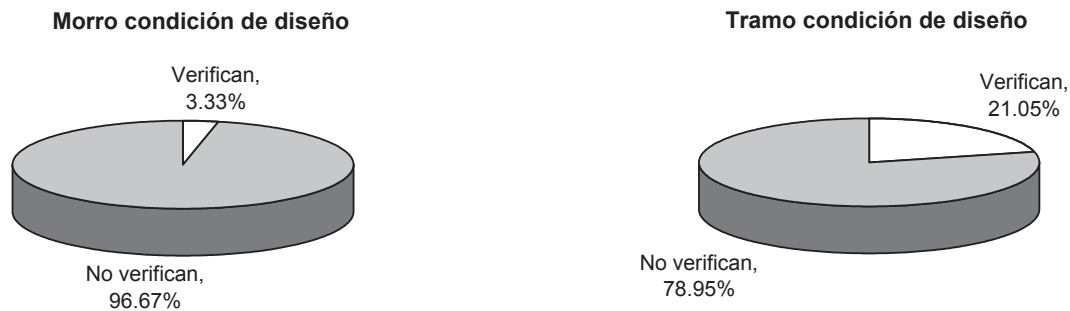
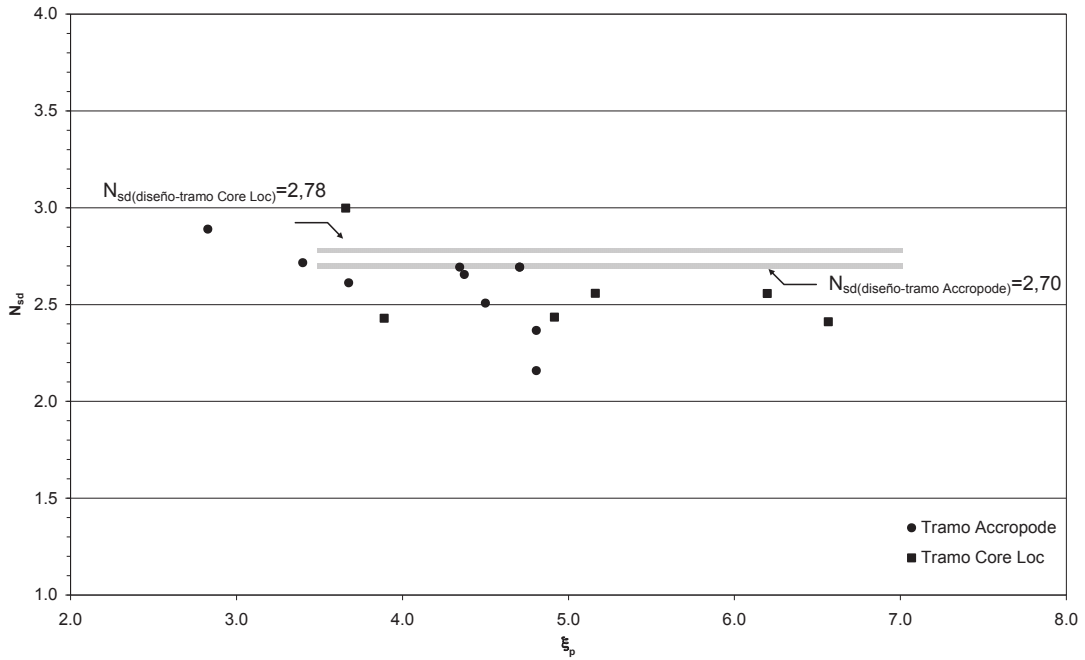
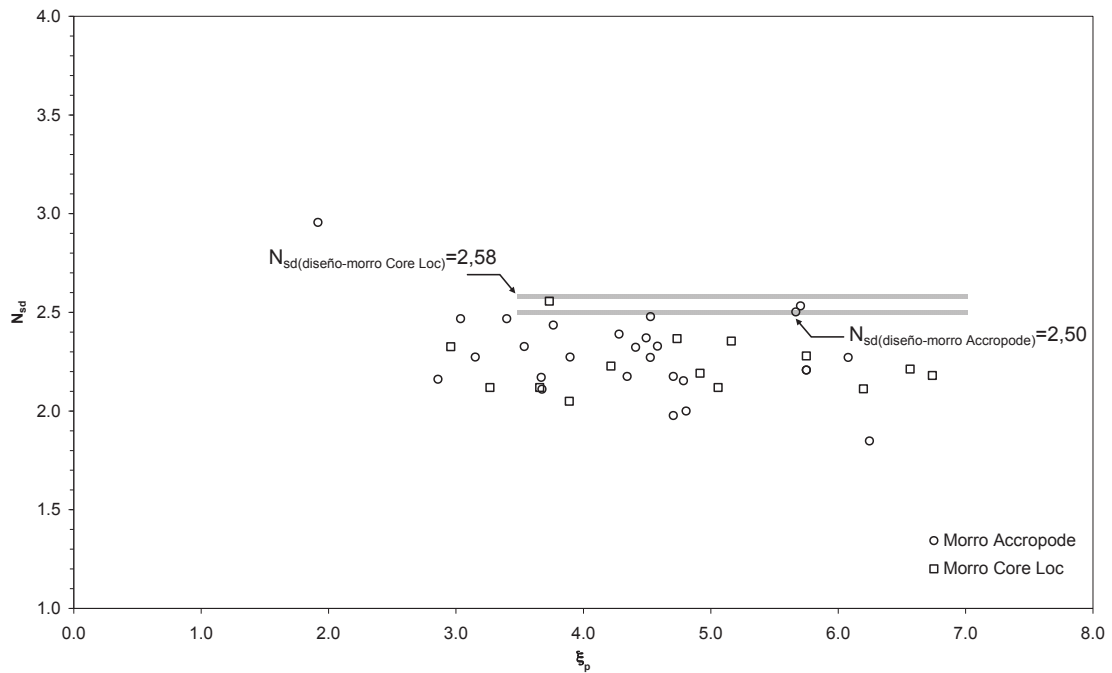


Figura 8 | Obras de abrigo con Core-Loc™ que verifican el número de estabilidad actual de diseño.

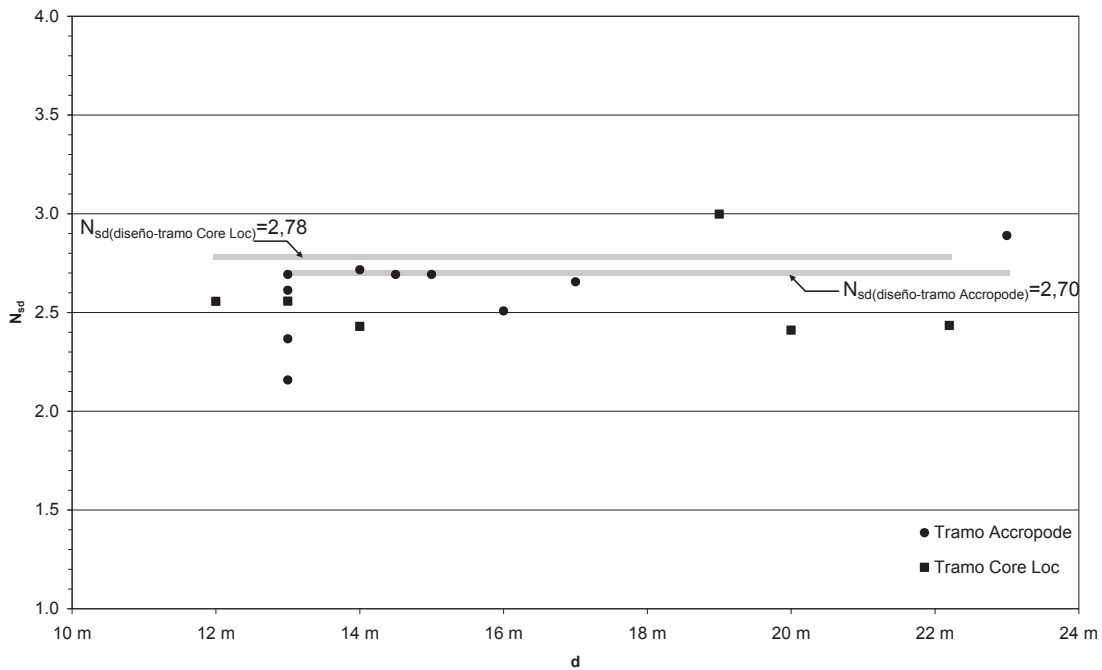
De la totalidad de los datos disponibles se representaron los valores de  $N_{sd}$  en función de la profundidad y del parámetro de rotura  $\xi_p$  únicamente para los casos en los que se registran profundidades superiores a los 12 metros. En la Figura 9 y en la Figura 10 se ha representado para elementos Accropode® y Core-Loc™ los valores de  $N_{sd}$  en función del parámetro de rotura para condiciones extremas de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $d$  (superiores a 12 m). Asimismo, en la Figura 11 y en la Figura 12 se representan, para el mismo tipo de piezas, los valores de  $N_{sd}$  según la profundidad para obras con profundidades superiores a los 12 m. En todas ellas se observa una sobrevaloración del coeficiente de estabilidad recomendado por las guías de diseño bajo estas condiciones particulares de proyecto.



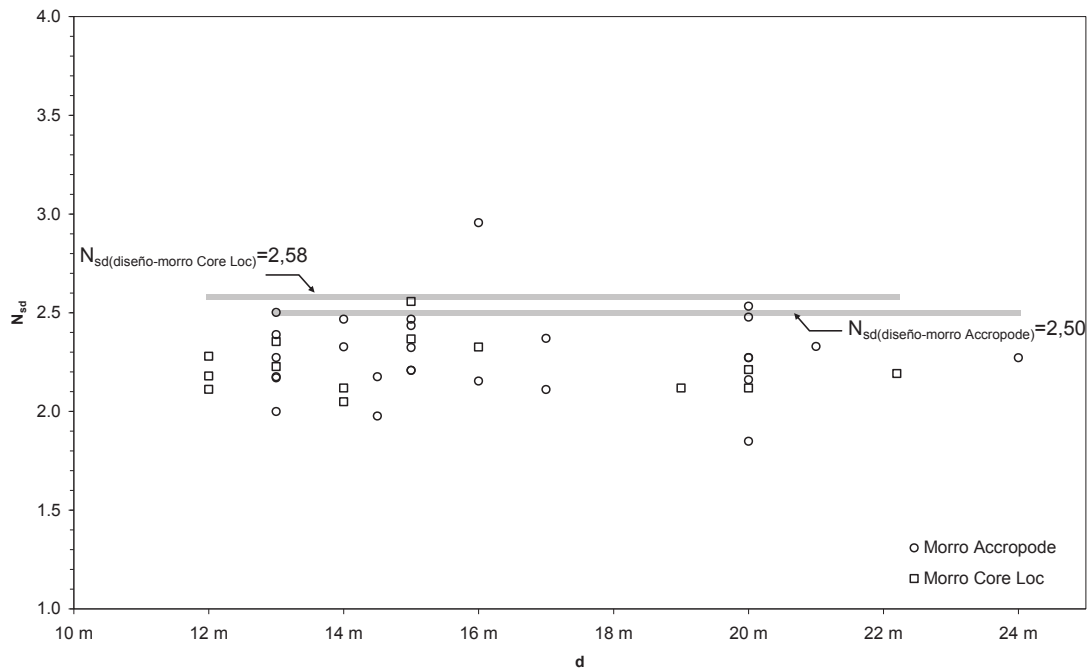
**Figura 9 |** Datos del tramo de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® y Core-Loc™ para condiciones extremas de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $d$ , contrastados con los valores actuales de diseño.



**Figura 10 |** Datos del morro de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® y Core-Loc™ para condiciones extremas de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $d$ , contrastados con los valores actuales de diseño.

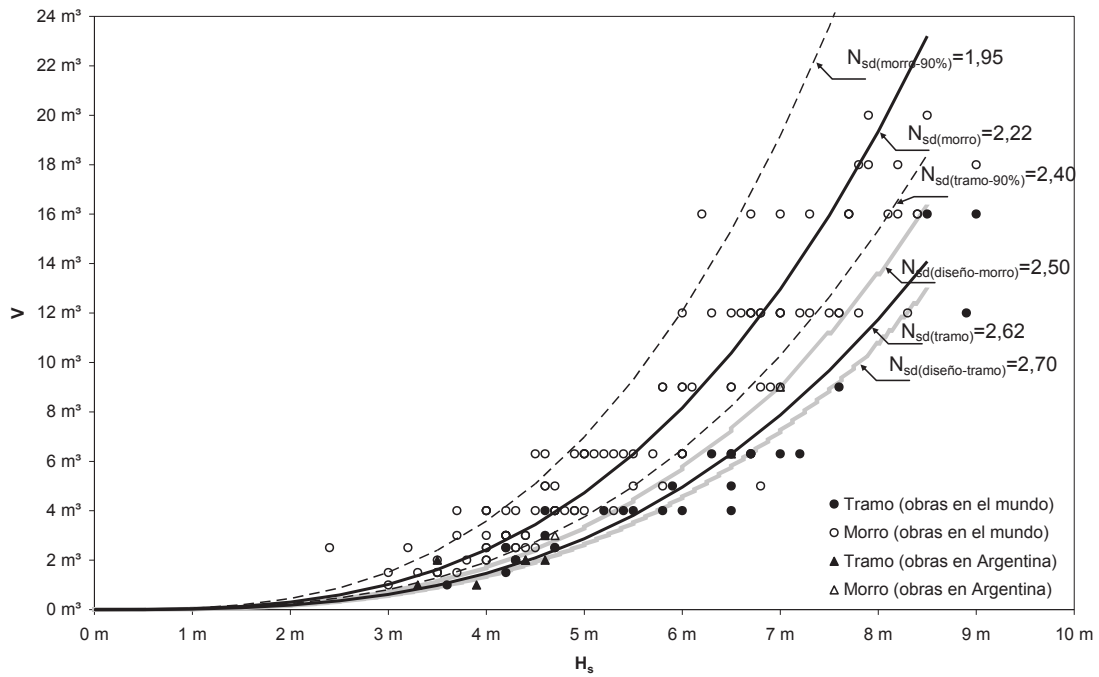


**Figura 11** | Datos del tramo de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® y Core-Loc™ para condiciones extremas de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $d$ , contrastados con los valores actuales de diseño.

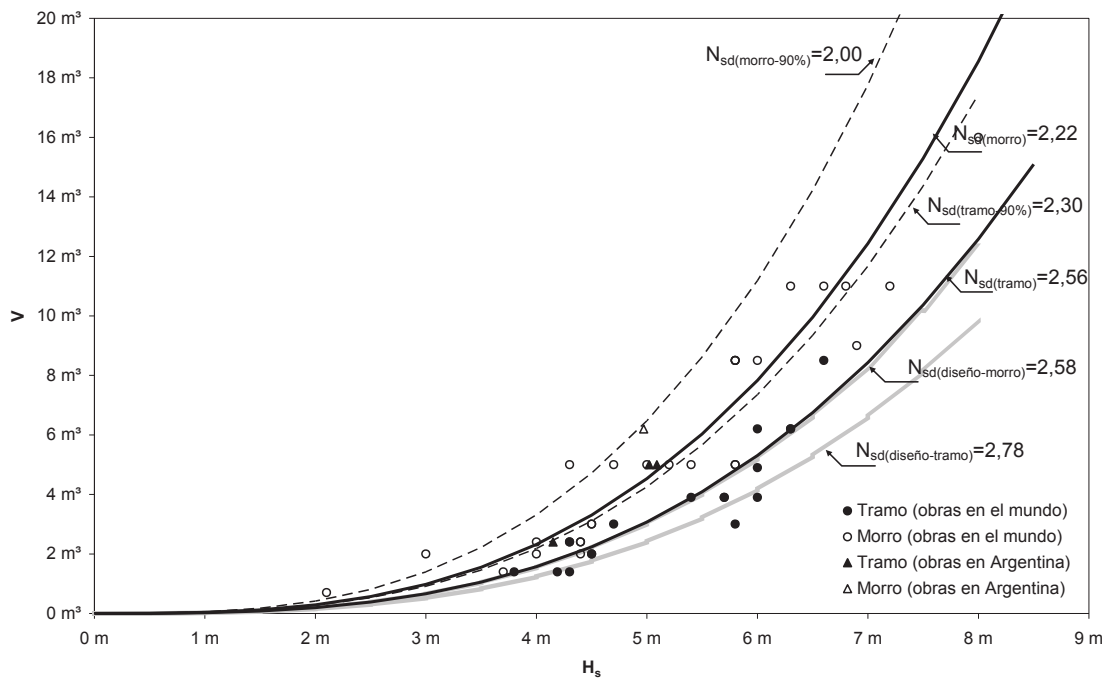


**Figura 12** | Datos del morro de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® y Core-Loc™ para condiciones extremas de  $H_s$ ,  $T_p$  y  $d$ , contrastados con los valores actuales de diseño.

Como resultado de los valores recopilados, se efectuó un ajuste de los números de estabilidad existentes, aplicando bandas de confianza del 90%, como se observa en la Figura 13 para Accropode® y la Figura 14 para Core Loc™.



**Figura 13** | Volumen de elementos Accropode® colocados, calculados y ajustados en función de la altura de ola significativa (se representan bandas de confianza del 90%).



**Figura 14** | Volumen de elementos Core-Loc™ colocados, calculados y ajustados en función de la altura de ola significativa (se representan bandas de confianza del 90%).

Para evaluar el grado de incertidumbre existente en las variables asociadas al cálculo del peso de los elementos que conforman la coraza es posible utilizar los conceptos del EM 1110-2-1100 (2011), en la que se indican los coeficientes de seguridad necesarios para la ecuación de Hudson.

$$G = \frac{A}{\gamma_A} \frac{\Delta}{\gamma_\Delta} \frac{D_n}{\gamma_{Dn}} \left( K_D \frac{\cot \alpha}{\gamma_{\cot \alpha}} \right)^{1/3} - \gamma_{H_s} H_s \geq 0 \quad (14)$$

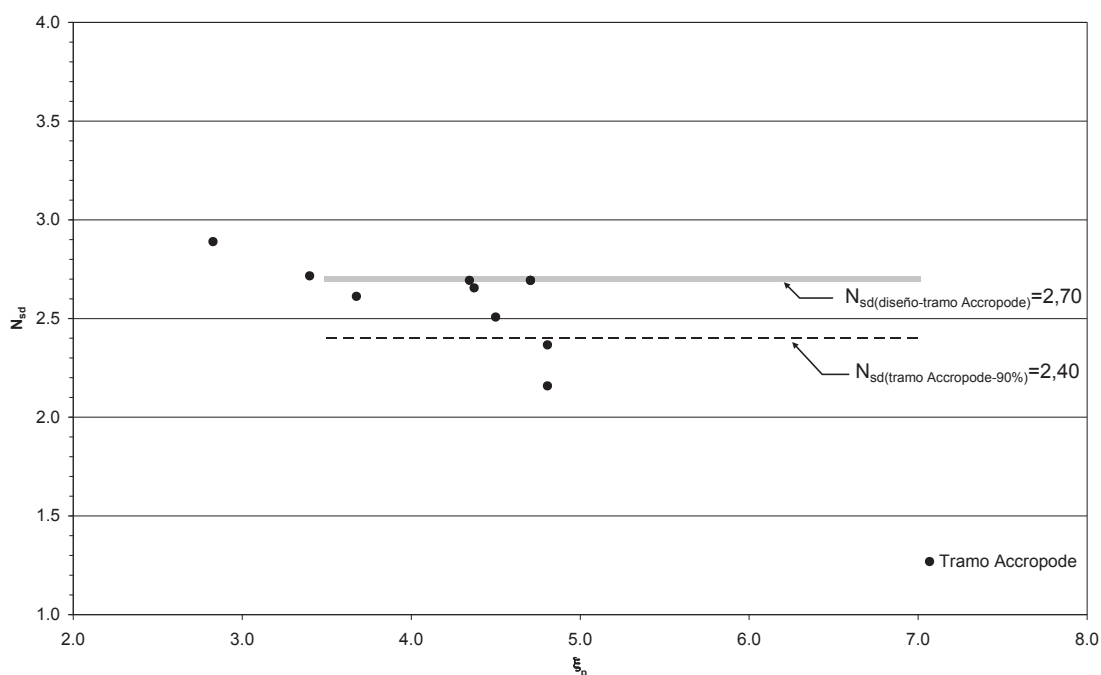
donde A es un parámetro que permite tener en cuenta la incertidumbre de la formulación y se indica con  $\gamma$  cada uno de los coeficientes de seguridad asociados a las variables anteriormente indicadas (ver al respecto la lista de símbolos). La ecuación (14) puede ser expresada de la forma indicada por (15).

$$D_n \geq \gamma_A \gamma_\Delta \gamma_{Dn} \gamma_{\cot \alpha}^{1/3} \gamma_{H_s} \frac{H_s}{A \cdot \Delta \cdot (K_D \cdot \cot \alpha)^{1/3}} \quad (15)$$

De esa manera, es posible reordenar los coeficientes de seguridad asociados con las incertidumbres en los materiales y la pendiente de la coraza con un único factor  $\gamma_z$ , de la manera indicada en (16). El producto de los coeficientes  $\gamma_z$  y  $\gamma_{H_s}$  permiten obtener el coeficiente de seguridad global  $\gamma$  de la ecuación de diseño.

$$D_n \geq \gamma_z \gamma_{H_s} \frac{H_s}{A \cdot \Delta \cdot (K_D \cdot \cot \alpha)^{1/3}} \quad (16)$$

Como resultado de lo expuesto y a modo de una primer aproximación, se propone para elementos Accropode® un valor  $N_{sd} = 1.95$  ( $K_D = 5.6$ ;  $\gamma = 1.9$ ) para el morro y  $N_{sd} = 2.4$  ( $K_D = 10.4$ ;  $\gamma = 1.7$ ) para el tramo. Para prefabricados Core-Loc™,  $N_{sd} = 2$  ( $K_D = 6$ ;  $\gamma = 1.9$ ) para el morro y  $N_{sd} = 2.3$  ( $K_D = 9.2$ ;  $\gamma = 1.8$ ) para el tramo. El uso de coeficientes de seguridad superiores en Core-Loc™ respecto de los indicados en los manuales de diseño, obedece a la necesidad de una mayor experiencia y un período más prolongado de uso en obra. Bajo las condiciones propuestas, se obtienen los siguientes resultados gráficos de la Figura 15 y la Figura 16, para elementos Accropode®, y la Figura 17 y Figura 18 para elementos Core-Loc™. En ellas se aprecia una condición de diseño más conservadora para los casos singulares indicados y obtenidos.



**Figura 15** | Datos del tramo de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® contrastados con los valores actuales de diseño y los propuestos para las condiciones enunciadas.

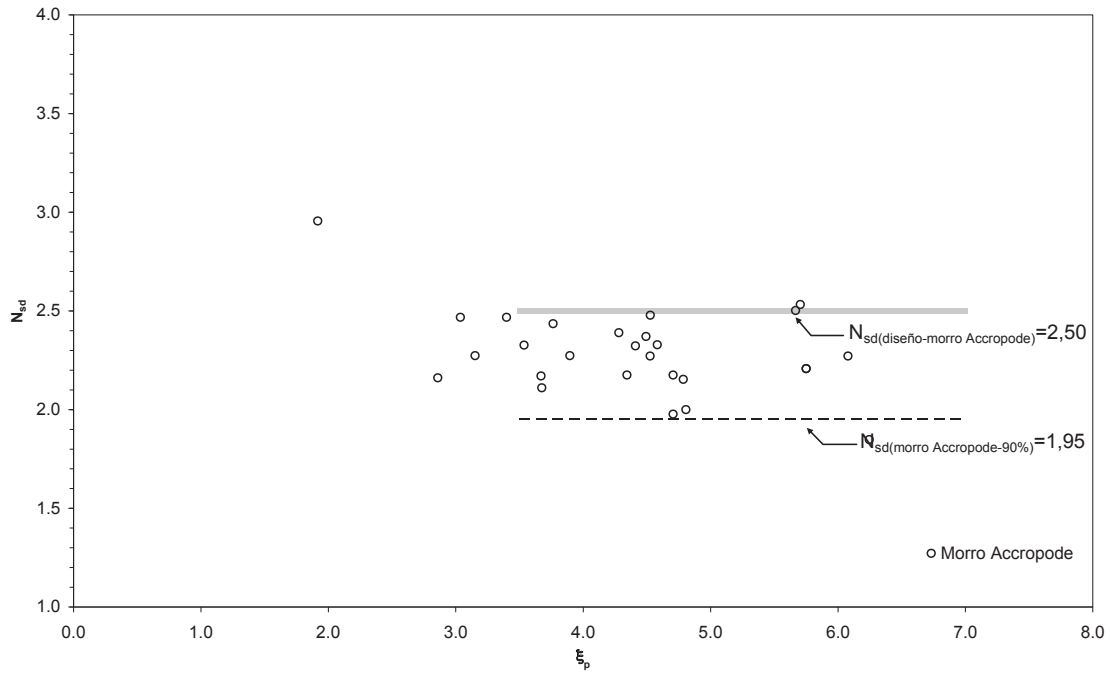


Figura 16 | Datos del morro de obras de abrigo ejecutadas con Accropode® contrastados con los valores actuales de diseño y los propuestos para las condiciones enunciadas.

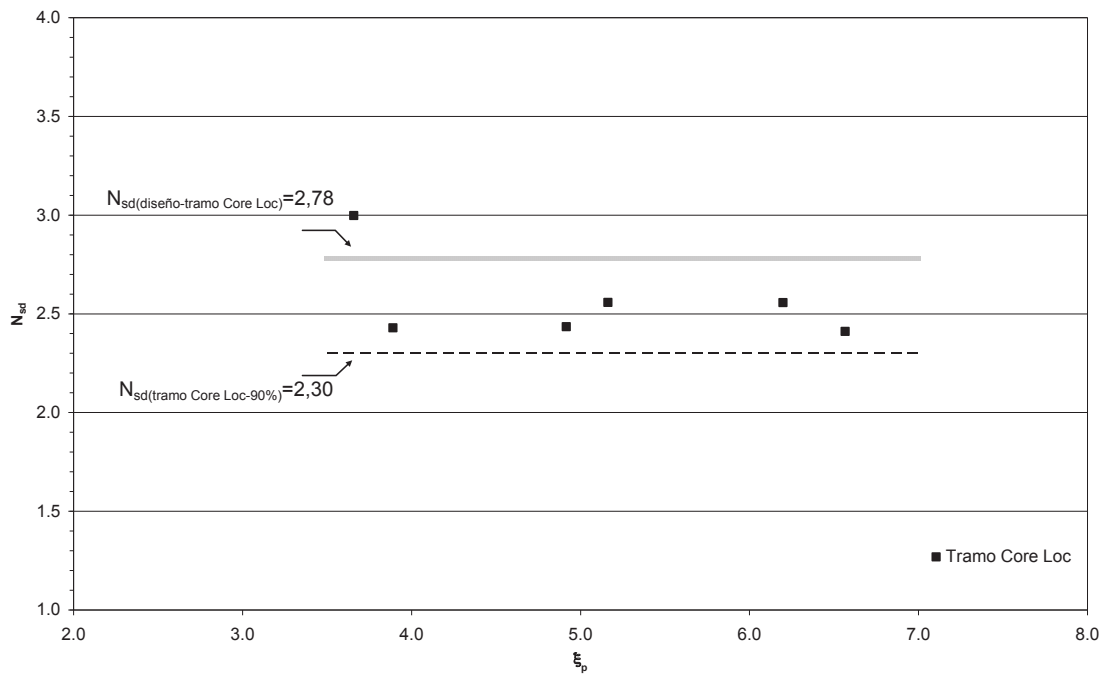
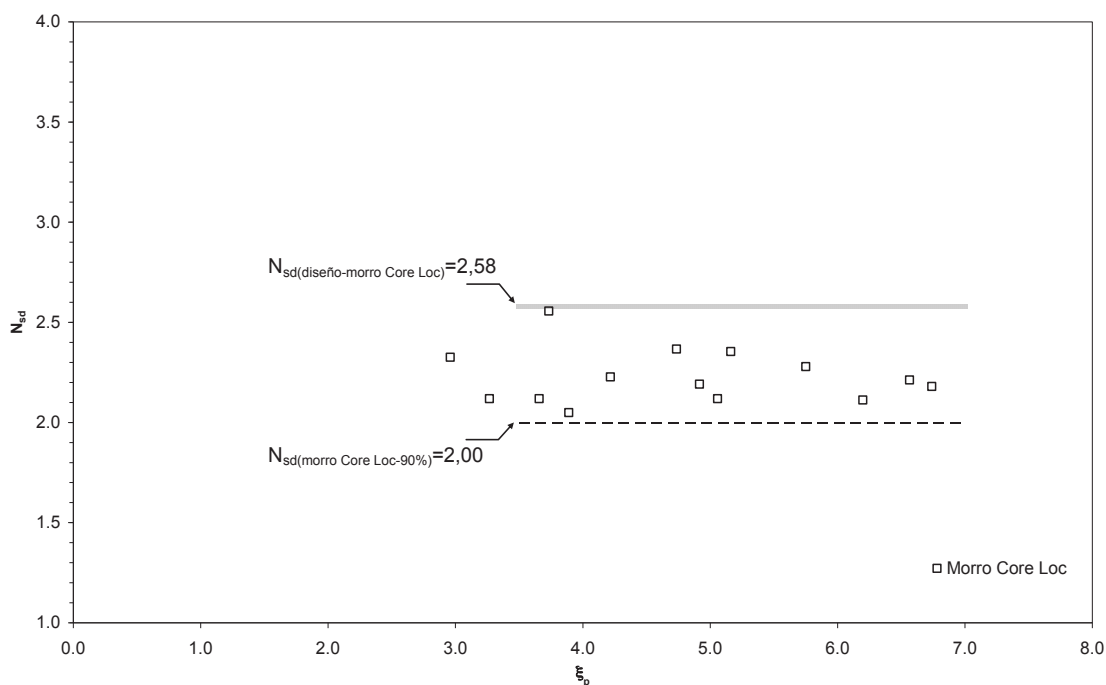


Figura 17 | Datos del tramo de obras de abrigo ejecutadas con Core-Loc™ contrastados con los valores actuales de diseño y los propuestos para las condiciones enunciadas.



**Figura 18** | Datos del morro de obras de abrigo ejecutadas con Core-Loc™ contrastados con los valores actuales de diseño y los propuestos para las condiciones enunciadas.

Considerando que el coeficiente de seguridad  $\gamma$  tiene en cuenta la incertidumbre en la determinación de los parámetros del hormigón y del agua (volúmenes y pesos específicos), la colocación de los prefabricados, la pendiente de la coraza, la topo-batimetría de la obra (incertidumbres en las mediciones y diferencias entre el momento del sondaje y el de ejecución), la permeabilidad del núcleo, y finalmente, las características del oleaje (no sólo de su altura). Para los valores propuestos, asumiendo una incertidumbre del 10% en las características de los materiales ( $\gamma_A$ ), un 5% en la pendiente ( $\gamma_{cotg}$ ) y un 3% en el tamaño final ( $\gamma_{Dn}$ ), resulta entre el 40% (tramo) y el 60% (morro) de incertidumbre en las características del oleaje y de la ecuación ( $\gamma_{propuesto} = \gamma_{Hs} \cdot \gamma_A$ ). Bajo las condiciones actuales de diseño, este último porcentaje es sólo del 25% (Tabla 3).

**Tabla 3** | Resumen de los números de estabilidad de diseño para cada elemento prefabricado y sus respectivos coeficientes de seguridad.

Variable	Accropode		Core Loc	
	Tramo	Morro	Tramo	Morro
$N_s$ (umbral de rotura)	4.1	3.7	4.17	3.87
$\gamma$	1.5	1.5	1.5	1.5
$N_{sd}$	2.7	2.5	2.78	2.58
$K_D$	15	11.5	16	13
$N_{sd \text{ propuesto}}$	2.40	1.95	2.30	2.00
$K_{D \text{ propuesto}}$	10.40	5.60	9.15	6.00
$\gamma_{propuesto}$	1.70	1.90	1.80	1.94
$\gamma_{Hs}$	1.44	1.59	1.52	1.63



Los valores propuestos se aproximan a los obtenidos en ensayos bajo condiciones extremas (Özkan *et al.*, 2005; Burcharth *et al.*, 1998) para  $H_s$  y  $T_p$ . Los niveles de diseño se traducen en un incremento en el volumen de los elementos Accropode® del 40% en el tramo y del 100% en el morro, y en Core-Loc™ del 75% en el tramo y del 100% en el morro. Sin embargo, y como se aprecia en la Figura 19 y en la Figura 20, se reduce el número de bloques requeridos por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie en un porcentaje que puede llegar en algunos casos al 50%. Esto último implica una mejora respecto de las tareas de encofrado, almacenamiento, transporte y colocación.

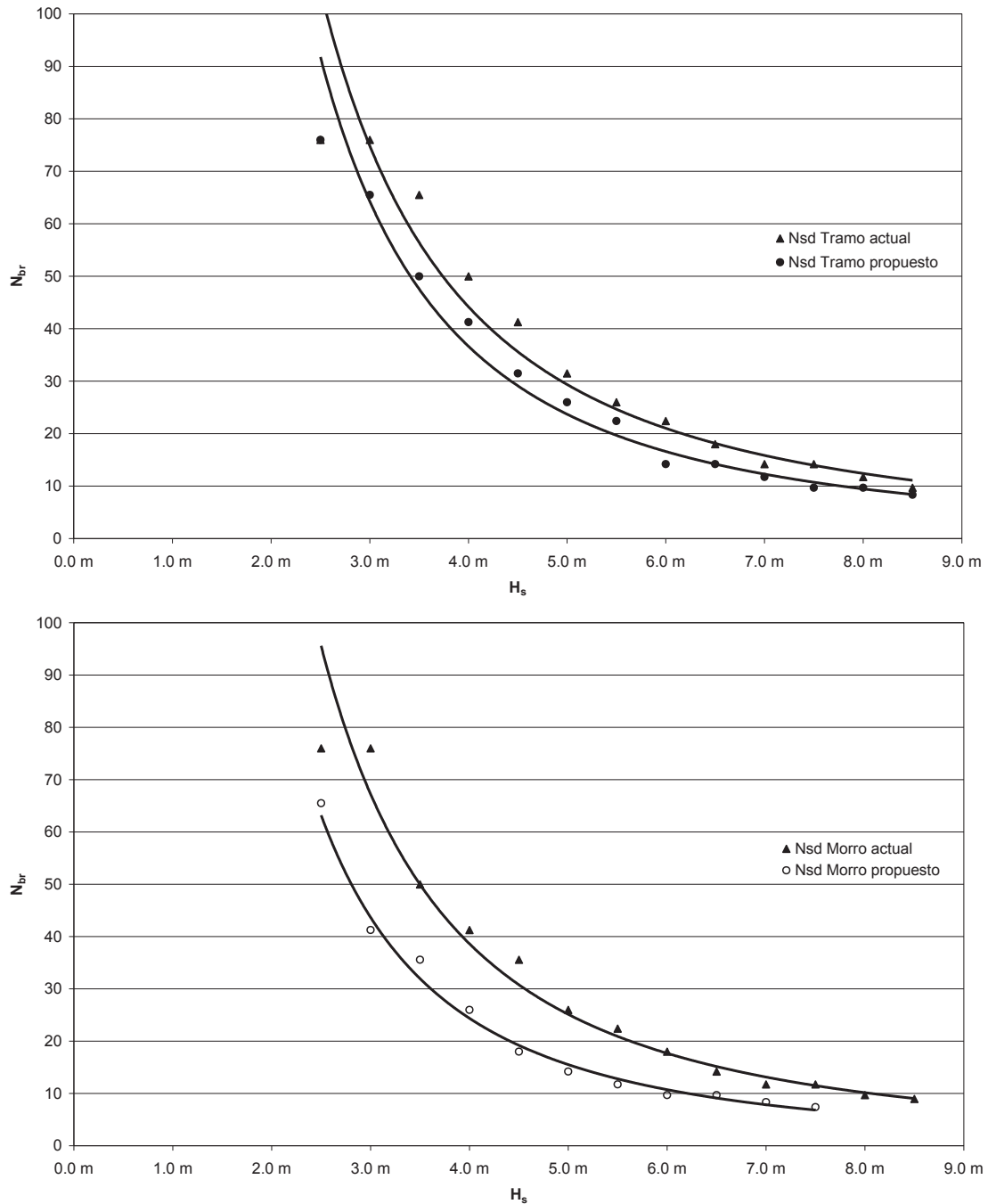


Figura 19 | Número de bloques Accropode® bajo condiciones actuales de diseño y con el valor propuesto para el tramo y el apoyo, respectivamente.

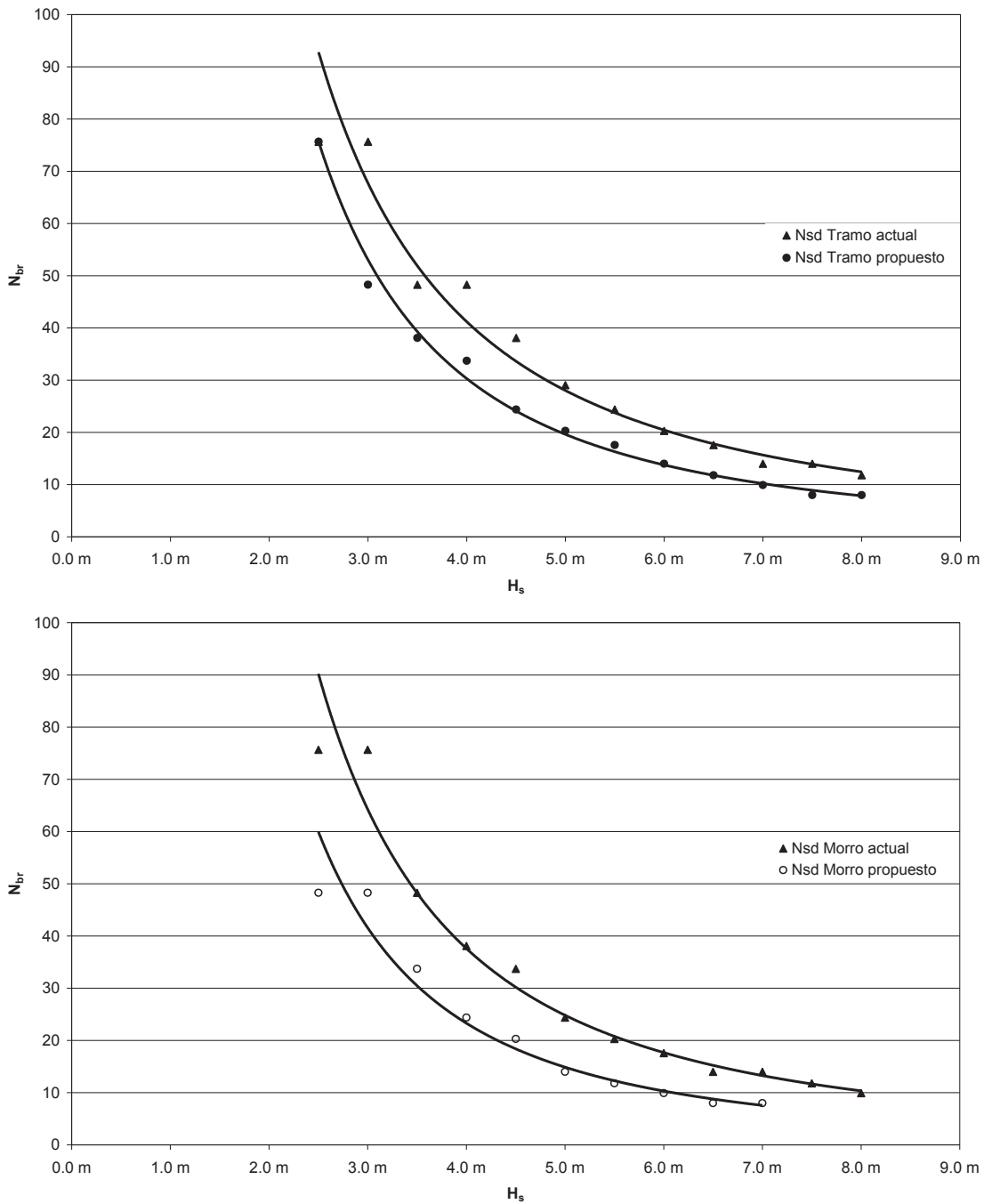


Figura 20 | Número de bloques Core-Loc™ bajo condiciones actuales de diseño y con el valor propuesto para el tramo y el morro, respectivamente.

## CONCLUSIONES

A partir de lo expuesto, se puede concluir lo siguiente:

1. Los coeficientes de seguridad utilizados actualmente se basan en ensayos de laboratorio principalmente bidimensionales y bajo condiciones de laboratorio controladas. A su vez, descansan en la reducida reserva de resistencia del intervalo existente entre el inicio de la falla y el de ocurrencia de ésta.

- Es recomendable que los números de estabilidad de las expresiones de Van der Meer para corazas con elementos Accropode® y Core-Loc™ y sus sucesores (Accropode II, Ecopode, entre otros), cuenten para situaciones extremas y/o núcleos de baja permeabilidad, con un coeficiente de seguridad superior al actual. Estos casos se presentan en playas con alturas de olas elevadas ( $H_s$  superior a los 7 m), expuestas a fuertes pendientes de fondo al frente de la obra (1:10 - 1:5), olas oceánicas de largo período ( $T$  por encima de los 16 s), profundidades elevadas (superiores a 14 m) en costas de perfiles reflectivos, zonas de interacción y/o bajo efectos adversos de las mareas meteorológicas locales, núcleos de obras de abrigo de baja permeabilidad, entre otros.
- Para condiciones enunciadas en esta publicación, es decir, costas con elevadas pendientes de fondo (1:10 - 1:5), elevadas alturas de ola en condiciones expuestas, olas oceánicas de largo período ( $H_s$  superior a los 7 m y  $T_p$  mayores o iguales a los 16 s), profundidades elevadas a pie de obra (superiores a los 12 m) se proponen las siguientes expresiones de diseño basadas en bandas de confianza del 90%.

Accropode®:

- Tramo (tronco): 
$$N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,4 \quad (17)$$

- Morro (extremo): 
$$N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 1,95 \quad (18)$$

Core-Loc™:

- Tramo (tronco): 
$$N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,3 \quad (19)$$

- Morro (extremo): 
$$N_{sd} = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 2,0 \quad (20)$$

- Los niveles de diseño propuestos se traducen en un incremento en el volumen de los elementos Accropode® del 40% en el tramo (tronco) y del 100% en el morro (extremo), y en Core-Loc™ del 75% en el tramo (tronco) y del 100% en el morro (extremo). Sin embargo, y como se aprecia en la Figura 19 y en la Figura 20, se reduce el número de bloques requeridos por cada 100 m<sup>2</sup> de superficie en un porcentaje que puede llegar en algunos casos al 50%. Esto último implica una mejora respecto de las tareas de encofrado, almacenamiento, transporte y colocación.
- Para los valores propuestos, asumiendo una incertidumbre del 10% en las características de los materiales ( $\gamma_D$ ), un 5% en la pendiente ( $\gamma_{cot\alpha}$ ) y un 3% en el tamaño final ( $\gamma_{Dn}$ ), resulta entre el 40% (tramo) y el 60% (morro) de incertidumbre en las características del oleaje y de la ecuación ( $\gamma_{H_s} \cdot \gamma_A$ ). Bajo las condiciones actuales de diseño, este último porcentaje es del 25%.
- La evaluación mediante ensayos físicos tridimensionales de la interacción entre secciones de distintas corazas resulta un aspecto relevante en la determinación del peso-volumen del elemento de coraza.
- Es importante remarcar la necesidad de un mayor número de datos que tengan en cuenta las variables indicadas y avalen las conclusiones de este trabajo.

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área media de erosión de la coraza, en m <sup>2</sup> .
d	Profundidad, en m.
D <sub>n</sub>	Diámetro nominal del elemento que conforma la coraza, calculado como lado del cubo equivalente de piezas de hormigón, en m.
H <sub>s</sub>	Altura significativa de ola de diseño, en m.
K <sub>D</sub>	Coefficiente de estabilidad para la ecuación de Hudson, -.
L <sub>0</sub>	Longitud de onda de la ola en condiciones de aguas profundas, en m.
m	Pendiente del talud de la coraza (manto) de la obra de abrigo, -.
M	Masa del elemento prefabricado, en tn.
N <sub>o</sub>	Número de bloques desplazados en la coraza, -.
N <sub>od</sub>	Nivel de daño, -.
N <sub>s</sub>	Número de estabilidad, -.
N <sub>sd</sub>	Número de estabilidad de diseño, -.
$S = \frac{A}{D_n^2}$	Parámetro de daño, -.
T <sub>m</sub>	Período medio de la ola, en s.
T <sub>p</sub>	Período pico de la ola, en s.
V	Volumen del elemento prefabricado, en m <sup>3</sup> .
α	Ángulo formado por el talud de la coraza de la obra de abrigo con la horizontal, -.
Δ = ρ <sub>r</sub> /ρ <sub>a</sub> - 1	Densidad relativa de los elementos prefabricados, -.
γ	Coefficiente de seguridad, -.
γ <sub>A</sub>	Coefficiente de seguridad asociado a la ecuación de estabilidad de elementos prefabricados, -.
γ <sub>cotα</sub>	Coefficiente de seguridad referido a la pendiente del talud de la coraza, -.
γ <sub>Dn</sub>	Coefficiente de seguridad asociado al tamaño nominal del elemento prefabricado, -.
γ <sub>Hs</sub>	Coefficiente de seguridad asociado a la incertidumbre en los parámetros del oleaje, -.
γ <sub>z</sub>	Producto de los coeficientes de seguridad γ <sub>A</sub> γ <sub>Δ</sub> γ <sub>Dn</sub> γ <sub>cotα</sub> <sup>1/3</sup> , -.
ρ <sub>a</sub>	Densidad del agua, en t/m <sup>3</sup> .
ρ <sub>r</sub>	Densidad del hormigón, en t/m <sup>3</sup> .
ξ <sub>m</sub> = tan α / √(2πH <sub>s</sub> / gT <sub>m</sub> <sup>2</sup> )	Parámetro de rotura de la ola o de Iribarren calculado bajo condiciones de período medio, -.
ξ <sub>p</sub>	Parámetro de rotura de la ola o de Iribarren calculado bajo condiciones de período pico, -.

## REFERENCIAS

- Burcharth, H. F., Christensen, M., Jensen, T., Frigaard, P. (1998). *Influence of Core Permeability on Accropode Armour Layer Stability*. Aalborg University, Denmark. 13 p.
- CLI. Concrete Layer Innovations. (2013). Monographies Accropode. 30 p.
- CLI. Concrete Layer Innovations. (2013). Monographies Core Loc. 12 p.

- Delft University of Technology. Virtual Knowledge Centre - Hydraulic Engineering. International Breakwater Directory <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/>. (Accedido en 2014).
- Delta Marine Consultants. (2011). *Guidelines for Xbloc Concept Designs*. 21 p.
- EM 1110-2-1100 (Part VI). (2011). *Coastal Engineering Manual*. USACE.
- Jensen O. (2014). Safety of Breakwater Armour Layers with Special Focus on Monolayer Armour Units (Discussion Based Upon Four Decades Experience of Breakwater Damage). *ICE Conference – Breakwaters 2013*. 12 p.
- Melby, J. A., Turk, G. F. (1997). *Core-Loc Concrete Armour Units*. Technical Report CHL-97-4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington.
- Muttray M., Reedijk J. (2008). *Design of Concrete Armour Layers*. Delta Marine Consultants, H.J. Nederhorststraat 1, 2800 AG Gouda. The Netherlands.
- Özkan Cevik, E., Cihan, K., Yüksel, Y. (2005). *Stability for Structures Armored with Core-Loc™*. Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
- Shore Protection Manual. (1975). *Shore Protection Manual (2 edition)*, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia, USA.
- Sogreah Ingénierie. (1996-2009). *Accropode® Design Guidelines*.
- Sogreah Ingénierie. *Core-Loc™ Design Guidelines*.
- Van der Meer, J. W. (1987). Stability of Breakwater Armour Layers- Design Formulae. *Coastal Engineering*, 11 (1987) 219-239 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 219-239.
- Van der Meer, J. W. (1988). Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode, Design of Breakwaters, Thomas Telford. Proc. *Breakwaters '88 Conference*, Eastbourne. 59-68.
- Van der Meer, J. W. (1999). *Design of Concrete Armour Layers. Head Coastal Structures*. Head Coastal Structures. Infram. PO Box 81, 3890 AB Zeewolde, NL.
- Vidal C., Medina R., Lomónaco, P. (2006). Wave height parameter for damage description of rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 53, 711-722. doi:10.1016/j.coastaleng.2006.02.007
- Werren, D.J., Baird, W.F., Denechere, M., Fons, M. (2002). The Core-Loc armouring technique – experience on eight recent projects. *28<sup>th</sup> Int. Conf. on Coastal Eng.*, Book of Abstracts, Paper No. 157.