



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO PARA
ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

PRESENTA:

ING. ADRIANA HERNÁNDEZ MENDOZA

DIRECTOR DE TESINA: DR. RODOLFO SILVA CASARÍN

MÉXICO, D.F.

JUNIO DE 2016

Contenido

Introducción	8
1. Estructuras de Protección	10
1.1. Tipología de Estructuras.....	11
2. Flujo en y sobre estructuras	22
2.1. Ascenso Máximo (Run up).....	22
2.1.1. Estimación del ascenso máximo.....	23
2.2. Descenso Máximo (Run down).....	31
2.2.1. Estimación del descenso máximo.....	31
2.3. Rebase (Overtopping).....	33
2.3.1. Estimación del rebase.....	36
2.4. Transmisión.....	43
2.4.1. Estimación de la transmisión.....	43
2.5. Reflexión.....	46
2.5.1. Estimación de la reflexión.....	47
3. Diseño Mecánico	52
3.1. Clasificación de Esfuerzos.....	52
3.2. Tipos de fallas.....	52
3.3. Criterios de Estabilidad.....	53
3.4. Criterios de Avería.....	54
3.5. Diseño de Estructuras en talud.....	55
3.6. Diseño de estructuras sumergidas y rebasables.....	64
3.7. Diseño de estructuras verticales.....	69
3.8. Diseño de estructuras mixtas.....	72
3.9. Diseño de estructuras con espaldón.....	75
4. Caso de Aplicación	81
4.1. Descripción de la programación.....	81
4.2. Validación de la programación.....	101
4.3. Ejemplo de cálculo.....	105
5. Conclusiones y recomendaciones	118
6. Fuentes de Consulta	120

Tablas

Tabla 1 Valores de porosidad aplicables para Losada y Giménez-Curto	24
Tabla 2 Coeficientes de mejor ajuste para la ecuación de Battjes.....	26
Tabla 3 Valores del factor de reducción por rugosidad	26
Tabla 4 Coeficientes A, B, C y D para estimar el ascenso en taludes permeables.....	29
Tabla 5 Coeficientes de ajuste Ad y Bd	32
Tabla 6 Modelos para la estimación del gasto medio de rebase	37
Tabla 7 Coeficientes de ajuste para Owen.....	38
Tabla 8 Factor de reducción por rugosidad γ_r para Owen	38
Tabla 9 Coeficientes a y b para taludes con berma (Owen)	39
Tabla 10 Extensión de coeficientes de ajuste para Bradbury y Allsop.....	40
Tabla 11 Geometrías y coeficientes de ajuste para Bradbury y Allsop.....	41
Tabla 12 Valores del factor de reducción γ_s por permeabilidad del muro vertical	42
Tabla 13 Coeficientes empíricos de la ecuación de Numata (1976).....	44
Tabla 14 Coeficientes empíricos para la formulación de Numata (1976).....	48
Tabla 15 Valores de a para dos o más capas de recubrimiento	49
Tabla 16 Valores de a y b (Allsop, 1990)	50
Tabla 17 Valores del coeficiente de rugosidad (Zanuttigh y van der Meer, 2008)	50
Tabla 18 Valores del a y γ_f para elementos prefabricados (Zanuttigh y van der Meer, 2008)	51
Tabla 19 Valores del parámetro S para los diferentes niveles de avería	55
Tabla 20 Valores del parámetro S para los diferentes niveles de avería	58
Tabla 21 Valores del A_w y B_w para la formulación de Losada	59
Tabla 22 Valores máximos de ψ para bloques paralelepípedicos	60
Tabla 23 Valores de daño, para la formulación de van der Meer (1988)	61
Tabla 24 Factores de incremento del peso en las piezas del morro.....	63
Tabla 25 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del talud exterior	65
Tabla 26 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño de la coronación	67
Tabla 27 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del talud interior	68
Tabla 28 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del morro	69

Tabla 29 Coeficiente γ de Nagai (1973) 75

Figuras

Figura 1 Prevención de la erosión.....	10
Figura 2 Prevención de inundaciones	10
Figura 3 Protección contra el oleaje.....	10
Figura 4 Estabilización de canales.....	11
Figura 5 Protección de desalinizadora	11
Figura 6 Estructura de talud con pendiente.....	12
Figura 7 Estructura de talud vertical.....	13
Figura 8 Estructura mixta	13
Figura 9 Estructura horizontal de sección compuesta.....	13
Figura 10 Estructura flexible	14
Figura 11 Falla por acumulación de daños	14
Figura 12 Estructura rígidas.....	15
Figura 13 Estructura sumergida.....	15
Figura 14 Estructura flotante.....	16
Figura 15 Estructura hidráulica	16
Figura 16 Estructura neumática	16
Figura 17 Estructura de enrocamiento	17
Figura 18 Estructura de elementos artificiales.....	17
Figura 19 Ejemplo de elementos artificiales.....	18
Figura 20 Rompeolas.....	18
Figura 21 Rompeolas paralelos a la costa	18
Figura 22 Formación de tómbolos.....	19
Figura 23 Escolleras	19
Figura 24 Espigones.....	20
Figura 25 Protección marginal	20
Figura 26 Protección playera	20
Figura 27 Rompeolas flotante	21
Figura 28 Rompeolas arrecife.....	21
Figura 29 Ascenso Máximo (Ru).....	22

Figura 30 Definición del ángulo equivalente (incluyendo Berma)	27
Figura 31 Definición del ángulo medio (excluyendo Berma).....	27
Figura 32 Francobordo de la berma.....	28
Figura 33 Coeficientes de permeabilidad nominal de acuerdo con van der Meer (1988) .	30
Figura 34 Descenso Máximo (Rd).....	31
Figura 35 Coeficientes de ajuste para la ecuación de Losada	32
Figura 36 Rebase	34
Figura 37 Valores críticos del gasto medio de rebase en l/s	35
Figura 38 Parámetros de perfiles transversales involucrados en el rebase.....	36
Figura 39 Transmisión	43
Figura 40 Valores de a para una capa de roca (Seeling y Ahrens, 1981).....	49
Figura 41 Niveles de avería para una estructura de tres capas	54
Figura 42 Estructura marítima a talud.....	56
Figura 43 Roca	56
Figura 44 Piezas artificiales	56
Figura 45 Variación del coeficiente de difracción alrededor del morro	62
Figura 46 Sectores de una estructura rebasable o sumergida	64
Figura 47 Esquema de una estructura vertical.....	70
Figura 48 Nomenclatura del método de Goda (1985)	70
Figura 49 Esquema de una estructura mixta.....	72
Figura 50 Nomenclatura del método de Nagai (1973).....	72
Figura 51 Ábaco para determinar el parámetro α de Nagai (1973)	74
Figura 52 Esquema de una estructura con espaldón	76
Figura 53 Esquema de presiones del método de Günbak y Gökce (1984).....	76
Figura 54 Región de aplicación del método de Martín et al (1955).....	78
Figura 55 Esquema de distribuciones de presión de Martín et al (1955)	78
Figura 56 Esquema de distribuciones de presión de Martín et al (1955)	80
Figura 57 Ventana principal de la interfaz gráfica	81
Figura 58 Ejemplo de Ingreso de datos generales	82
Figura 59 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Regular	83
Figura 60 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes impermeables..	84

Figura 61 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes impermeables (continuación)	85
Figura 62 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes permeables	85
Figura 63 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Regular.....	86
Figura 64 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Irregular	87
Figura 65 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Irregular (continuación).....	87
Figura 66 Ventana para el cálculo de rebase.....	88
Figura 67 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)	89
Figura 68 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)	90
Figura 69 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)	91
Figura 70 Ventana para el cálculo de Transmisión	92
Figura 71 Ventana para el cálculo de Transmisión (continuación)	93
Figura 72 Ventana para el cálculo de Transmisión (continuación)	94
Figura 73 Ventana para el cálculo de Reflexión.....	95
Figura 74 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación).....	96
Figura 75 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación).....	97
Figura 76 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación).....	98
Figura 77 Ventana para el diseño de estructuras en talud	99
Figura 78 Ventana para el diseño de estructuras en talud (continuación)	100
Figura 79 Ventana para el diseño de estructuras en talud (continuación)	101
Figura 80 Excepciones (caracteres no numéricos)	102
Figura 81 Excepciones (valores máximos).....	102
Figura 82 Excepciones (rangos de valores)	103
Figura 83 Excepciones (formulación no aplicable)	104
Figura 84 Verificación de resultados	104
Figura 85 Cálculo de run up (oleaje regular)	105
Figura 86 Cálculo de run up (oleaje irregular)	106
Figura 87 Cálculo de run up (oleaje irregular)	107
Figura 88 Cálculo de run down (oleaje regular).....	108
Figura 89 Cálculo de run down (oleaje irregular).....	109
Figura 90 Cálculo de run down (oleaje irregular).....	109

Figura 91 Cálculo del rebase	110
Figura 92 Cálculo del rebase (continuación)	111
Figura 93 Cálculo de la transmisión	112
Figura 94 Cálculo de la transmisión (continuación)	112
Figura 95 Cálculo de la reflexión	113
Figura 96 Cálculo de la reflexión (continuación)	114
Figura 97 Cálculo de la reflexión (continuación)	115
Figura 98 Ejemplo de diseño de estructuras en talud	116
Figura 99 Ejemplo de diseño de estructuras en talud (continuación)	117

Introducción

La zona costera es la transición donde la tierra, la atmosfera y el océano se encuentran y está directamente influenciada por procesos que se generan tanto dentro como fuera de esta área.

Algunas de las principales actividades que se llevan a cabo en la zona costera son:

- Mineras (sal, roca caliza y arena).
- Industriales (petroquímica, siderúrgica, etc.) y comerciales de transportación marítima.
- Turísticas, relacionadas con actividades comerciales y de construcción.
- Pesqueras y acuícolas.

México tiene una longitud de costa de aproximadamente 11,000 km. La dinámica poblacional de la zona costera indica un desplazamiento hacia estas zonas, ejemplo de ello es que la población de los municipios costeros de 1995 a 2005 aumentó un 33.4%. Es importante mencionar que este crecimiento poblacional ha sido espacialmente irregular y desordenado ocasionando un rápido desarrollo de zonas turísticas cuya construcción, en muchos casos, ha desequilibrado la costa llevando a la necesidad de obras adicionales de defensa para intentar mitigar. Muchas veces con poco éxito, los acelerados procesos de erosión que tanto la mala planeación como la escasez de información oceanográfica han provocado.

Para controlar los crecimientos irregulares que generan opresión costera, es necesaria una adecuada gestión de los ecosistemas costeros y marinos; lo que implica tener una visión global e integradora. Desafortunadamente, en México aún no se ha logrado tal visión dado que las soluciones a los problemas costeros se han llevado a cabo de manera puntual, sin considerar las repercusiones en zonas adyacentes y bajo esquemas de urgencia.

Aunado a lo anterior, es común que el diseño de las obras de abrigo, protección costera y aprovechamiento de recursos tenga el mismo derrotero que el manejo de la costa en su conjunto. Es por ello que el objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta que facilite el diseño geométrico y mecánico de las estructuras de protección costera más comunes. El usuario objetivo de la herramienta son ingenieros de proyectos marítimos. Esta herramienta pretende integrar el estado del arte y agilizar los cálculos numéricos.

Para el logro del objetivo, primero se investigaron las bases teóricas de los parámetros de diseño para estructuras de protección costera, esto es, los tipos de estructuras, los fenómenos que deben de ser considerados en su diseño y las formulaciones más universalmente empleadas para su estimación. Posteriormente se programaron algunas de estas formulaciones en un entorno integrado de desarrollo denominado NetBeans. Finalmente, se validó la programación mediante la consideración de excepciones (errores que pudieran interrumpir el funcionamiento de la programación) y se verificaron los

resultados obtenidos en la interfaz gráfica mediante la comparación con los resultados obtenidos en una hoja de cálculo.

El presente trabajo, entonces, está conformado por cinco capítulos:

1. Estructuras de protección. Como primera parte de la tesina, se presentan algunas clasificaciones de las estructuras de protección costera y se describe brevemente las características de cada una ellas.
2. Flujo en y sobre estructuras. Se mencionan los fenómenos que se deben de considerar para el diseño de las estructuras, además de que se presentan formulaciones para la determinación de los mismos tanto para oleaje regular como para oleaje irregular.
3. Diseño mecánico. Una vez que se tiene un conocimiento general de los tipos de estructuras y los fenómenos generados por el flujo, se señalan las fallas que pudieran presentar las estructuras causadas por las condiciones a las que están sometidas. También se presentan algunas formulaciones para el diseño de diferentes tipos de estructuras.
4. Caso de aplicación. En este capítulo se describe el resultado de la programación de los parámetros de diseño, algunas consideraciones en las formulaciones utilizadas, validaciones y se presentan ejemplos de cálculo para cada uno de esos parámetros
5. Conclusiones y Recomendaciones. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1. Estructuras de Protección

La infraestructura de protección costera es el conjunto de obras y sistemas construidos e implementados por el hombre para la defensa o estabilización costera contra el embate de las inclemencias del mar (Salles y Silva, 2004).

En general, las principales funciones de las obras de protección son:

- Prevenir la erosión de la línea de la costa (Figura 1).



Figura 1 Prevención de la erosión

- Prevenir inundaciones en zonas costeras (Figura 2).



Figura 2 Prevención de inundaciones

- Proteger contra el oleaje la entrada y recintos de puertos o marinas (Figura 3).



Figura 3 Protección contra el oleaje

- Estabilizar canales de navegación (Figura 4).



Figura 4 Estabilización de canales

- Proteger obras de toma (plantas eléctricas o desalinizadoras) o de descarga (emisores submarinos) contra el azolve (Figura 5).



Figura 5 Protección de desalinizadora

A continuación se presentan algunas clasificaciones de las estructuras de protección costera.

1.1. Tipología de Estructuras

Las estructuras de protección se pueden clasificar de acuerdo con su geometría, desde el punto de vista estructural, por la forma en la que disipan el oleaje, por el material del que están formadas las estructuras, a continuación se describen algunas clasificaciones.

1.1.1. Geometría

De acuerdo con su geometría las obras de protección se dividen en:

- 1) En talud. Las ventajas que tiene esta obra desde el punto de vista constructivo es que la estructura se puede deformar, es de fácil reparación y se requiere de una baja cota de coronación.

Algunas de las desventajas son que necesita altos volúmenes de material de tamaños específicos, reduce superficie útil a la zona abrigada por la longitud de sus taludes, requiere de la existencia de bancos de materiales apropiados y cercanos al lugar de proyecto, y en caso de que no existan, es necesario el uso de elementos prefabricados, lo cual hace que se incremente el costo y el plazo de ejecución de la obra. Normalmente requiere mantenimiento durante toda su vida útil. Normalmente requiere mantenimiento durante toda su vida útil. Un corte transversal de este tipo de estructuras se presenta en la Figura 6.

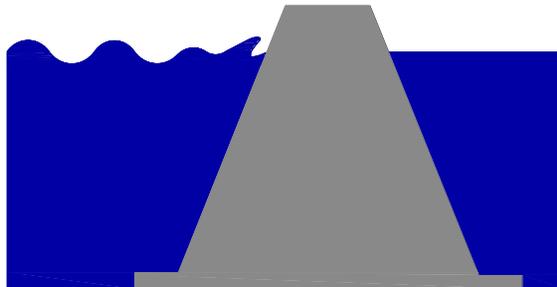


Figura 6 Estructura de talud con pendiente

- 2) Vertical. Este tipo de estructura no está diseñada para disipar la energía del oleaje, pues no se produce la rotura de la ola, sino que se refleja (Figura 7).

Debe de contar con condiciones especiales de cimentación, para evitar que las olas rompan sobre ella y las condiciones geotécnicas deberán de asegurar que no haya asentamientos debidos a la socavación que puedan conducir a su falla total o colapso, por lo que requiere de un suelo resistente para su colocación o una banqueta de protección.

Una ventaja que tiene es que no se necesitan bancos de materiales cercanos y su construcción es relativamente rápida. Requiere menor volumen de material en comparación con la estructura de talud. Se construye con elementos prefabricados rellenos con arena, bloques de concreto o pantallas.

Esta estructura falla por acumulación de daño, deslizamiento o volteo por lo general, la falla se produce tras la acción de muchas olas.

Se recomienda que se realice un estudio de la velocidad de las corrientes por su posible acción erosiva a pie de la estructura (socavación).

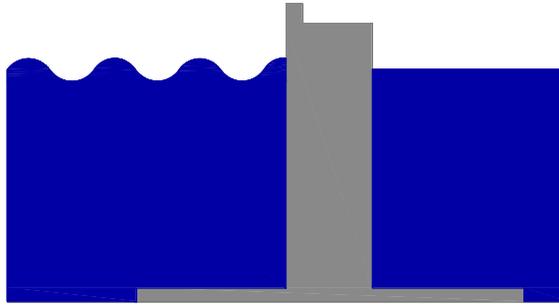


Figura 7 Estructura de talud vertical

- 3) Mixto. Esta estructura en su parte superior es vertical y la parte inferior tiene talud (Figura 8). Su uso se restringe a profundidades en donde se obliga al oleaje a romper sobre el enrocamiento en condición de bajamar y la energía se refleja contra el muro vertical en condición de pleamar.

La corona del enrocamiento se encuentra en el máximo nivel de bajamar.

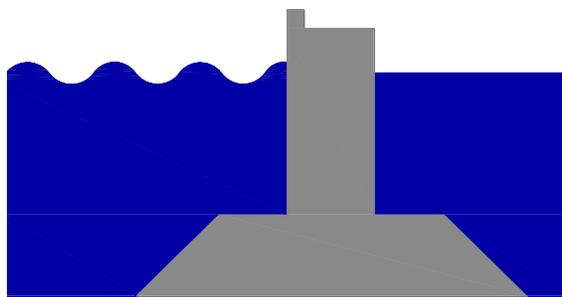


Figura 8 Estructura mixta

- 4) Horizontales de sección compuesta. Se compone de un cajón con elementos de coraza (con varias capas o de un tamaño de roca) en su cara frontal; un corte transversal se muestra en la Figura 9. Este tipo de estructura se utiliza en aguas someras, aunque en ocasiones se construye en aguas profundas cuando la acción del oleaje puede ser muy energética.

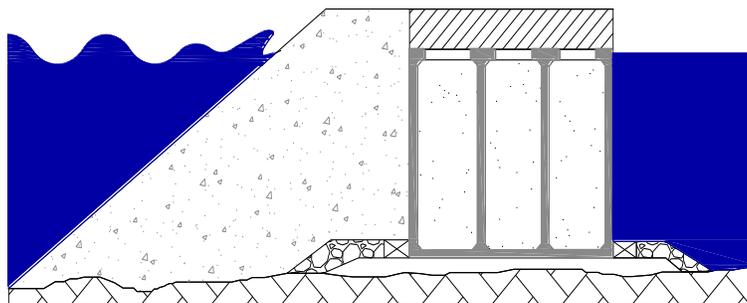


Figura 9 Estructura horizontal de sección compuesta

1.1.2. Estructural

Desde el punto de vista estructural las obras de protección pueden ser:

- a) Flexible. Es una estructura en talud de materiales sueltos (prefabricados o roca). Admiten una deformación determinada bajo las condiciones de oleaje de diseño. Una vez alcanzada dicha deformación, ésta se mantiene estable, con los elementos de la estructura también estables.

Además permiten diversos grados de avería (o deformación), aun manteniendo sus condiciones funcionales.

En la Figura 10 se muestra una estructura flexible de roca y en la Figura 11 se ejemplifica la falla por acumulación de daños en este tipo de estructuras.



Figura 10 Estructura flexible



Figura 11 Falla por acumulación de daños

- b) Rígida. Es aquella en la que las deformaciones admisibles bajo la solicitación de cálculo son tan pequeñas que no se tienen en cuenta en la definición de la avería.

Se supone que una vez superado un determinado umbral de la acción, la estructura falla catastróficamente, perdiendo sus cualidades funcionales. Ejemplos son diques o muros de cajones de concreto armado (Figura 12).



Figura 12 Estructura rígidas

1.1.3. Disipación del oleaje

Las estructuras de acuerdo con la forma en la que disipan el oleaje se pueden clasificar en:

- 1) Sumergida. Produce una disminución en la altura de la ola incidente mediante una reflexión y disipación parcial del oleaje debido a efectos de fricción y turbulencia. Es una estructura de costo relativamente bajo.

Este tipo de estructura puede llegar a ser un peligro para la navegación, debido a que no es visible. Una desventaja, es que puede ser que su altura no sea suficiente para reducir la acción de las olas.

En la Figura 13 se puede apreciar un corte transversal de este tipo de estructuras.

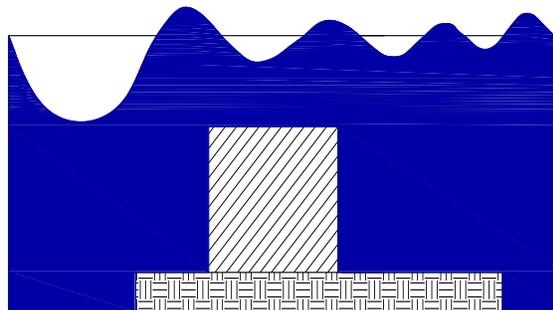


Figura 13 Estructura sumergida

- 2) Flotante. Es un obstáculo para el oleaje que se ancla al fondo del mar (Figura 14). Produce un coeficiente de transmisión del oleaje incidente hacia la zona por proteger.

Está ideada para amortiguar la energía del oleaje por contacto con la ola y en proporción al ancho de la estructura flotante. Suele instalarse en el interior de dársenas de puertos deportivos para eliminar pequeños oleajes que se

pueden originar dentro de la misma, también se utiliza como obra temporal. Puede estar formada por cajones de concreto (huecos), fibra de vidrio o neumáticos y armazones de metal.

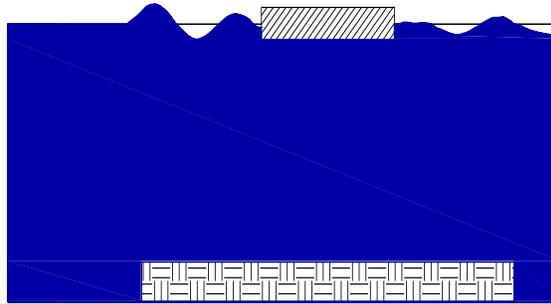


Figura 14 Estructura flotante

- 3) Neumática e hidráulica. Es un dispositivo especial que inyecta agua o aire a presión (Figura 15 y Figura 16, respectivamente). Consiste en un tubo que desemboca en el mar a otro tubo que tiene una serie de agujeros por el cual pasa aire a presión o agua produciendo una gran cantidad de burbujas que al reventarse forman una corriente que evita la integración de la olas.

Generalmente se usa en aguas poco profundas para proteger pequeñas áreas. Son poco efectivos con un alto costo de operación, pero de rápida construcción con bajo costo inicial.

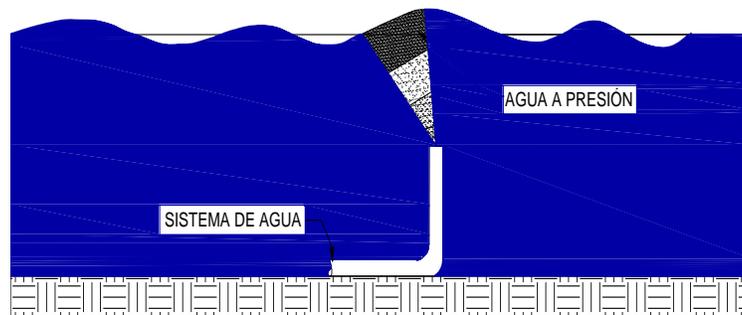


Figura 15 Estructura hidráulica

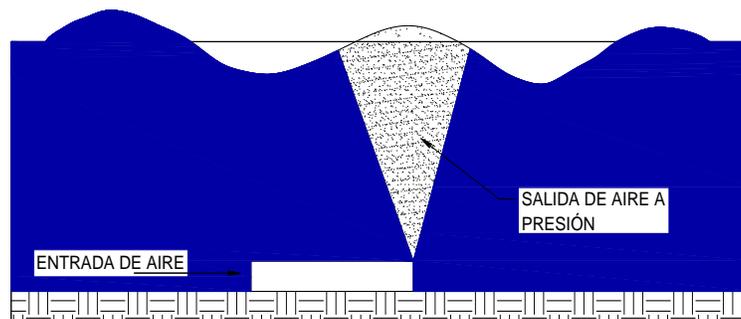


Figura 16 Estructura neumática

1.1.4. Material

Por el tipo de material que forma a las estructuras pueden ser de:

- a) Enrocamiento. Requiere de la existencia de bancos de material cercanos a la zona de proyecto. Es importante conocer la calidad y otras propiedades de la roca como son el peso específico, resistencia, durabilidad, etc.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de las estructuras de enrocamiento.



Figura 17 Estructura de enrocamiento

- b) Elementos artificiales. Es a base de concreto (Figura 18); entre los elementos comúnmente utilizados están los cubos, cubos modificados, acrópodos, Core-Loc, tetrápodos, etc.



Figura 18 Estructura de elementos artificiales

Estos elementos artificiales se dividen en cuatro categorías de acuerdo con su eficiencia hidráulica: masivos, voluminosos, esbeltos y perforados. Ejemplo de las formas de los elementos artificiales se pueden apreciar en la Figura 19.

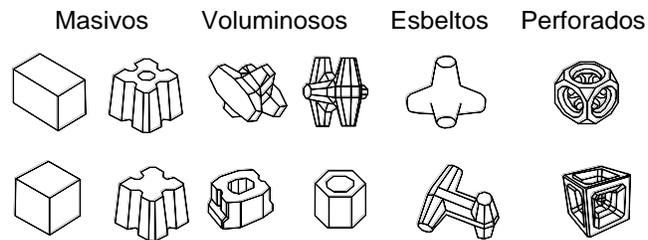


Figura 19 Ejemplo de elementos artificiales

1.1.5. Objetivo

Las obras de protección también se pueden clasificar de acuerdo con el objetivo que tienen, y son:

- 1) Rompeolas. Su objetivo es proteger las entradas a puertos y obras de toma contra oleajes y corrientes, mediante la disipación y/o reflexión de la energía del oleaje. Ejemplo de un rompeolas se muestra en la Figura 20.



Figura 20 Rompeolas

- 2) Rompeolas paralelos a la costa (rompeolas exento). Esta estructura previene la erosión de la playa reduciendo la altura del oleaje incidente y el transporte longitudinal del sedimento. En la Figura 21 se muestra tres rompeolas paralelos a la costa.



Figura 21 Rompeolas paralelos a la costa

Si se guarda una distancia apropiada entre los rompeolas y desde la línea de playa se pueden llegar a formar tómbolos (Figura 22).



Figura 22 Formación de tómbolos

- 3) Escolleras. Estabilizan los canales de navegación en desembocaduras y bocas. Las escolleras confinan las corrientes y flujos de marea, protegen contra precipitaciones excesivas y contracorrientes. También evitan el acarreo litoral y/o azolve en un canal.

En la Figura 23 se muestra un ejemplo de estas estructuras.



Figura 23 Escolleras

- 4) Espigones. Tienen por objetivo prevenir la erosión playera, a través de la reducción del transporte longitudinal del sedimento. Son elementos perpendiculares a la línea de la playa (Figura 24).

Estas estructuras no son efectivas para impedir la pérdida de material hacia el fondo del mar. Su longitud debe ser suficiente para rebasar la zona de máximo transporte (línea de rompientes).



Figura 24 Espigones

- 5) Protecciones marginales. Como su nombre lo dice, protegen una porción terrestre y sus estructuras de la erosión y rebase del oleaje, reforzando alguna parte del perfil playero. Frecuentemente protegen malecones, vialidades y construcciones, ejemplo de ello se aprecia en la Figura 25.



Figura 25 Protección marginal

- 6) Protecciones playeras. Previenen o eliminan la penetración del mar en áreas bajas, protegen contra la erosión, previenen o atenúan el rebase del oleaje. Separan la línea de la playa de la porción terrestre mediante una estructura impermeable (Figura 26).



Figura 26 Protección playera

- 7) Rompeolas flotante. Su objetivo es proteger a los puertos y zonas de atraque contra oleaje de alta frecuencia, reduce las alturas de ola por reflexión y

atenuación. En la Figura 27 se puede muestra un ejemplo de este tipo de estructuras.



Figura 27 Rompeolas flotante

- 8) Rompeolas arrecife. Previenen la erosión playera mediante la reducción de las alturas de ola en la playa. En la Figura 28 se muestra un rompeolas arrecife.



Figura 28 Rompeolas arrecife

2. Flujo en y sobre estructuras

El flujo en y sobre las estructuras es importante para el diseño de estructuras marítimas, por lo que se dividen en cinco fenómenos:

- Ascenso máximo (Run up)
- Descenso máximo (Run down)
- Rebase (overtopping)
- Transmisión
- Reflexión

Estos fenómenos dependen de las características del oleaje incidente (altura de ola, periodo y ángulo de incidencia), profundidad del agua a pie de la estructura, pendiente de la playa, pendiente y características de la estructura (geometría, rugosidad, permeabilidad, colocación de las piezas y capas que la componen). A continuación se describe cada uno de los fenómenos (de aquí en adelante serán denominados parámetros de diseño).

2.1. Ascenso Máximo (Run up)

Cuando las olas rompen sobre la estructura, la mayor parte de la energía se disipa, por lo que el movimiento oscilatorio desaparece dando lugar a una lámina de agua que recorre el talud de la estructura, es ese momento en que inicia el ascenso de las olas.

El ascenso máximo es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el nivel máximo que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometido a un flujo oscilatorio, sin que exista rebase (Figura 29).

Su importancia radica en que a partir del ascenso máximo se determina la altura del bordo libre (francobordo) necesaria para evitar el rebase del agua o bien para estimar el gasto por rebase que se puede presentar.

El ascenso máximo depende del talud, rugosidad y porosidad de la estructura, así como de la existencia de una berma y de su geometría, de la altura de ola incidente, período y dirección del oleaje. La predicción del Run up se basa en relaciones empíricas, resultado de ensayos realizados en canales de oleaje.

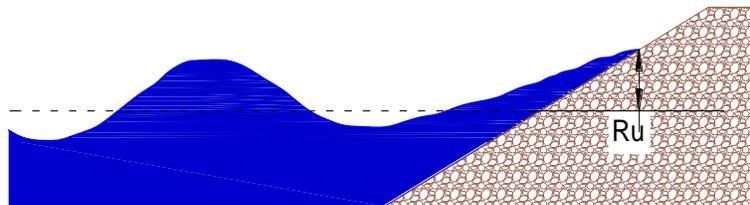


Figura 29 Ascenso Máximo (Ru)

2.1.1. Estimación del ascenso máximo

Existen diferentes expresiones para determinar el ascenso máximo y éstas dependen de la forma en que una ola rompe, del tipo de oleaje (regular o irregular), así como del tipo de estructura (permeable o impermeable).

El tipo de rotura de una ola se identifica por el parámetro de semejanza de la rompiente o número de Iribarren, que se define de la siguiente manera:

$$Ir_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (1)$$

Donde:

α : ángulo de inclinación del talud

H_0 : altura de ola en aguas profundas

L_0 : longitud de onda en aguas profundas

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

T : periodo de la onda

g : aceleración debida a la gravedad.

Para oleaje irregular, el número de Iribarren puede referirse al periodo medio o al periodo de pico espectral.

$$Ir_{0m} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_m}}} \quad \text{O bien} \quad Ir_{0p} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_p}}} \quad (2)$$

Donde:

m y p son el periodo medio y pico, respectivamente.

Algunos tipos de estructuras impermeables son los diques, rompeolas y revestimientos con superficies de asfalto, concreto o bien con una alta rugosidad, como son rocas muy angulosas, con núcleos de materiales finos. Las estructuras de talud permeable son aquellas que están compuestas por piezas sueltas con capas secundarias, filtros y núcleos de remanente de cantera.

Formulaciones para oleaje regular

Losada y Giménez-Curto (1980) propusieron un modelo experimental para el oleaje regular:

$$\frac{R_u}{H} = Au(1 - e^{BuIr}) \quad (3)$$

Donde:

Au y Bu: coeficientes de ajuste que dependen del tipo de piezas de manto principal y por tanto, de la porosidad

Los valores de los coeficientes obtenidos en experimentos de Losada y Giménez-Curto presentan una tendencia lineal, por lo que se determinaron las siguientes expresiones para estimarlos (Silva, 1998).

Diques homogéneos

$$Au = -4.706n + 3.293 \quad (4)$$

$$Bu = -1.569n + 0.038$$

Diques impermeables

$$Au = -3.825n + 3.344 \quad (5)$$

$$Bu = -1.179n + 0.081$$

Donde:

n: porosidad de acuerdo con los valores de la Tabla 1.

Tabla 1 Valores de porosidad aplicables para Losada y Giménez-Curto

Material	Porosidad
Dolos	0.56
Tetrápodos	0.50
Cubos	0.47
Roca clasificada	0.40
Roca sin clasificar	0.31

Ahrens y Heimbaugh (1988) determinaron otra fórmula para la estimación del ascenso máximo en oleaje regular.

$$\frac{R_u}{H} = \frac{aIr}{1+bIr} \quad (6)$$

Donde:

a y b: coeficientes experimentales, y que de acuerdo con Silva (1998) se calculan de la siguiente manera:

Para diques homogéneos

$$a = b(-5.5589n + 3.7954) \quad (7)$$

$$b = 3.9753n - 0.6774$$

Para diques impermeables

$$a = b(-3.6922n + 3.5785) \quad (8)$$

$$b = 1.3971n - 0.0501$$

Donde:

n: coeficiente de porosidad, los valores son los de la Tabla 1.

Formulaciones para oleaje irregular sobre taludes impermeables

De acuerdo con Battjes (1974), el ascenso máximo se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{R_{u_i\%}}{H_s} = (AIr + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad (9)$$

Donde:

$R_{u_i\%}$: nivel de ascenso excedido por i porcentaje de las olas incidentes

A, C: coeficientes empíricos

γ_r : factor de reducción por influencia de la superficie rugosa ($\gamma_r=1$ para taludes lisos)

γ_b : factor de reducción por influencia de la berma ($\gamma_b=1$ para perfiles sin berma)

γ_h : factor de reducción por influencia de condiciones de aguas someras ($\gamma_h=1$ para distribución de oleaje tipo Rayleigh)

γ_β : factor de reducción por el ángulo de incidencia del oleaje ($\gamma_\beta=1$ para oleaje con incidencia normal).

En la Tabla 2 se presentan los coeficientes A y C que mejor se ajustan a los valores obtenidos en los ensayos de Van Oorschot y d'Angremond (1968) y Ahrens (1981).

Tabla 2 Coeficientes de mejor ajuste para la ecuación de Battjes

Ru	Rango de I_{rp}	A	C
Ru _{2%}	$I_{rp} < 2.5$	1.6	0.0
	$2.5 < I_{rp} < 9$	-0.2	4.5
Ru _s	$I_{rp} < 2.0$	1.35	0.0
	$2.0 < I_{rp} < 9$	-0.25	3.0

Los valores del factor de reducción por rugosidad γ_r , se presentan en la Tabla 3. Estos valores son válidos para números de Iribarren de $1.0 < I_r < 3.0-4.0$. Cuando los números de Iribarren son mayores a 4.0, el factor de reducción por rugosidad tiende a uno.

Tabla 3 Valores del factor de reducción por rugosidad

Tipo de superficie	γ_r
Asfalto o concreto lisos	1
Revestimiento con bloques	1
Pasto (3 cm de alto)	0.90-1.00
1 capa de roca ($H_s/D=1.5-3.0$)	0.55-0.60
2 o más capas de roca ($H_s/D=1.5-6.0$)	0.5-0.55

De acuerdo con Waal y van der Meer (1992) el efecto de la berma se toma en cuenta modificando la ecuación de Battjes, quedando de la siguiente manera:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_s} = 1.5I_{rp}\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta = 1.5I_{req}\gamma_r\gamma_h\gamma_\beta \quad \text{para } 0.5 < I_{req} \leq 2 \quad (10)$$

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_s} = 3.0\gamma_r\gamma_h\gamma_\beta \quad \text{para } I_{req} > 2$$

Donde:

I_{req} : número de Iribarren en una pendiente equivalente al talud con berma

En la Figura 30 se muestra la definición del ángulo equivalente.

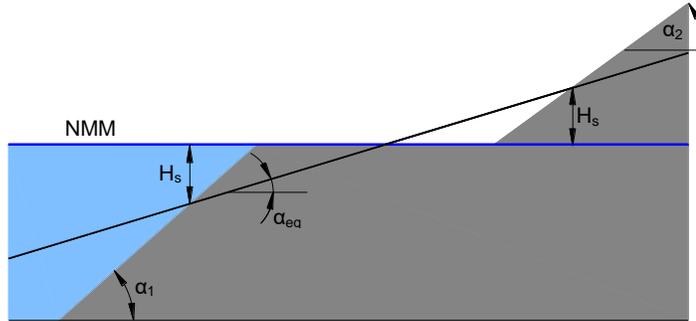


Figura 30 Definición del ángulo equivalente (incluyendo Berma)

El factor de reducción por berma se obtiene:

$$\gamma_b = \frac{I_{req}}{I_{rp}} = 1 - r_B(1 - r_{dB}) \quad 0.6 < \gamma_b < 1.0 \quad (11)$$

Donde:

$$r_B = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \alpha}$$

$$r_{dB} = 0.5 \left(\frac{d_B}{H_s} \right)^2 \quad 0 \leq r_{dB} < 1.0$$

d_B : francobordo de la berma, es decir, la distancia vertical entre la parte más profunda de la berma y el nivel medio del agua

α_{eq} y α : ángulos equivalentes y promedio, respectivamente

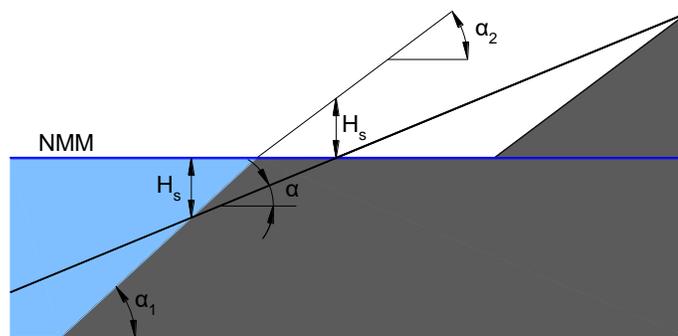


Figura 31 Definición del ángulo medio (excluyendo Berma)

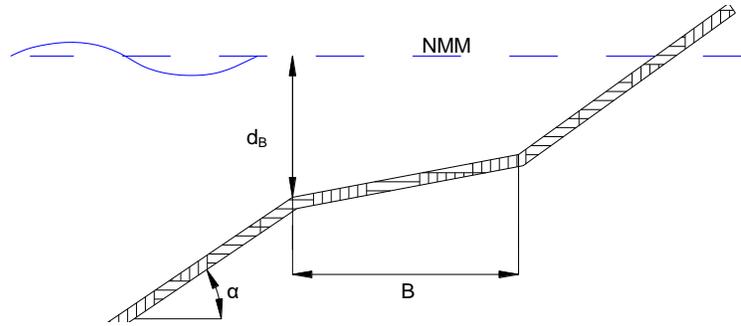


Figura 32 Francobordo de la berma

La influencia de la berma se puede despreciar cuando el francobordo es mayor a $\sqrt{2H_s}$. Si el francobordo es menor, el ascenso máximo se puede aproximar como $Ru_{2\%} = d_B$ siempre que $B/H_s \geq 2.0$, siendo B el ancho de la berma.

Por otro lado, la berma es más eficiente (en términos de reducción del ascenso) cuando coincide con el nivel medio, es decir, $d_s = 0$ y el ancho óptimo de la berma que corresponde con $\gamma_b = 0.6$ puede determinarse con las ecuaciones (10) y (11).

La altura de ola que se utiliza en la ecuación (10) corresponde a una altura de ola significativa con una distribución tipo Rayleigh. En aguas someras donde algunas olas rompen antes de llegar a la estructura, las alturas de ola ya no tendrán una distribución tipo Rayleigh, entonces la influencia de aguas someras de acuerdo con Waal y van der Meer (1992) se puede estimar de la siguiente manera.

$$\gamma_h = \frac{H_{2\%}}{1.4H_s} \quad (12)$$

Donde la altura de ola 2% es un dato que debe medirse a una profundidad similar a la que se desplantará la estructura. De manera general para alturas de ola con distribución Rayleigh $\frac{H_{2\%}}{H_s} = 1.4$.

El ángulo de incidencia y la dirección de la propagación de las olas, afectan el ascenso de las olas sobre el talud. El factor de reducción por el ángulo de incidencia del olaje de acuerdo con los resultados experimentales de Waal y van der Meer (1992) se calcula de la siguiente manera.

Ondas de cresta larga

$$\gamma_\beta = 1.0 \quad \text{para } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \quad (13)$$

$$\gamma_\beta = \cos(\beta - 10^\circ) \quad \text{para } 10^\circ \leq \beta \leq 63^\circ$$

$$\gamma_\beta = 0.6 \quad \text{para } \beta > 63^\circ$$

Ondas de cresta corta

$$\gamma_{\beta} = 1 - 0.0022 \beta$$

Donde:

β : ángulo de incidencia del oleaje

Formulaciones para oleaje irregular sobre taludes permeables

Mediante experimentos van der Meer y Stam (1992) obtuvieron las ecuaciones para la estimación del ascenso máximo.

$$Ru_{i\%} = A I r_m \quad \text{para } 1.0 < I r_m \leq 1.5 \quad (14)$$

$$Ru_{i\%} = B I r_m^C \quad \text{para } 1.5 < I r_m \leq (D/B)^{1/c}$$

$$Ru_{i\%} = D \quad \text{para } (D/B)^{1/c} \leq I r_m < 7.5$$

Donde:

A, B, C y D: son coeficientes

Tabla 4 Coeficientes A, B, C y D para estimar el ascenso en taludes permeables

Porcentaje de excedencia, <i>i</i>	A	B	C	D
0.1	1.12	1.34	0.55	2.58
2	0.96	1.17	0.46	1.97
5	0.86	1.05	0.44	1.68
10	0.77	0.94	0.42	1.45
33	0.72	0.88	0.41	1.35
50	0.47	0.6	0.34	0.82

Estas ecuaciones son aplicables para taludes con permeabilidad $n = 0.5$ y $n = 0.6$, esto de acuerdo con la definición de permeabilidad nominal de van der Meer (1988), y aceptando que el ascenso máximo se puede representar con una distribución de probabilidad Weibull.

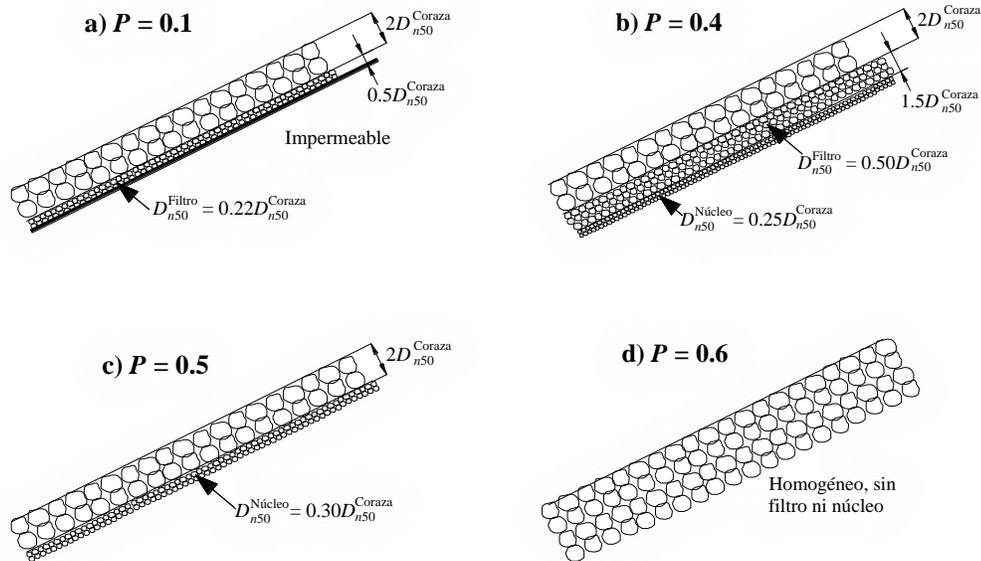


Figura 33 Coeficientes de permeabilidad nominal de acuerdo con van der Meer (1988)

Silva (1998) presentó una metodología para el cálculo del ascenso máximo para cualquier probabilidad de excedencia, la cual, siempre que se acepte que la distribución de probabilidad del ascenso máximo es la misma que la del oleaje, se resume como sigue.

- De acuerdo con las características del talud se elige la expresión de Losada y Giménez-Curto (1980) o la de Ahrens y Heimbaugh (1988) y sus correspondientes coeficientes de ajuste.
- Se calcula el ascenso máximo representativo de las características medias del estado de mar (con la expresión elegida) empleando la altura de ola cuadrática media, H_{rms} y el número de Iribarren cuadrático medio, es decir:

$$I_{r_{rms}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{rms}/L_{0m}}} \quad (15)$$

Donde:

$I_{r_{rms}}$: número de Iribarren cuadrático medio

L_{0m} : Longitud de onda en aguas profundas relativa al período medio

- Finalmente se determina, modificando la distribución de probabilidad del oleaje, el valor del ascenso máximo. (Silva et al. 1998) proponen el uso de la distribución presentada por (Tayfun. 1981).

2.2. Descenso Máximo (Run down)

Es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el nivel mínimo que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometida a flujo oscilatorio (Figura 34).

El descenso máximo permite obtener la máxima distancia debajo del nivel medio del mar, en el cual se deberán colocar las piezas de mayor peso, pues es en esta zona en la que se presentan las velocidades más grandes.

Se tiene interés en este parámetro porque indica la zona con mayor probabilidad de extracción de los elementos de la coraza.

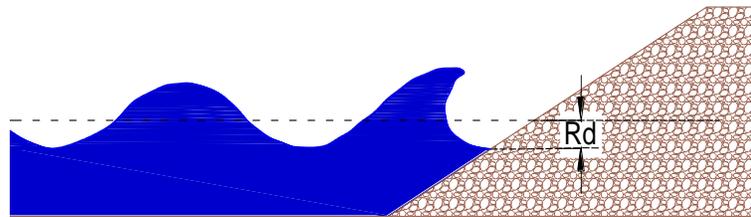


Figura 34 Descenso Máximo (Rd)

2.2.1. Estimación del descenso máximo

Al igual que en el ascenso máximo, el descenso se determina tanto para oleaje regular como para irregular.

Formulación para oleaje regular

De acuerdo con Losada y Giménez-Curto (1980), el ascenso se calcula de la siguiente forma.

$$\frac{R_d}{H} = Ad(-e^{BdIr}) \quad (16)$$

Donde

Ad y Bd : coeficientes de ajuste que dependen del tipo de piezas

Losada y Giménez-Curto (1980) propusieron valores de Ad y Bd en función del material de construcción del talud, estos valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Coeficientes de ajuste Ad y Bd

Tipo de pieza	Ad	Bd
Roca sin clasificar	-1.1	-0.3
Roca clasificada	-0.85	-0.43
Tetrápodos	-0.8	-0.45
Dolos	-0.75	-0.49
Cubos	-0.72	-0.42

En la Figura 35 se muestran los valores de Ad y Bd en función de la porosidad nominal, n , definida por van der Meer (1988).

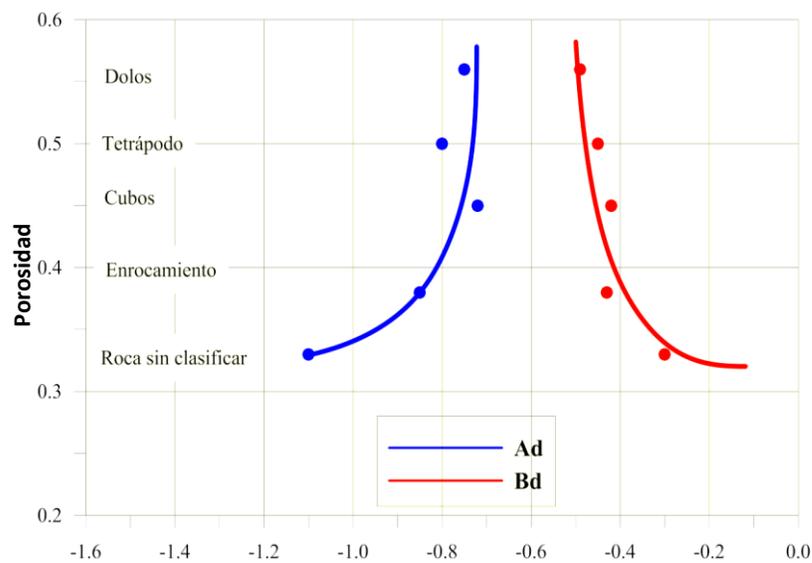


Figura 35 Coeficientes de ajuste para la ecuación de Losada

Formulaciones para oleaje irregular en taludes impermeables

Las expresiones para calcular el descenso máximo son más simples que las del ascenso, pues se dispone de menos información experimental. El descenso máximo para taludes impermeables de acuerdo con Burcharth y Hughes (2002) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{Rd_{2\%}}{H_s} = 0.33Ir_p \quad \text{para } 0 < Ir_p < 4 \quad (17)$$

$$\frac{Rd_{2\%}}{H_s} = 1.5 \quad \text{para } Ir_p > 4$$

Donde:

$Rd_{2\%}$: cota de descenso máximo excedido por el 2% de las olas

Para taludes construidos con bloques de concreto y núcleo impermeable, el descenso máximo se puede calcular como, (Burcharth y Hughes. 2002)

$$\frac{Rd_{2\%}}{H_s} = 0.5I_r - 0.2 \quad (18)$$

Formulaciones para oleaje irregular en taludes permeables

El descenso máximo en taludes permeables depende de la permeabilidad nominal n (Figura 33), esto de acuerdo con van der Meer (1988).

$$\frac{Rd_{2\%}}{H_s} = 2.1\sqrt{\tan\alpha} - 1.2n^{0.15} + 1.5e^{-(60s_{om})} \quad (19)$$

Donde:

$$s_{om} = \frac{2\pi H_s}{gT_m^2}$$

α : ángulo del talud con la horizontal

T_m : periodo medio

2.3. Rebase (Overtopping)

Cuando el ascenso de la ola sobre el talud de la estructura marítima supera la cota de coronación se produce un flujo de agua en forma de lámina y si este flujo se puede cuantificar, entonces se dice que el oleaje rebasa la estructura. En la Figura 36 se ilustra el fenómeno del rebase.

El rebase se debe a una altura de coronación inferior al ascenso del oleaje. Se presenta de forma intermitente ante la acción de algunas olas individuales de determinada altura y generalmente durante la acción de una tormenta.

Los problemas que el rebase provoca son:

- Daños físicos a personas que transiten en la zona abrigada
- Daño por sobrecarga, inundación o arrastre de edificios, vehículos, equipos, etc.

- Daño económico por la afectación a la operatividad de las instalaciones abrigadas
- Provocar transmisiones de oleaje indeseadas
- Averías en las superestructuras o estructuras de coronación.

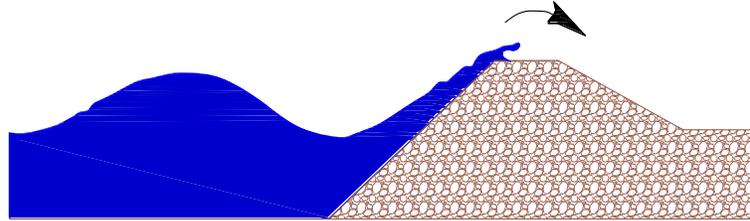


Figura 36 Rebase

Los criterios de diseño por rebase deben incluir dos escenarios:

- El rebase durante condiciones normales de operación
- El rebase durante eventos extremos

El rebase generalmente se reporta como un gasto promediado en el tiempo y por metro de estructura, dado que su valor cambia ola a ola. En condiciones de tormenta sólo unas cuantas olas pueden rebasar la estructura y es posible que el rebase se presente en algunas zonas de su longitud.

En el caso de rebase durante eventos extremos se tiene que definir el nivel de daño admisible en las superestructuras. La magnitud admisible del rebase depende de los usos de la estructura.

Se han realizado diversos estudios para determinar los límites de rebase admisibles. En la Figura 37 se presentan los valores críticos del gasto medio de rebase y su peligrosidad asociada. Es importante mencionar que las condiciones generadas en una tormenta y la geometría de las estructuras pueden hacer que los valores mostrados en la Figura 37 sean solamente aproximaciones.

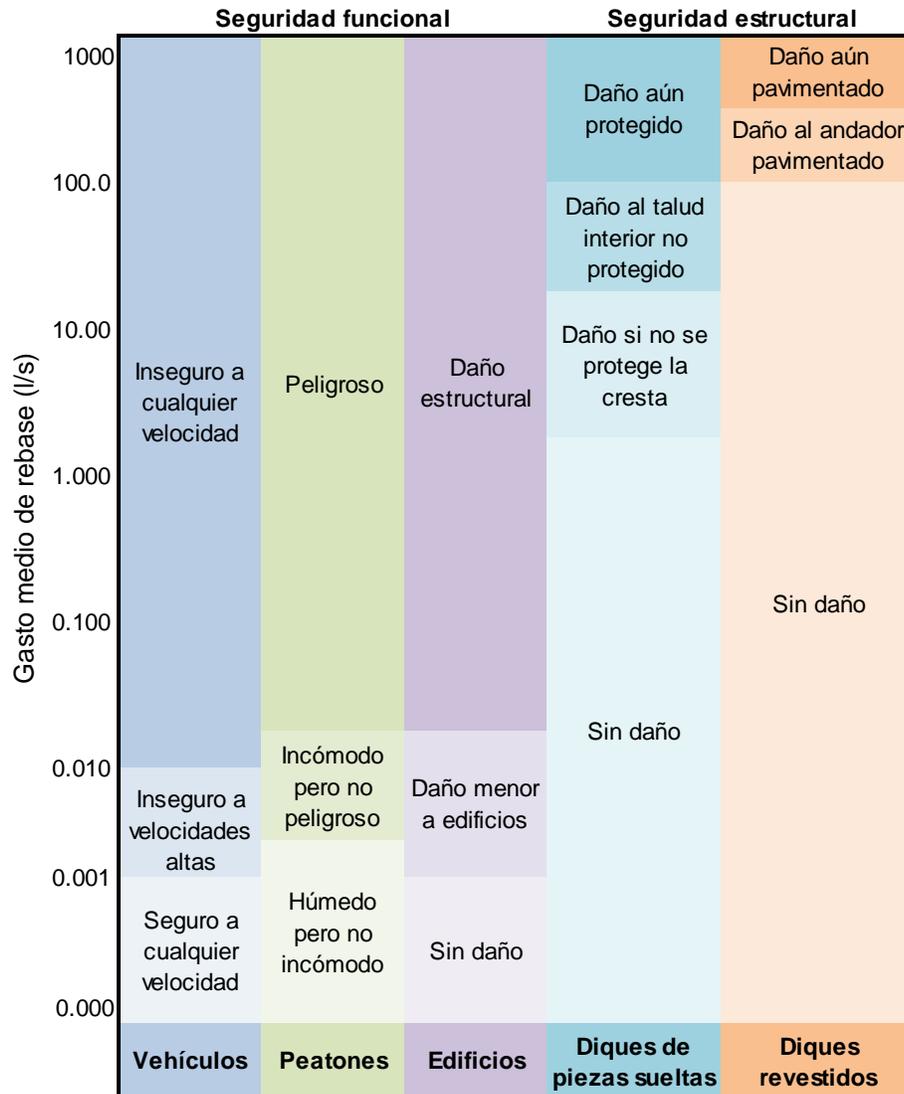


Figura 37 Valores críticos del gasto medio de rebase en l/s

El rebase depende de la geometría de la estructura, como se mencionó. En la Figura 38 se definen los parámetros geométricos que puede tener cada tipo de perfil transversal y a continuación se muestra la simbología.

- Rc francobordo o bordo libre
- h profundidad a pie de dique
- α ángulo del talud expuesto al oleaje
- hB profundidad de la berma
- B ancho de la berma
- Ac altura de coronación

G ancho de la corona

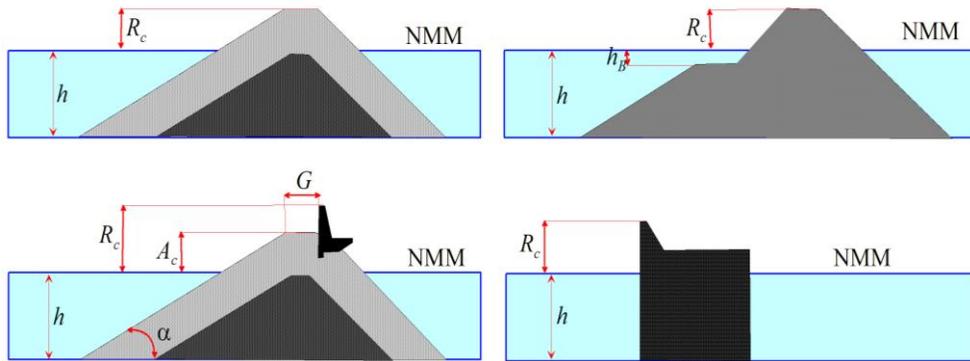


Figura 38 Parámetros de perfiles transversales involucrados en el rebase

2.3.1. Estimación del rebase

Las ecuaciones principales para estimar el gasto medio de rebase son:

$$Q = ae^{-(bR)} \quad (20)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (21)$$

Donde:

Q: gasto medio de rebase por metro de estructura, adimensional

R: libre bordo o francobordo, adimensional

a y b: coeficientes de ajuste

En la Tabla 6 se presentan las formulaciones recientes para el cálculo del rebase.

El procedimiento de cálculo de las expresiones es el siguiente:

- Evaluar el francobordo adimensional
- Determinar el valor del gasto adimensional con el franco bordo adimensional
- Despejar el gasto medio de rebase, q

Tabla 6 Modelos para la estimación del gasto medio de rebase

Autores	Estructuras ensayadas	Modelo de rebase	Gasto adimensional	Francobordo adimensional
Owen. (1980); Owen (1982)	Impermeables, lisas, rugosas, taludes rectos y con berma	$Q = ae^{-(bR)}$	$Q = \frac{q}{gH_s T_m}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{1}{\gamma_r}$
Bradbury y Allsop (1988)	Taludes impermeables de roca con superestructuras	$Q = aR^{-b}$	$Q = \frac{q}{gH_s T_m}$	$R = \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Aminti y Franco (1988)	Taludes impermeables de roca, cubos, y tetrápodos con superestructuras	$Q = aR^{-b}$	$Q = \frac{q}{gH_s T_m}$	$R = \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5}$
Pedersen y Burcharth (1992)	Taludes impermeables de roca con superestructuras	$Q = aR^{-b}$	$Q = \frac{qT_m}{L_m^2}$	$R = \frac{H_s}{R_c}$
van der Meer y Janssen (1995)	Taludes impermeables, lisos, rectos y con berma	$Q = ae^{-(bR)}$	Para $\xi_p < 2$	
			$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}$
			Para $\xi_p > 2$	
			$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}$
Franco et al (1994) y (Franco y Franco (1999)	Rompeolas vertical con y sin perforaciones en el frente	$Q = ae^{-(bR)}$	$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_\beta \gamma_s}$
Pedersen (1996)	Taludes permeables de roca con superestructura	$Q = R$	$Q = \frac{qT_m}{L_m^2}$	$R = 3.2 \times 10^{-5} \frac{H_s^5 \tan \alpha}{R_c^3 A_c B}$

Los coeficientes a y b de las ecuaciones 20 y 21 son específicos para cada geometría. A continuación se presentan los valores de dichos coeficientes para las formulaciones que se enlistan en la Tabla 6.

- Owen (1980; Owen (1982): Sus expresiones se derivan de experimentos con oleaje irregular en taludes impermeables rectos y con berma. La Tabla 7

presenta los valores de los coeficientes de ajuste para taludes rectos, lisos y olas no limitadas por fondo al frente de la estructura.

Tabla 7 Coeficientes de ajuste para Owen

Pendiente	a	b
1:1	0.008	20
1:1.5	0.010	20
1:2	0.013	22
1:3	0.016	32
1:4	0.019	47

La Tabla 8 muestra los valores del factor de reducción por rugosidad γ_r .

Tabla 8 Factor de reducción por rugosidad γ_r para Owen

Tipo de superficie	γ_r
Liso impermeable	1
Una capa de roca sobre base impermeable	0.8
Grava y gaviones	0.7
Capa de roca todo uno de ancho mayor al doble del D_{50}	0.5-0.6

En la Tabla 9 se presentan las características de los taludes con berma ensayados y los factores de ajuste para cada uno.

Tabla 9 Coeficientes a y b para taludes con berma (Owen)

Pendiente	$h_B(m)^1$	$B(m)^2$	$a \times 10^4$	b
01:01	-4	10	64	20
01:02			91	22
01:04			145	41
01:01	-2	5	34	17
01:02			98	24
01:04			159	47
01:01	-2	10	48	19
01:02			68	24
01:04			86	46
01:01	-2	20	8.8	15
01:02			20	25
01:04			85	50
01:01	-2	40	3.8	23
01:02			5	26
01:04			47	51
01:01	-1	5	155	33
01:02			190	37
01:04			500	70
01:01	-1	10	93	39
01:02			340	53
01:04			300	80
01:01	-1	20	75	46
01:02			34	50
01:04			39	62
01:01	-1	40	12	49
01:02			24	56
01:04			1.5	63
01:01	0	10	97	42
01:02			290	57
01:04			300	80
1 h_B es la profundidad de la berma				
2 B es el ancho de la berma				

- Aminti y Franco (1988) para la ecuación de Bradbury y Allsop (1988). Extendieron la aplicación a taludes contruidos de roca, cubos y tetrápodos sobre núcleo prácticamente impermeable. El oleaje es irregular, no limitado por fondo y su espectro de energía es tipo JONSWAP. En la Tabla 10 se presentan los resultados.

Tabla 10 Extensión de coeficientes de ajuste para Bradbury y Allsop

Material	cot α	G/H _s	a×10 ⁸	b
Roca	2	1.1	17	2.41
		1.85	19	2.3
		2.6	2.3	2.68
	1.33	1.1	5	3.1
		1.85	6.8	2.65
		2.6	3.1	2.69
Cubos	2	1.1	8.3	2.64
		1.85	15	2.43
		2.6	84	2.38
	1.33	1.1	62	2.2
		1.85	17	2.42
		2.6	1.9	2.82
Tetrápodos	2	1.1	1.9	3.08
		1.85	1.3	3.8
		2.6	1.1	2.88
	1.33	1.1	5.6	2.81
		1.85	1.7	3.02
		2.6	0.92	2.98

- Bradbury y Allsop (1988) trabajaron con oleaje irregular en taludes de roca con una superestructura vertical. Su pendiente única es 1:2 y colocaron un filtro impermeable a diferentes profundidades. El ancho de la berma al frente de la superestructura es de tres o seis diámetros de la roca de la coraza principal. En la Tabla 11 se muestran las características geométricas ensayadas.

Tabla 11 Geometrías y coeficientes de ajuste para Bradbury y Allsop

Sección	G/H _s	G/R _c	A _c /R _c	a×10 ⁹	b
a	0.79-1.7	0.75	0.28	6.7	3.5
		0.58	0.21	3.6	4.4
		1.07	0.39	5.3	3.5
		0.88	0.32	1.8	3.6
b	1.6-3.3	2.14	0.39	1	2.8
c	0.79-1.7	1.07	0.71	1.6	3.2
d	0.79-1.7	1.07	1	0.37	2.9
e	0.79-1.7	0.83	1	1.3	3.8

- van der Meer y Janssen (1995). Los coeficientes se obtuvieron a partir de ensayos con taludes rectos y con berma. En los ensayos se consideró la influencia de la rugosidad, el ángulo de incidencia y la poca profundidad al pie de la estructura.

$$I_{r_p} < 2; \quad a = 0.06, \quad b = 5.2 \text{ con } 0.3 < \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_{om}}}{\tan \alpha \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} < 2 \quad (22)$$

$$I_{r_p} > 2; \quad a = 0.2, \quad b = 2.6$$

Los factores de reducción por rugosidad, γ_r , existencia de una berma γ_b , y aguas someras γ_h , se calculan como se indica en la Tabla 3, las ecuaciones 11 y 12, respectivamente. El factor de reducción por incidencia oblicua γ_β , queda de la siguiente manera.

Para ondas de cresta larga

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{para } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ \cos(\beta - 10^\circ) & \text{para } 10^\circ \leq \beta \leq 50^\circ \\ 0.6 & \text{para } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \end{cases} \quad (23)$$

Para ondas de cresta corta

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0033\beta$$

Donde:

β : ángulo de incidencia del oleaje

El valor mínimo de cualquier combinación de factores γ es de 0.5.

- Pedersen y Burcharth (1992). Estos autores trabajaron con oleaje irregular sobre taludes permeables de roca y una superestructura con berma al frente.

$$a = 1 \quad \text{y} \quad b = 1 \quad (24)$$

Por lo tanto $Q = R$

- Franco y Franco (1999). Sus fórmulas están basadas en experimentos con muros verticales permeables e impermeables y los coeficientes de ajuste son:

$$a = 0.082 \quad \text{y} \quad b = 3.0 \quad (25)$$

El oleaje considerado no rompe, e incide oblicuamente, se consideran ondas de cresta larga y corta. El factor de reducción por incidencia oblicua γ_β , se estima de la siguiente manera:

Ondas de cresta larga

$$\gamma_\beta = \cos\beta \quad \text{para} \quad 0^\circ \leq \beta \leq 37^\circ \quad (26)$$

$$\gamma_\beta = 0.79 \quad \text{para} \quad \beta > 37^\circ$$

Ondas de cresta corta

$$\gamma_\beta = 0.83 \quad \text{para} \quad 0^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$$

$$\gamma_\beta = 0.83\cos(20^\circ - \beta) \quad \text{para} \quad \beta > 20^\circ$$

La influencia de la permeabilidad del muro vertical se toma en cuenta incluyendo del factor de reducción γ_s , en la Tabla 12 se presentan los valores.

Tabla 12 Valores del factor de reducción γ_s por permeabilidad del muro vertical

Geometría frontal	γ_s
Muro plano impermeable	1.00
Muro plano impermeable con nariz	0.78
Muro perforado (20% en área)	0.72 – 0.79
Muro perforado (20% en área) abierto en la parte superior	0.58

2.4. Transmisión

Cuando un oleaje incide en la estructura sin romper, entonces una parte de la energía del oleaje es reflejada y la otra es transmitida a través de la estructura. En la Figura 39 se ilustra el fenómeno de la transmisión.

La transmisión se representa a través de un coeficiente adimensional que expresa la relación entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente o bien como la raíz cuadrada de la relación entre las energías transmitida e incidente (E_t y E_i) promediadas en el tiempo.

$$C_t = \frac{H_{st}}{H_s} = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^{1/2} \quad (27)$$

La transmisión del oleaje hacia la zona abrigada de una estructura se produce por:

- Rebase sobre la coronación. Se da cuando la estructura está sometida a un rebase importante, o bien, si está sumergida. Cuando la energía transmitida a través del núcleo de la estructura es superada por la que se transmite sobre la coronación, no se suele tomar en cuenta la energía que se transmite a través del núcleo.
- Transmisión a través del macizo poroso. Se produce cuando el núcleo de la estructura es permeable. El grado de permeabilidad de la estructura depende de la porosidad de la misma y de las características del flujo, es decir, de las características espectrales del mismo.
- Transmisión por los extremos de la estructura. Se produce como efecto de la difracción.

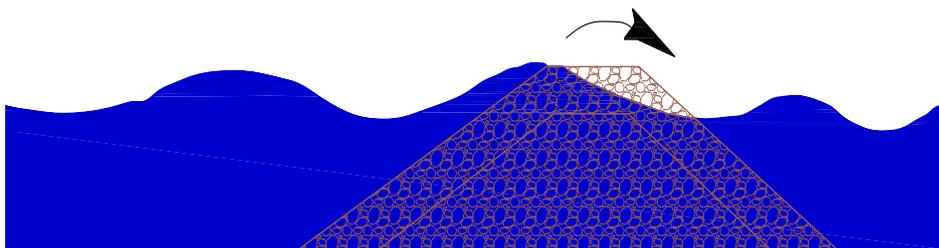


Figura 39 Transmisión

2.4.1. Estimación de la transmisión

Los coeficientes de transmisión reportados en la literatura son obtenidos en laboratorio, la mayoría en pequeña escala, por lo que al utilizarlos se debe de considerar la distorsión de dichos valores por efectos de escala.

El coeficiente no alcanza la unidad, aun cuando las estructuras son relativamente bajas y tampoco llega a ser nulo en estructuras con coronas considerablemente por arriba del nivel medio del mar.

Transmisión en diques no rebasables

- Numata (1976) para estimar el coeficiente de transmisión a través de diques no rebasables propuso la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{1}{1 + \frac{\alpha^*_T}{I_r}} \quad (28)$$

Donde:

$$\alpha^*_T = 1.48 \left(\frac{B_s}{D} \right)^{0.66}$$

B_s : anchura del dique al nivel medio del mar

D : diámetro característico de las piezas de la coraza

Transmisión en diques con rebase

El francobordo es la variable que define la magnitud de la transmisión en este tipo de estructuras.

- Numata (1976) presenta la siguiente expresión

$$C_t = \frac{1}{\left[1 + \alpha_T \left(\frac{H}{L} \right)^{\beta_T} \right]^2} \quad \frac{h}{L} < 0.25 \quad (29)$$

Donde:

h : profundidad a pie del dique

H : altura de ola

L : longitud de onda en la profundidad h

α_T y β_T : coeficientes de ajuste

Tabla 13 Coeficientes empíricos de la ecuación de Numata (1976)

Material	α_T	β_T
Rocas clasificada	$1.260 \left(\frac{B_s}{D}\right)^{0.670}$	$\frac{1}{2}$
Tetrápodos	$1.184 \left(\frac{B_s}{D}\right)^{0.895}$	$\frac{1}{2}$

- Seeling (1980) obtuvo la siguiente expresión experimentalmente

$$C_t = C \left(1 - \frac{R_c}{R_u}\right) \quad (30)$$

Donde:

R_c : francobordo o bordo libre

R_u : ascenso máximo teórico

$$C = 0.51 - 0.11(B/l)$$

l : altura total de la estructura

- van der Meer (1990) realizó un análisis de los resultados obtenidos por Seeling (1980), Powell y Allsop (1985), Daemrich y Kahle (1985), Ahrens (1987) y van der Meer (1988). A partir de ese análisis obtuvo las expresiones que se muestran a continuación.

$$C_t = 0.8 \quad -2 < \frac{R_c}{H_s} < -1.13 \quad (31)$$

$$C_t = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_s} \quad -1.13 < \frac{R_c}{H_s} < 1.2$$

$$C_t = 0.10 \quad 1.2 < \frac{R_c}{H_s} < 2$$

- Daemen (1991), supuso que la dispersión presentada en las ecuaciones de van der Meer (1990) se debe a la permeabilidad de la coraza principal. Por lo que modificó la ecuación para la corrección.

$$c_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (32)$$

Donde:

$$a = 0.031 \frac{H_s}{D_{n50}} - 0.24$$

$$b = -5.42S_{op} + 0.0323 \frac{H_s}{D_{n50}} - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{n50}} \right)^{1.84} + 0.51$$

Daemen (1991), la formulación propuesta tiene los límites siguientes.

$$C_{t\max} = 0.75, C_{t\min} = 0.075, 1 < \frac{H_s}{D_{n50}} < 6 \text{ y } 0.001 < S_{op} < 0.05 \quad (33)$$

- d'Angremond et al (1996) propusieron las siguientes expresiones.

Para $0.075 < C_t < 0.08$ y dique permeable:

$$C_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + 0.64 \left(\frac{B_s}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.51r}) \quad (34)$$

Para $0.075 < C_t < 0.08$ para dique impermeable

$$C_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + 0.80 \left(\frac{B_s}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.51r}) \quad (35)$$

- Briganti et al (2003) Mejoraron las estimaciones del coeficiente de transmisión a partir de la expresión de d'Angremond et al (1996).

Para diques permeables de cresta larga, $\frac{B_s}{H_s} > 10$.

$$C_t = -0.35 \frac{R_c}{H_s} + 0.51 \left(\frac{B_s}{H_s} \right)^{-0.65} (1 - e^{-0.411r}) \quad (36)$$

Para los demás diques se utilizan las ecuaciones 34 y 35.

- van der Meer et al (2004). Consideró que la influencia de la oblicuidad del oleaje incidente en estructuras permeables es despreciable.

Para diques impermeables

$$C_t = \left[-0.3 \frac{R_c}{H_s} + 0.75(1 - e^{-0.411r}) \right] (\cos\beta)^{2/3} \quad (37)$$

2.5. Reflexión

Cuando determinado oleaje es interceptado por una estructura artificial, la energía es parcialmente disipada, y la que no es disipada se convierte en un nuevo oleaje que se propaga hacia el mar, a éste fenómeno se le denomina reflexión.

La interacción entre las olas incidente y reflejada pueden crear un oleaje difuso con ondas muy peraltadas que romperán fácilmente, cuando la reflexión es importante.

En general, la energía del oleaje incidente se disipa por rotura, por la fricción con la superficie de los diques y por flujo dentro de la estructura; parte de la energía se transmite a la zona protegida por rebase y penetración y el resto se refleja de nuevo hacia el mar. Esto se representa de la siguiente manera.

$$E_i = E_d + E_t + E_r \quad (38)$$

Donde:

E_i : energía incidente

E_d : energía disipada

E_t : energía transmitida

E_r : energía reflejada

2.5.1. Estimación de la reflexión

La reflexión es medida con coeficiente adimensional que expresa la relación entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente. Este coeficiente varía desde 1.0 a 0.

$$C_r = \frac{H_{sr}}{H_s} = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^{1/2} \quad (39)$$

Donde

H_s : altura de ola significativa de la onda incidente

H_{sr} : altura de ola significativa de la onda reflejada

Lo deseable es que las estructuras tengan coeficientes de reflexión reducidos, debido a que las olas reflejadas incrementan la energía del oleaje, lo que obliga a que se incremente la cota de coronación de la estructura.

Reflexión en diques verticales porosos

Numata (1976) propuso lo siguiente:

$$C_r = \alpha_r \left(\frac{B}{D} \right)^{\beta_r} \quad \text{para} \quad \frac{H}{L} > 0.01 \quad (40)$$

Donde

α_r y β_r : coeficientes de ajuste

Tabla 14 Coeficientes empíricos para la formulación de Numata (1976)

Material	B/D	h/L	α_R	β_R
Roca sin clasificar	<8	≤0.15	0.35	0.17(h/L)
		≥0.15	0.35	0.69(h/L) ^{-0.2}
	>8	≤0.15	1.19(h/L)	0.12
		≥0.15	0.38(h/L) ^{-0.1}	0.12
Tetrápodos	<5	<0.15	0.35	0.6(h/L) ^{-0.49}
	>5	>0.15	0.35	0.04(h/L) ^{-1.1}

Reflexión en diques permeables no rebasables

Seeling y Ahrens (1981). Estimaron el coeficiente de reflexión como una función del número de Iribarren.

$$C_r = \frac{aI r^2}{I r^2 + b} \quad (41)$$

Para taludes lisos:

$$a = 1.0$$

$$b = 5.5$$

Con núcleo impermeable el coeficiente a se modifica de la siguiente manera:

Para una sola capa de roca, el valor se obtiene de la Figura 40.

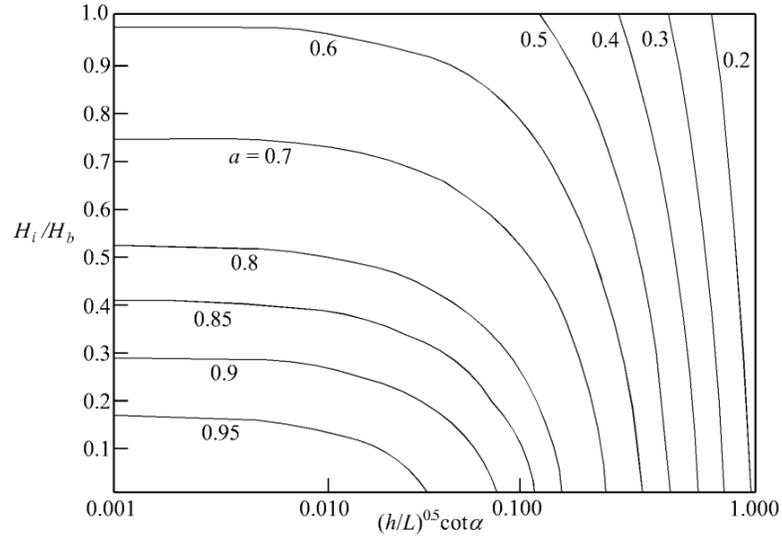


Figura 40 Valores de a para una capa de roca (Seeling y Ahrens, 1981)

Para dos o más capas, el valor de a se toma de la Tabla 15.

Tabla 15 Valores de a para dos o más capas de recubrimiento

d/H_i	Número de capas en el recubrimiento		
	Dos	Tres	Cuatro
< 0.75	0.93	0.88	0.78
0.75 a 2.0	0.71	0.70	0.69
> 2.0	0.58	0.52	0.49

Para diques permeables Seeling y Ahrens (1981) propusieron:

$$a = 0.6$$

$$b = 6.6$$

Allsop (1990). Extendió el uso de la expresión de Seeling y Ahrens (1981) para oleaje irregular, siempre y cuando el número de Iribarren se calcule de la siguiente manera.

$$Ir = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{0m}}}} \tag{42}$$

Donde:

L_{0m} : longitud de onda asociada al período medio

Los valores de a y b para oleaje irregular de acuerdo con la modificación de Allsop (1990) se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16 Valores de a y b (Allsop, 1990)

Tipo de manto principal	a	b
Liso	0.96	4.80
Roca (2 capas)	0.64	8.85
Roca (1 capa)	0.64	7.22
Grandes rocas (2 capas)	0.64	9.64
Grandes rocas (1 capa)	0.67	7.87

Zanuttigh y van der Meer (2008). Propusieron la siguiente expresión.

$$C_r = \tanh(ar^b) \quad (43)$$

Donde:

$$a = 0.167(1 - \exp(-3.2\gamma_f))$$

$$b = 1.49(\gamma_f - 0.38)^2 + 0.86$$

γ_f : factor de rugosidad.

Los valores del factor de rugosidad se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17 Valores del coeficiente de rugosidad (Zanuttigh y van der Meer, 2008)

Material	γ_f
Roca permeable	0.40
Roca impermeable	0.55
Liso	1.00

Para el caso de elementos prefabricados, Zanuttigh y van der Meer (2008) consideran $b = 0.87$ y el valor de a y γ_f se obtienen de la Tabla 18.

Tabla 18 Valores del a y γ_f para elementos prefabricados (Zanuttigh y van der Meer, 2008)

Elemento	a	γ_f
Tetrápodos (2 capas)	0.38	0.102
Core-Loc (1 capa)	0.44	0.113
Xbloc (1 capa)	0.45	0.112
Acrópodos (1 capa)	0.46	0.115
Antifer (2 capas)	0.47	0.115
Cubos (2 capas)	0.47	0.108
Cubos (1 capa)	0.50	0.120

Reflexión en diques rebasables y sumergidos

En estos diques se hace la suposición de que el coeficiente de reflexión depende del francobordo y del peralte del oleaje, pues la reflexión en estas estructuras no ha sido tan estudiada.

Zanuttigh y van der Meer (2008). Para estructuras porosas y permeables el coeficiente de reflexión se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_r = F_t \tanh(alr^b) \quad \text{para} \quad -1 \leq R_c/H_{st} \leq 0.5 \quad (44)$$

Donde:

$$F_t = 0.67 + 0.37 \frac{R_c}{H_{st}}$$

Rc: libre bordo

Hst: altura de ola significativa a pie de dique

3. Diseño Mecánico

Una vez que se define el tipo de estructura que se requiere, se procede a determinar las cargas a las cuales estará sometida dicha estructura. Por lo que a continuación se presenta la clasificación de esfuerzos, los tipos de fallas que pueden llegar a ocasionar; así como los conceptos de estabilidad y avería.

3.1. Clasificación de Esfuerzos

Para el diseño de una estructura marítima es importante determinar las cargas a las que va a estar sometida. Por lo que a continuación se muestra una clasificación de dichas cargas.

- a) Cargas exteriores. Aplicadas sobre el frente expuesto del dique. Estas cargas son la hidrostáticas (la estructura está sumergida en el agua) y dinámicas (debidas a la acción del oleaje), y un empuje activo del talud cuando la estructura está protegida por un talud de bloques.
- b) Cargas interiores. Aplicadas en la cara protegida del dique. Estas cargas son la hidrostática, las dinámicas debidas al oleaje y el empuje activo de tierras, si es que el dique tiene algún relleno en la parte posterior.
- c) Subpresiones. Cargas aplicadas en la base del cajón.
- d) Peso.
- e) Posibles cargas de uso (viento, acciones de embarcaciones atracando, tráfico sobre el dique y grúas).

3.2. Tipos de fallas

Cuando las cargas a las que está sometida una estructura superan su capacidad resistente, entonces se producen pueden producir las siguientes fallas:

- Fallas de explotación. Son aquellas que cesan el cumplimiento de las funciones para las cuales se diseñó la estructura, y el cese puede ser permanente u ocasional. La falla funcional más conocida es el rebase.
- Fallas estructurales. Son aquellas que producen que la geometría original de la estructura se pierda. Las fallas estructurales comunes en diques verticales son el deslizamiento, asentamientos diferenciales y erosión de la banqueta de apoyo.

3.3. Criterios de Estabilidad

Las estructuras marítimas se diseñan para que tengan una falla dúctil, es decir, que fallen ante la acción de varias olas, y para que eventualmente puedan ser reparadas después de que pase la tormenta que la provocó.

Las fallas anteriormente descritas generan una serie de averías, las cuales a su vez afectan la estabilidad de las estructuras marítimas. La estabilidad de estas estructuras es de dos tipos:

- a) Estabilidad estructural: Capacidad de las piezas para resistir sin romperse, las tensiones producidas por la colocación, los desplazamientos y movimientos generados por la acción del flujo. En el caso de piezas monolíticas, la rotura es parcial, generalmente en las esquinas y en los bordes, modificándose el peso y con ello el comportamiento de la estructura.
- b) Estabilidad hidrodinámica. Capacidad de las piezas al movimiento producido por la acción del flujo, suponiendo que no se rompen. Estos movimientos son giros sobre sus ejes y deslizamiento desde su posición a otra nueva.

En obras marítimas con superestructura los movimientos que se pueden presentar son el deslizamiento y vuelco, cuando la cimentación queda inalterada. Por lo que la estabilidad de estas subestructuras se determina considerando las cargas máximas instantáneas actuantes sobre las mismas como constantes en el tiempo, para poder compararlas con las que ofrecen la estabilidad. A partir de esta comparación se definen los coeficientes de seguridad para el deslizamiento y el vuelco de la siguiente manera:

$$C_{SD} = \frac{\mu(Peso - Subpresiones)}{\Sigma Fuerzas Horizontales} \quad (45)$$

$$C_{SV} = \frac{M_{Peso} - M_{Subpresiones}}{\Sigma Fuerzas Horizontales} \quad (46)$$

Donde:

CSD: Coeficiente de seguridad para deslizamiento

CSV: Coeficiente de seguridad para vuelco

μ : coeficiente de fricción entre el cajón y la banqueta de cimentación, que para fines prácticos toma el valor de 0.6

Los coeficientes de seguridad por deslizamiento y vuelco deben de ser mayores a 1.2 y 1.4, respectivamente, como regla general.

3.4. Criterios de Avería

Las estructuras se diseñan para que presenten cierto daño sin que dejen de cumplir sus funciones. El grado de daño de una estructura se define mediante la determinación de la avería como un porcentaje de elementos desplazados respecto del total en determinada área (Günbak, 1978).

Losada y Desiré (1985) definieron criterios globales de daño, que se pueden distinguir mediante inspección visual. Vidal et al (1991) complementaron el trabajo de Losada y Desiré, y los niveles de daño de una estructura de piezas sueltas se definen de la siguiente manera:

- Inicio de avería (IA). Es el primer grado de daño que alcanza una estructura. Se alcanza cuando un determinado número de piezas de la coraza son llevadas a una posición alejada a más de un diámetro de su posición original. En la coraza se observan huecos de gran tamaño.
- Avería de Iribarren (AI). En este nivel, los huecos son lo suficientemente grandes para que el oleaje comience a actuar sobre la capa interior de la coraza. Sin embargo, todavía no se aprecia movimientos de las piezas.
- Inicio de destrucción (ID). Se define como el inicio de avería de la capa interior de la coraza principal, por lo que se pueden observar huecos en esta capa y se dejan descubiertas piezas de la capa secundaria.
- Destrucción (D). El nivel de destrucción se alcanza cuando alguna pieza de la capa secundaria es extraída. Si las condiciones de oleaje se mantienen, el daño avanza rápidamente y la estructura deja de cumplir sus funciones en poco tiempo.

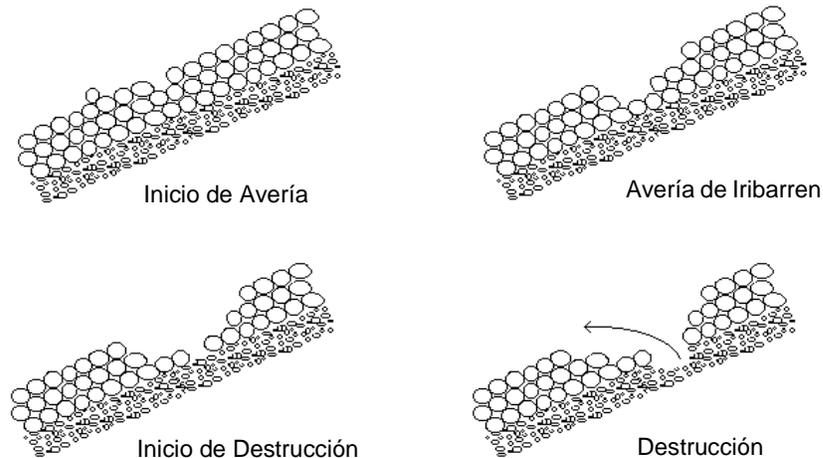


Figura 41 Niveles de avería para una estructura de tres capas

Otra forma de medir el daño es a través de parámetros objetivos, por ejemplo, midiendo la sección dañada o contando las piezas extraídas. Estos criterios se relacionan con métodos visuales de la siguiente manera.

$$S = \frac{A_d}{D_{n50}^2} \quad (47)$$

Donde:

S: parámetro de daño

A_d: área erosionada

$$D_{n50} = \left(\frac{W_{50}}{\gamma_s} \right)^{1/3}$$

W₅₀: peso correspondiente al tamaño 50%, en peso, de la curva granulométrica de las piezas del manto

γ_s: peso volumétrico de las piezas del manto

En la Tabla 19 se muestra la relación entre las dos formas de medir el daño.

Tabla 19 Valores del parámetro S para los diferentes niveles de avería

Nivel de daño, S				
cot α	IA	AI	ID	D
1.5	1.5	2.5	6.5	12
2.0	2.0	3.0	8.0	14
3.0	2.5	3.5	9.5	16
4.0	3.0	4.0	11.0	18
5.0	3.0	4.0	11.0	18

3.5. Diseño de Estructuras en talud

Las estructuras marítimas a talud están formadas generalmente por un núcleo de materiales finos y varias capas de materiales gruesos, que van aumentando su tamaño desde el núcleo hasta la capa exterior (coraza), como se puede apreciar en la Figura 42.

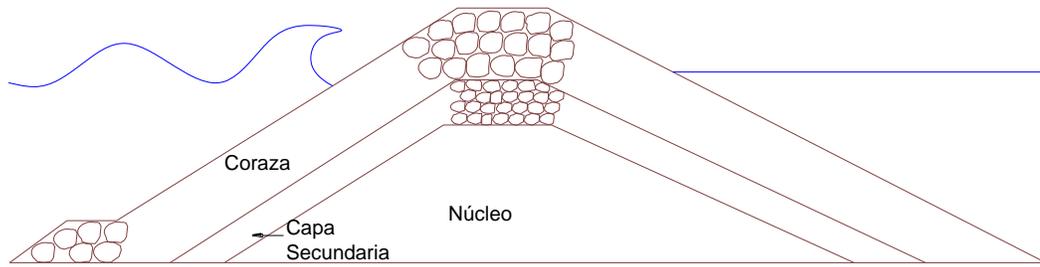


Figura 42 Estructura marítima a talud

La coraza puede construirse con roca (Figura 43) o bien con piezas artificiales de concreto (Figura 44).



Figura 43 Roca



Figura 44 Piezas artificiales

Existen diversas formulaciones para el diseño de estructuras en talud entre ellas están las que a continuación se mencionan.

Hudson (1959).

Para calcular el peso de las piezas de la coraza se utiliza la siguiente formulación.

$$W_{50} = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (48)$$

Donde:

W_{50} : peso de las piezas del manto principal correspondiente a 50% en peso de la curva granulométrica

K_D : coeficiente de estabilidad

γ_s : peso volumétrico del material del manto

$$S_r = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}$$

γ_w : peso volumétrico del agua marina, kg/m^3

En la Tabla 20 se muestran los valores del coeficiente de estabilidad que corresponde a daño nulo, definido como el nivel de daño en el cual el 5% o menos de los elementos de la coraza han sido desplazados de su sitio.

Es importante mencionar que los ensayos de esta formulación se hicieron solamente para oleaje regular y no considera el periodo ni la duración de la tormenta, además de que considera únicamente estructuras no rebasables con núcleo impermeable.

Tabla 20 Valores del parámetro S para los diferentes niveles de avería

Tipo de elemento	No. de elementos de la coraza	Colocación	Cuerpo		Morro		cot α
			Rompe delante de la estructura		Rompe sobre el talud		
			sí	no	sí	no	
Elementos naturales							
Lisa redondeada	2	Aleatoria	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3
Lisa redondeada	>3	Aleatoria	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	1	Aleatoria	N/D	2.9	N/D	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Aleatoria	2	4	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2
					1.3	2.3	3
Rugosa y angular	>3	Aleatoria	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Especial	5.8	7	5.3	6.4	1.5 a 3
Paralelepípedo	2	Especial	7 a 20	8.5 a 24	N/D	N/D	1 a 3
Elementos artificiales							
Tetrápodos	2	Aleatoria	7	8	5	6	1.5
y					4.5	5.5	2
cuadrípodos					3.5	4	3
Tribar	2	Aleatoria	9	10	8.3	9	1.5
					7.8	8.5	2
					6	6.5	3
Dolos	2	Aleatoria	15	31	8	16	2
					7	14	3
Cubos modificados	2	Aleatoria	6.5	7.5	N/D	5	1.5 a 3
Hexápodos	2	Aleatoria	8	9.5	5	7	1.5 a 3
Toskana	2	Aleatoria	11	22	N/D	N/D	1.5 a 3
Tribar	1	Uniforme	12	15	7.5	9.5	1.5 a 3

Losada y Giménez-Curto (1982).

Mediante datos experimentales obtenidos por otros autores con oleaje regular, demostraron que la influencia de la densidad de las piezas de la coraza en la estabilidad de la estructura queda bien representada, cuando $S_r > 2$, si se combina la función de peso adimensional con la densidad relativa de las pieza.

$$W_{50} = \psi \gamma_w H^3 R_r \quad (49)$$

$$R_r = \frac{S_r}{(S_r - 1)^3} \quad (50)$$

El valor ψ se relaciona con el número de estabilidad o de Hudson, N_s , como se muestra a continuación.

$$\psi = \frac{1}{N_s^3} \quad (51)$$

Por lo tanto con los valores de N_s , se puede determinar ψ y con ello el peso de las piezas.

$$\psi = A_w(Ir - 2.654 \tan \alpha) e^{(B_w(Ir - 2.654 \tan \alpha))} \quad (52)$$

Donde:

A_w y B_w : coeficientes de ajuste

$$Ir > 2.654 \tan \alpha$$

Los coeficientes de ajuste (A_w y B_w) dependen del tipo de pieza, de la pendiente del talud, del nivel de avería y de la forma de colocación de las piezas. En la Tabla 21 se muestran las bandas de confianza y los valores máximos de la función de estabilidad correspondientes a la banda de confianza superior del 95%.

Tabla 21 Valores del A_w y B_w para la formulación de Losada

Tipo de pieza	$cot\alpha$	A_w	B_w	$2.654 \tan \alpha$	BC 95%	ψ_{max}
Roca (Inicio de avería)	1.50	0.09035	-0.5879	1.77	1.41	0.0797
	2.00	0.05698	-0.6627	1.33	1.46	0.0462
	3.00	0.04697	-0.8084	0.88	1.35	0.0289
	4.00	0.04412	-0.9339	0.66	1.64	0.0285
Roca sin clasificar (Daño nulo)	2.50	0.18340	-0.5764	1.06	1.57	0.1838
	3.50	0.18190	-0.6592	0.76	1.50	0.1523
	5.00	0.14680	-0.0644	0.53	1.52	0.1274
Tetrápodos	1.33	0.03380	-0.3141	1.99	1.64	0.0649
(Inicio de avería)	1.50	0.02788	-0.3993	1.77	2.27	0.0583
	2.00	0.02058	-0.5078	1.33	1.93	0.0288
Bloques 1.5A*A*A (Inicio de avería)	1.50	0.06819	-0.5148	1.77	3.28	0.1598
	2.00	0.03968	-0.6247	1.33	2.37	0.0554
	3.00	0.03410	-0.7620	0.88	1.77	0.0291

Losada y Giménez-Curto determinaron las banda de confianza de la curva de mejor ajuste, dado que los datos experimentales tenían una dispersión considerable. Los resultados de la banda de confianza superior, que incluye 95% de los datos, para la ecuación 52 se presentan en la Tabla 21, en la columna BC 95%. La última columna de

esa misma tabla muestra los valores obtenidos al multiplicar el valor máximo de la función de estabilidad, obtenido con la ecuación 52, por el valor de la banda superior de confianza de 95%.

La recomendación de estos autores es que siempre que la condición de diseño reporte números de Iribarren cercanos a los correspondientes al máximo de ψ , se utilizará, como valor de diseño el valor de la última columna de la Tabla 21, en caso contrario se usará la ecuación 52.

En la Tabla 22 se muestran los valores de ψ para bloques paralelepípedicos con un nivel de confianza de 95%, obtenidos a partir de experimentación.

Tabla 22 Valores máximos de ψ para bloques paralelepípedicos

Tipo de bloque	cot α		
	1.5	2	2.5
Inicio de avería			
AxAxA	0.06	0.047	0.043
AxAx1.5A	--	--	0.084
AxAx2A	0.12	--	0.116
Avería de Iribarren			
AxAxA	0.033	0.028	0.024
AxAx1.5A	--	--	0.03
AxAx2A	0.042	--	0.038
Destrucción			
AxAxA	0.027	0.022	0.018
AxAx1.5A	--	--	0.021
AxAx2A	0.035	--	0.027

van del Meer (1988)

Propuso las expresiones que se muestran a continuación, basadas en resultados de Thompson y Shuttler (1975) y modelos ensayados por él.

Para aguas profundas

$$N_s = 6.2P^{0.18} \left(\frac{s}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} Ir^{-0.5} \quad Ir < Ir_{crit} \quad (53)$$

$$N_s = 6.2P^{0.18} \left(\frac{s}{\sqrt{N}}\right)^2 Ir^{-0.5} \quad Ir < Ir_{crit} \quad (54)$$

$$N_s = P^{0.13} \left(\frac{s}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} Ir^P \quad Ir > Ir_{crit} \quad (55)$$

Donde:

$$Ir = (6.2P^{0.31}\sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \quad (56)$$

P: factor de permeabilidad de van der Meer (Figura 33)

N: número de olas del estado de mar ($1000 < N < 7000$)

S: parámetro de daño

Los valores del parámetro de daño se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23 Valores de daño, para la formulación de van der Meer (1988)

Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
1:1.5	2	3 – 5	8
1:2	2	4 – 6	8
1:3	2	6 – 9	12
1:4	3	8 – 12	17
1:6	3	8 – 12	17

Para aguas someras

En profundidades reducidas, la energía del oleaje sufre procesos de disipación por fricción con el fondo y algunas olas pueden romper, de modo de van der Meer definió el número de estabilidad de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{H_{2\%}}{(S_r - 1)D_{n50}} \quad (57)$$

Por lo que las ecuaciones de diseños son:

$$N_s = 8.7P^{0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} Ir^{-0.5} \quad Ir < Ir_{crit} \quad (58)$$

$$N_s = 1.4P^{0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} Ir^P \quad Ir > Ir_{crit} \quad (59)$$

Cálculo de otros elementos de las estructuras.

Cálculo de piezas del morro

El morro es la parte final de una estructura marítima, los efectos combinados de difracción, reflexión y refracción relacionados con la geometría de la estructura generan alturas de ola cercana al morro significativamente mayores que la altura de ola incidente.

Losada et al (1990) analizaron varios tipos de morros (puntal, semicircular, centrado en el eje, vuelto hacia tierra y mar). En la Figura 45 se muestran los índices de amplificación de la altura de ola en el morro.

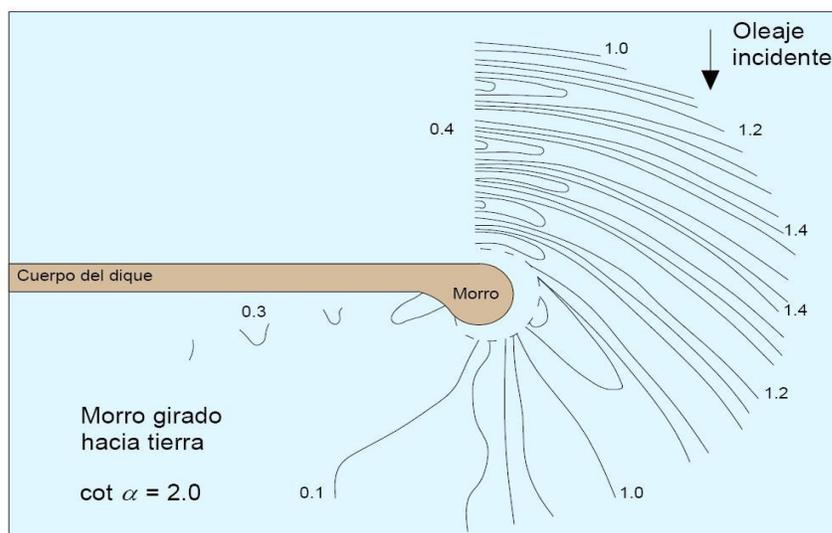


Figura 45 Variación del coeficiente de difracción alrededor del morro

De acuerdo con Vidal et al (1991), el inicio de daño en el morro se produce en un sector de unos 60° medidos desde el punto de tangencia de los rayos con la superficie cónica de la coraza. Una vez que inicia el daño, éste avanza en sentido contrario al de la propagación del oleaje. Además concluyeron lo siguiente:

- Existe un sector de estabilidad mínima.
- El peso de las piezas del morro debe ser entre 1.3 y 1.8 veces el de las piezas del cuerpo de la estructura, dependiendo del nivel de avería de diseño. Los factores de aumento de peso se muestran en la Tabla 24.
- Dado que las piezas removidas en el morro quedan fuera de la sección, el morro es muy frágil, por ello, el aumento en el peso de las piezas es ineludible.

Tabla 24 Factores de incremento del peso en las piezas del morro

Nivel de daño	Valor del factor de aumento del peso
Inicio de avería	1.5
Avería de Iribarren	1.9
Inicio de destrucción	2.5

Cálculo del peso de los elementos de la capa secundaria

El peso de los elementos de la capa secundaria se determina con la siguiente ecuación.

$$W_{cs} = \frac{W}{10} \approx \frac{W}{15} \quad (60)$$

Donde:

W_{cs} : peso de las piezas de la capa secundaria

W : peso de las piezas de la coraza

Cálculo del peso de los elementos del núcleo

Para determinar el peso de los elementos que conforman el núcleo se hace uso de la expresión siguiente.

$$W_n = \frac{W}{200} \approx \frac{W}{4000} \approx \frac{W}{6000} \quad (61)$$

Donde:

W_n : peso de las piezas del núcleo

El peso de los elementos de la capa secundaria y del núcleo no requiere mucha precisión, pues no están expuestos a la acción directa del oleaje, pero se debe de garantizar que estos elementos tengan el tamaño suficiente para que no salgan a través de los intersticios de la coraza.

3.6. Diseño de estructuras sumergidas y rebasables

Son estructuras que, debido a su baja cota de coronación, son diseñadas para permitir un rebase importante sobre la misma y puede ser que la transmisión también sea significativa. El motivo por el cual se construyen este tipo de estructuras es porque su nivel de impacto visual es nulo, ya que permanecen por debajo del nivel medio del mar.

El flujo sobre el talud exterior de la estructura disminuye de intensidad a medida que disminuye el francobordo, por lo cual, el peso de las piezas de la coraza exterior puede ser inferior al peso necesario para una estructura que impide el rebase. Es importante mencionar que en la coronación y el talud interior aumenta la acción del flujo cuando disminuye el francobordo, por lo que la estabilidad también disminuye.

La metodología utilizada por Vidal et al (1992) consideró una geometría dada, de rocas con un talud $\cot \alpha = 1.5$ y núcleo permeable de roca. Para calcular el peso de las piezas de la coraza de los diferentes sectores de una estructura sumergida o rebasable, se deben aceptar las siguientes hipótesis:

- Para un sector determinado de la estructura y un nivel de avería dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos francobordos diferentes, es independiente del tipo de piezas y del ángulo del talud.
- Para un francobordo dado, la relación entre los números de estabilidad correspondientes a dos sectores distintos de una estructura sólo depende del tipo de piezas y del ángulo de los taludes

Con las hipótesis anteriores se asume que la dependencia de la estabilidad del tipo de piezas y el ángulo del talud sea la misma que la del sector utilizado como referencia, que en este caso es el talud exterior de las estructuras no rebasables. En la Figura 46 se muestra en planta cada uno de los sectores de la estructura sumergida.

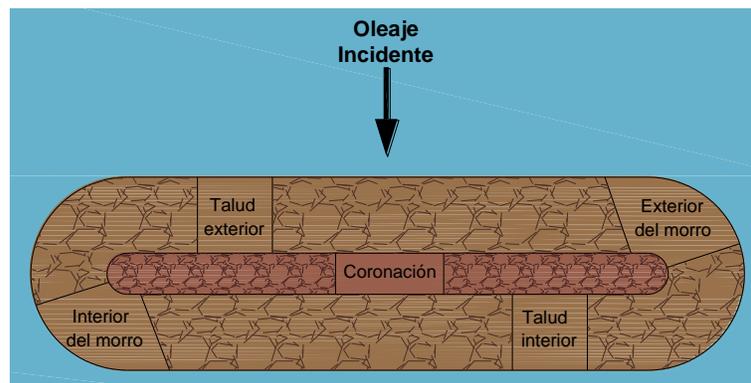


Figura 46 Sectores de una estructura rebasable o sumergida

Talud Exterior

El cálculo del peso de las piezas de la coraza para el talud exterior de las estructuras rebasables se realiza calculando el peso W_{nr} y el diámetro D_{nr} de las piezas para una estructura no rebasable con las mismas características de talud y tipo de piezas.

El diámetro D_{nr} se utiliza para determinar el francobordo adimensional de la estructura rebasable.

$$F_{dr} = F_r/D_{nr} \quad (62)$$

Donde

F_{dr} : francobordo adimensional de la estructura rebasable

F_r : francobordo de la estructura no rebasable

D_{nr} : diámetro de las piezas de la estructura no rebasable

La variación del número de estabilidad respecto del francobordo adimensional se describe por medio de la siguiente familia de parábolas.

$$N = A + BF + CF^2 \quad (63)$$

Los coeficientes de ajuste y niveles de daño para el talud exterior se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del talud exterior

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	1.831	-0.245	0.0119	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.256	-0.320	0.0189	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.650	-0.313	0.0129	3.15
D	-2.01 a 2.41	3.237	-0.357	0.0357	3.90

Con la ecuación 63 se determina el valor del número de estabilidad correspondiente al francobordo de la estructura no rebasable, N_{snr} , y del número de estabilidad para el francobordo de la estructura rebasable, N_{ste} como función del R_{dr} .

$$N_{snr} = A + BF_{dnr} + CF_{dnr}^2 \quad (64)$$

$$N_{ste} = A + BF_{dr} + CF_{dr}^2 \quad (65)$$

Donde

N_{nr} : número de estabilidad de la estructura no rebasable, adimensional

N_{ste} : número de estabilidad de la estructura rebasable, adimensional

F_{dnr} : francobordo adimensional de la estructura rebasable, su valor se toma de la Tabla 25.

La relación entre los números de estabilidad es inversa a la relación de los diámetros de las piezas de la coraza de la estructura no rebasable y el de la rebasable. De esta manera, el diámetro de las piezas del talud exterior del dique rebasable se calcula de la siguiente manera.

$$D_{te} = D_{nr} \frac{N_{snr}}{N_{ste}} \quad (66)$$

Donde

D_{nr} : diámetro de las piezas de la coraza de la estructura no rebasable

D_{te} : diámetro de las piezas del talud exterior de la estructura rebasable

Coronación

Mediante una comparación del peso de las piezas del talud exterior a través del francobordo adimensional de dicho talud se puede determinar el peso necesario para los elementos de la coronación.

$$F_{dte} = F_r / D_{te} \quad (67)$$

Donde

F_{dte} : francobordo adimensional del talud exterior

El talud exterior del sector de referencia para el cálculo del diámetro de los elementos de la coronación es 1.5:1. Si el talud exterior de la estructura que se diseñará fuera diferente, entonces será necesario calcular el peso necesario de las piezas para un talud 1.5:1 y con esos valores se evalúa la ecuación 67.

En la ecuación 64 se sustituyen los coeficientes correspondientes a la coronación para el nivel de daño deseado, de acuerdo con la Tabla 26.

Tabla 26 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño de la coronación

Avería	Rango de F_a	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	1.652	0.0182	0.159	-----
AI	-2.01 a 2.41	2.122	0.0434	0.150	-----
ID	-2.01 a 2.41	2.734	0.1230	0.177	-----
D	-2.01 a 1.00	3.210	0.0965	0.175	-----

A partir de lo anterior, se puede determinar el número de estabilidad N_{sc} como función de F_{dte} .

$$N_{sc} = A + BF_{dte} + CF_{dte}^2 \quad (68)$$

Donde

N_{sc} : número de estabilidad de la coronación, adimensional

El diámetro de las piezas de la coronación se determina de la siguiente forma.

$$D_c = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{sc}} \quad (69)$$

Talud interior

Se calcula comparando el del peso de las piezas del talud exterior a través del francobordo adimensional correspondiente, F_{dte} . Si los taludes exterior e interior tienen la misma pendiente, entonces la aplicación es directa. En caso contrario, se calcula el peso y diámetro de las piezas de la coraza exterior para una pendiente igual a la de la interior y posteriormente se sigue la metodología de la coronación, es decir, se calcula el número de estabilidad del francobordo del talud interior a partir de la ecuación 64, pero los coeficientes de ajustes son los que se presentan en la Tabla 27.

$$N_{sti} = A + BF_{dte} + CF_{dte}^2 \quad (70)$$

Donde

N_{sti} : número de estabilidad del francobordo del talud interior

Tabla 27 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del talud interior

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dnr}
IA	-2.01 a 2.41	2.575	-0.5400	-0.1150	-----
AI	0.80 a 2.41	5.628	-1.459	0.0837	-----
ID	1.60 a 2.41	8.669	-2.272	-----	-----

El diámetro de las piezas del talud interior es:

$$D_{ti} = D_{te} \frac{N_{ste}}{N_{ti}} \quad (71)$$

Donde

D_{ti} : diámetro de las piezas de la coraza interior

Morros

Suponiendo que en los diferentes sectores del morro se utilizará el mismo tipo piezas, solamente se calculará el diámetro de las piezas del talud interior, dado que esta zona es la menos estable.

El diámetro de los elementos que conforman el morro se puede calcular a partir de las piezas del morro de la correspondiente estructura no rebasable. Una vez determinado el diámetro necesario de los elementos en el morro para la estructura no rebasable, D_{mnr} , el francobordo de la estructura rebasable se calcula de la siguiente forma

$$F_{dmr} = F_r / D_{mnr} \quad (72)$$

Donde

F_{dmr} : francobordo adimensional del morro de la estructura rebasable

D_{mnr} : diámetro de las piezas del morro de la estructura rebasable

El francobordo adimensional del morro se utiliza para calcular el número de estabilidad del francobordo del morro de no rebase, N_{smnr} , y el número de estabilidad del francobordo del morro de la estructura rebasable, N_{smr} , de la siguiente manera.

$$N_{smnr} = A + BF_{dmnr} + CF_{dmnr}^2 \quad (73)$$

$$N_{smr} = A + BF_{dmr} + CF_{dmr}^2 \quad (74)$$

Donde

F_{dmnr} : francobordo adimensional del morro de no rebase

Los coeficientes de ajuste de las ecuaciones 73 y 74 se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28 Parámetros de ajuste A, B y C para el diseño del morro

Avería	Rango de F_d	A	B	C	F_{dmnr}
IA	-2.01 a 2.41	1.681	-0.474	0.105	2.40
AI	-2.01 a 2.41	2.046	-0.499	0.0913	2.41
ID	-2.01 a 2.41	2.517	-0.536	0.0613	3.15
D	-0.01 a 2.41	3.027	-0.756	0.120	3.90

Finalmente el diámetro de las piezas del morro de la estructura rebasable se calcula de la siguiente forma.

$$D_{mr} = D_{mnr} \frac{N_{smnr}}{N_{smr}} \quad (75)$$

Donde

D_{mr} : diámetro de las piezas del morro de la estructura rebasable

N_{smr} : número de estabilidad del francobordo del morro rebasable

N_{smnr} : número de estabilidad del francobordo del morro de no rebase

3.7. Diseño de estructuras verticales

Una estructura vertical está conformada por una superestructura de cajones, bloques o pantallas que se cimientan sobre el fondo del mar o sobre una estructura de enrocamiento (Figura 47). Estas estructuras se construyen a una profundidad tal que las olas no rompan por fondo, por lo que la mayor parte de la energía incidente es reflejada y muy poca se disipa.

El oleaje produce esfuerzos oscilatorios sobre la estructura, subpresión y una resultante horizontal, ante estos esfuerzos la estructura opone solamente su propio peso.

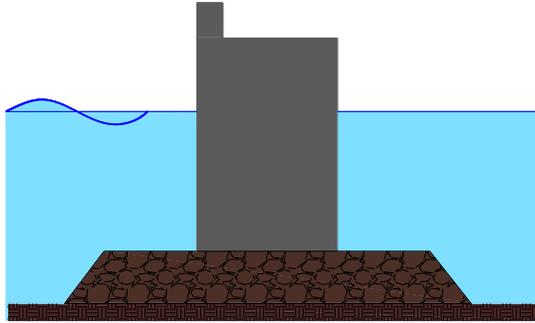


Figura 47 Esquema de una estructura vertical

El método de cálculo de Goda (1985) permite conocer la distribución de esfuerzos sobre la pared vertical, conocidas la geometría de la estructura, las características del fondo marino y los parámetros del oleaje incidente.

Este método supone una distribución lineal de presiones independientemente de que la ola rompa o no. Se basa en experimentos con trenes de oleaje irregular y es válido para cualquier ángulo de incidencia.

En la Figura 48 se muestra la nomenclatura empleada por Goda (1985).

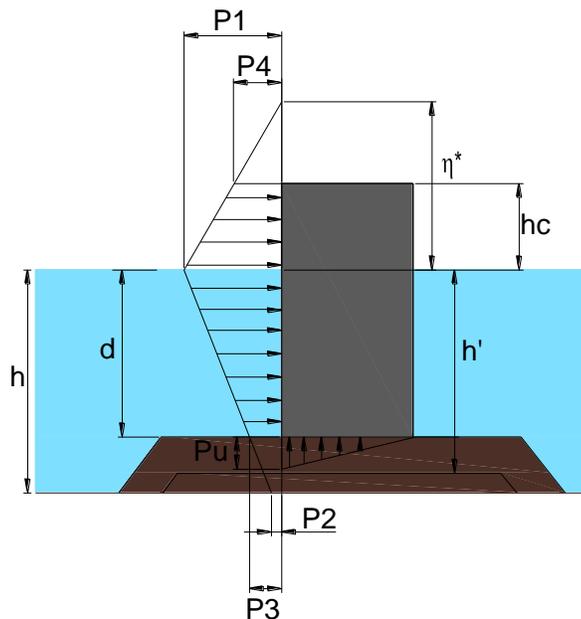


Figura 48 Nomenclatura del método de Goda (1985)

De acuerdo con esta metodología, la máxima cota que el agua alcanza después del impacto se calcula de la siguiente manera.

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)H \quad (76)$$

Donde

β : ángulo de incidencia del oleaje

H: altura de ola de diseño

Las presiones de la Figura 48 se calculan con las expresiones mostradas a continuación.

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\alpha_1 + \alpha^* \cos^2\beta)\gamma H \quad (77)$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (78)$$

$$P_3 = \alpha_3 P_1 \quad (79)$$

$$P_4 = \alpha_4 P_1 \quad (80)$$

Donde

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right]^2 \quad (81)$$

$$\alpha_2 = \min\left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H}{d}\right)^2, \frac{2d}{H} \right\} \quad (82)$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{h_c^*}{\eta^*} \quad (83)$$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_1, \alpha_2\} \quad (84)$$

$$h_c^* = \min\{h_c, \eta^*\} \quad (85)$$

h_b : profundidad a una distancia $dist = 5H_s$ desde el pie de la estructura

γ : peso volumétrico del agua

L: longitud de onda a pie de la estructura

Finalmente la subpresión se calcula de la siguiente forma.

$$P_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\alpha_1\alpha_3\rho gH \quad (86)$$

Es importante mencionar que éste método basa parcialmente en la teoría no lineal y se puede utilizar tanto para ondas estacionarias como ondas en rotura.

3.8. Diseño de estructuras mixtas

Las estructuras mixtas están formadas por una banqueta de roca sobre la cual se apoya un cajón. Las olas pueden romper sobre la estructura o bien antes de llegar a ella. En la Figura 49 se muestra un esquema de estas estructuras mixtas.

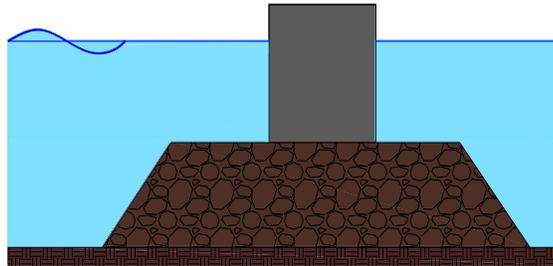


Figura 49 Esquema de una estructura mixta

Nagai (1973) formuló un método experimental para estimar las presiones máximas que genera un oleaje con incidencia normal.

Éste método tiene el siguiente límite de aplicación

$$\frac{h_1}{h_2} < 0.75$$

Pero si se cumplen las condiciones que a continuación se presentan, entonces el método también se puede aplicar.

$$\frac{h_1}{h_2} \geq 0.75 \quad \text{y} \quad \frac{H}{h_2} \geq 0.5$$

En la Figura 50 se muestra el esquema y nomenclatura de Nagai (1973).

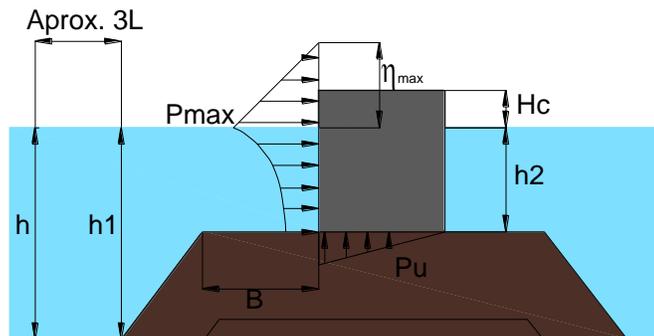


Figura 50 Nomenclatura del método de Nagai (1973)

Nagai (1973) hace la distinción de dos tipos de estructuras mixtas.

Estructuras mixtas con banquetta alta.

Se debe de cumplir que $h_1/h_2 < 0.4 - 0.5$ y $(h_1^2/h)(H/L) \leq 0.044$ para que la presión máxima se calcule con la siguiente expresión.

$$P_{max} = 4 + 500\rho gh_1 \frac{h_1 H}{h L} \quad (87)$$

En caso contrario, $(h_1^2/h)(H/L) > 0.044$, la presión máxima será entre 20 y 26 t/m². Nagai (1973) recomienda para estructuras expuestas a oleaje interior 26 t/m² y para estructuras parcialmente protegidas 20 t/m².

La distribución vertical de las presiones depende del peralte de la ola, H/L , una vez que se conoce la presión máxima. Los tipos de distribución que propuso Nagai son:

Distribución tipo A

En este caso la ola rompe justo delante de la estructura produciendo la presión máxima alrededor del nivel medio del mar. Se cumple que $H/L \geq 0.045$ y $h_1/H \leq 1$. La distribución vertical de presión está definida de la siguiente manera.

$$P_y = P_{max} \left(1 - \frac{2y}{H}\right)^2 \quad (88)$$

Donde

y: valor absoluto de la distancia del punto considerado al nivel medio del mar

Distribución tipo B

La ola rompe en voluta justo antes de llegar al dique, por lo que las máximas presiones se presentan al pie de la estructura.

$$P_y = P_{max} \left(1 - \frac{y}{H}\right)^2 \quad (89)$$

Donde

y: distancia desde el punto considerado hasta el pie de la estructura

Distribución tipo C

En este caso la ola rompe en descrestamiento antes de llegar a la estructura, lo que ocasiona que en el pie del cajón vertical se produzca la máxima presión.

$$P_y = P_{max} \left(1 - \frac{y}{1.5H}\right)^2 \quad (90)$$

Donde

y: distancia desde el punto considerado hasta el pie del cajón vertical

Estructuras mixtas con banqueteta baja.

Se cumple que $0.4 - 0.5 < h_1/h_2 < 0.75$ y la presión máxima se presenta en las proximidades del nivel medio del mar, independientemente de que la ola rompa o no sobre la estructura. Cuando se cumple que $H/h \geq 0.5$ entonces las olas romperán sobre la estructura.

La presión máxima para estructuras con banqueteta baja se determina con la expresión siguiente.

$$P_{max} = \alpha \rho g H \quad (91)$$

Donde

α : parámetro experimental que depende de h_1/h_2 , B/h_2 y h_2/H

El valor de α se determina de la Figura 51.

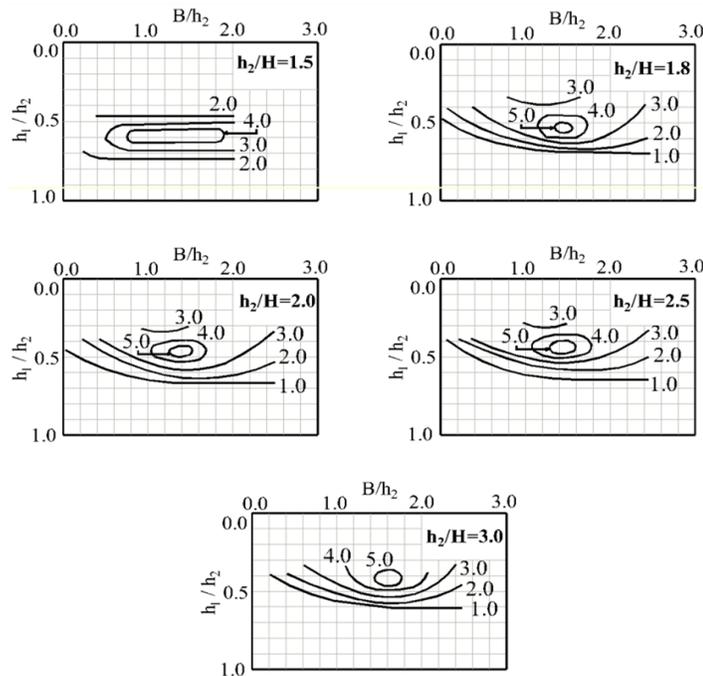


Figura 51 Ábaco para determinar el parámetro α de Nagai (1973)

El perfil vertical de la ley de presiones es:

$$P_z = P_{max} \frac{\cosh\left(1 + \frac{z}{h_1}\right)}{\cosh\beta} \quad \text{para } z < 0 \quad (92)$$

Donde

$$\beta = \sqrt{(6\alpha + 26)} - 5 \quad \text{para } 1 \leq \alpha \leq 5 \quad (93)$$

La ley de presiones sobre el nivel medio del mar ($z > 0$) tiene una distribución lineal hasta el valor $\eta_{max} = \gamma H$, tanto para estructuras de banqueteta alta como de banque baja. El valor γ de se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29 Coeficiente γ de Nagai (1973)

h/L < 0.135		0.135 ≤ h/L < 0.35	
$\alpha \leq 1.3$	$\gamma = 1.3$	$\alpha < 1.0$	$\gamma = 1.0$
$1.3 < \alpha \leq 1.5$	$\gamma = -2.13\alpha + 4.06$	$1.0 < \alpha \leq 3.0$	$\gamma = -0.25\alpha + 1.25$
$1.5 < \alpha \leq 3.0$	$\gamma = -0.25\alpha + 1.25$	$3.0 < \alpha$	$\gamma = 0.50$
$3.0 < \alpha$	$\gamma = 0.50$		

La subpresión dinámica depende del funcionamiento de la banqueteta de apoyo, si ésta permanece intacta ante la acción del oleaje, entonces la presión en el extremo expuesto de la superestructura será 1-1.5 t/m² y si algunas piezas de la banqueteta serán removidas por el oleaje, entonces, dicha presión será de 2-3 t/m².

La presión hidrostática no se considera directamente en este método, si no que se hace una alteración al peso de la superestructura de modo que en la parte sumergida, el peso volumétrico de la superestructura se define como $\gamma_m = \gamma_c - \gamma_w$, donde los subíndices m, c y w de los pesos volumétricos indican modificado, concreto y agua, respectivamente.

3.9. Diseño de estructuras con espaldón

Espaldón es una superestructura cimentada por arriba del nivel medio del mar (Figura 52). El funcionamiento hidráulico de esta estructura es que la ola rompe sobre el talud y alcanza la superestructura solamente en el proceso de ascenso.

La finalidad de los espaldones es permitir el acceso a la estructura mediante un camino de rodadura, reducir la cota de coronación para ahorrar material de construcción.

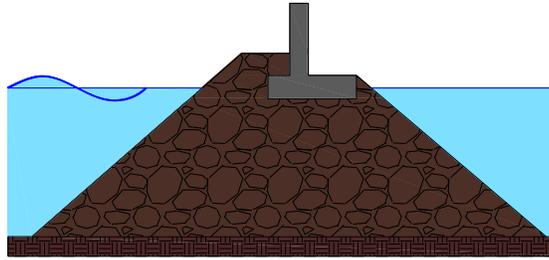


Figura 52 Esquema de una estructura con espaldón

Günbak y Gökce (1984)

El método utilizado por Günbak y Gökce (1984) supone que la lámina de agua en ascenso forma un ángulo de 15° con el talud de la estructura como se muestra en la Figura 53.

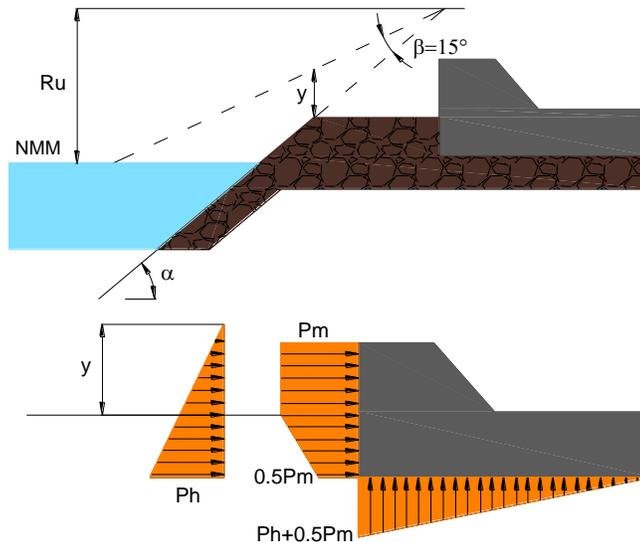


Figura 53 Esquema de presiones del método de Günbak y Gökce (1984)

Las expresiones que utilizan para determinar la presión de choque y la presión hidrostática son:

$$P_m = \gamma \frac{(\sqrt{gy})^2}{2g} = 1.03 \frac{\gamma}{2} y \quad (94)$$

$$P_h = \gamma(y + c - z) \quad (95)$$

$$y = \frac{(Ru - c) \operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \alpha \cos(\alpha + \beta)} \quad (96)$$

Donde

P_m : presión de choque

P_h : presión hidrostática

c : cota de la berma respecto del nivel del mar

β : ángulo formado en el ascenso del agua (15°)

α : ángulo del talud de la estructura

z : elevación de la cimentación del espaldón

R_u : ascenso máximo para la altura de ola de diseño

De acuerdo con la Figura 53, la presión de choque es uniforme desde la corona del espaldón hasta el nivel medio del mar y posteriormente es lineal hasta un valor de $0.5 P_m$ en la base del mismo. La presión hidrostática es lineal desde la base del espaldón hasta el valor de la cota máxima que alcanzaría el agua si el talud recto fuera infinitamente largo.

Las subpresiones tienen una distribución lineal y se determinan de la siguiente manera.

$$P_u = P_h + 0.5P_m \quad (97)$$

Martín et al. (1995)

El método que utilizaron se basó en la observación experimental de la llegada de una ola sobre un espaldón, en estos experimentos se presentaron dos picos de presión en diferentes tiempos, uno debido a la desaceleración horizontal del flujo al llegar a la estructura, P_d , y otro durante el descenso del agua acumulada frente a la estructura, P_h . Estas presiones reciben el nombre de dinámica y pseudo-hidrostática, respectivamente.

Para la aplicación de este método las olas no deben rompen en voluta ni en descrestamiento sobre el espaldón. Los parámetros que se deben considerar son:

- Número de Iribarren. $Ir < 3$ pues las olas no rompen en descrestamiento ni en voluta (Losada y Giménez-Curto, 1980), por lo que el valor del umbral superior del número de Iribarren es 3. Este método se puede aplicar con $Ir < 3$ siempre y cuando las olas rompan por fondo antes de llegar a la estructura o sobre la roca pero antes de alcanzar el espaldón. Para verificar la aplicabilidad del método se puede recurrir a la Figura 54.

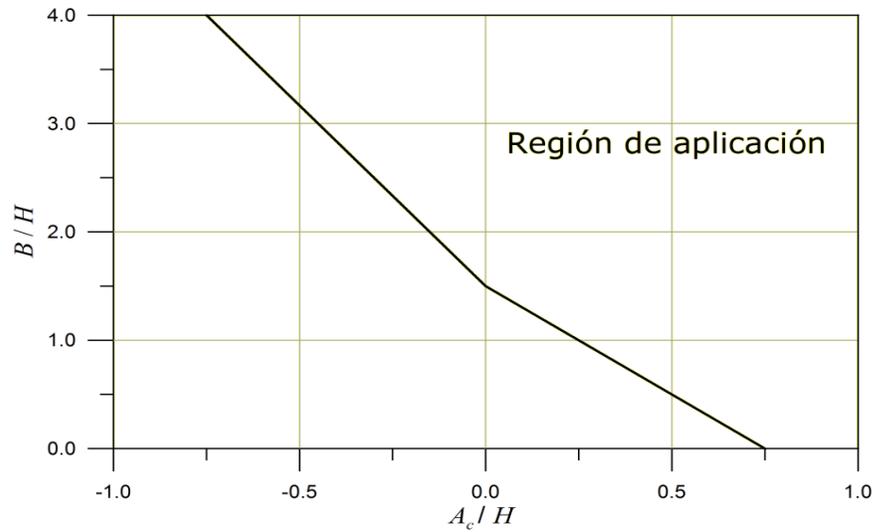


Figura 54 Región de aplicación del método de Martín et al (1955)

De la Figura 54 A_c es la cota de coronación y B es el ancho de la berma.

- El ángulo de incidencia del oleaje deberá ser menor o igual a 20° .

Cálculo de las presiones sobre el espaldón

Martín et al. (1995) plantearon la existencia de una presión dinámica y otra pseudo-hidrostática sobre la pantalla vertical y se considera que no se presentan de manera simultánea. La magnitud de esas presiones depende de la geometría de la estructura y del clima de oleaje. La Figura 55 muestra la distribución que proponen para ambas presiones.

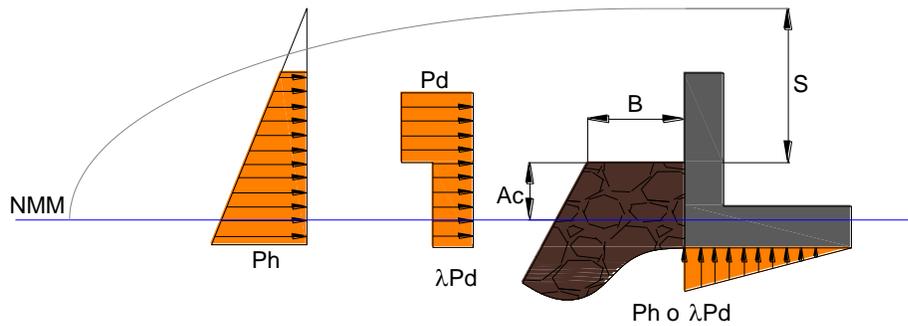


Figura 55 Esquema de distribuciones de presión de Martín et al (1955)

En ocasiones no se puede saber a priori cuál de las presiones produce las condiciones más desfavorables para la estabilidad, por lo que deben ser calculadas ambas presiones.

a) Presión dinámica

El espaldón puede dividirse en dos partes, una expuesta a la acción directa del oleaje y otra que se encuentra protegida por la coraza y recibe el oleaje filtrado. Martín et al. (1995) aceptaron que la ley de presiones en la parte superior del espaldón es uniforme.

$$P_d = \alpha\gamma S \quad A_c < z < A_c + S \quad (98)$$

Donde

$$Ru(\theta) = Ru(0^\circ)\cos(\theta)$$

$$\lambda = 0.8e^{\left(-10.9\frac{B}{L}\right)}$$

$$\alpha = \frac{2Ru}{H\cos^2\beta\cos\theta}$$

$$S = H\left(1 - \frac{A_c}{Ru}\right)$$

S: anchura de la lámina de agua sobre la cota de coronación

$Ru(\theta)$: ascenso máximo con el ángulo de incidencia igual a θ

$Ru(0)$: ascenso máximo para incidencia normal

B: ancho de la berma

L: longitud de ola al pie del talud

α : parámetro adimensional que contiene información de la celeridad de la onda, del ángulo del talud, β y del ángulo de incidencia del oleaje, θ

H: altura de ola de cálculo al pie del talud

β : ángulo de talud respecto de la horizontal

θ : ángulo de incidencia del oleaje

En cuanto a la parte inferior, algunos de los esfuerzos generados por el oleaje son soportados por la coraza principal, por lo que si las piezas son lo suficientemente grandes y no están en contacto directo con el espaldón, entonces no le transmitirán los esfuerzos. Por ello se propuso estimar la presión en la parte cubierta del espaldón como la presión en la parte superior afectada por un coeficiente de reducción λ .

$$P_d = \lambda\alpha\gamma S \quad \text{cota de cimentación} < z < A_c + S \quad (99)$$

b) Presión pseudo-hidroestática

La magnitud de las subpresiones es proporcional a la altura de la columna de agua, dado que se generan por la acumulación de agua contra el espaldón. Martín et al. (1995) propusieron $\mu\gamma$ como coeficiente de proporcionalidad y $\mu \leq 1$. La ley de presiones pseudo-hidroestáticas queda la siguiente forma.

$$P_h(z) = \mu\gamma(s + A_c - z) \quad \text{cota de cimentación } < z < A_c + S \quad (100)$$

El valor del parámetro μ se estima a partir de la Figura 56 y n es el número de piezas que conforman la berma, que es igual al ancho de la berma entre el lado equivalente de las piezas de la coraza.

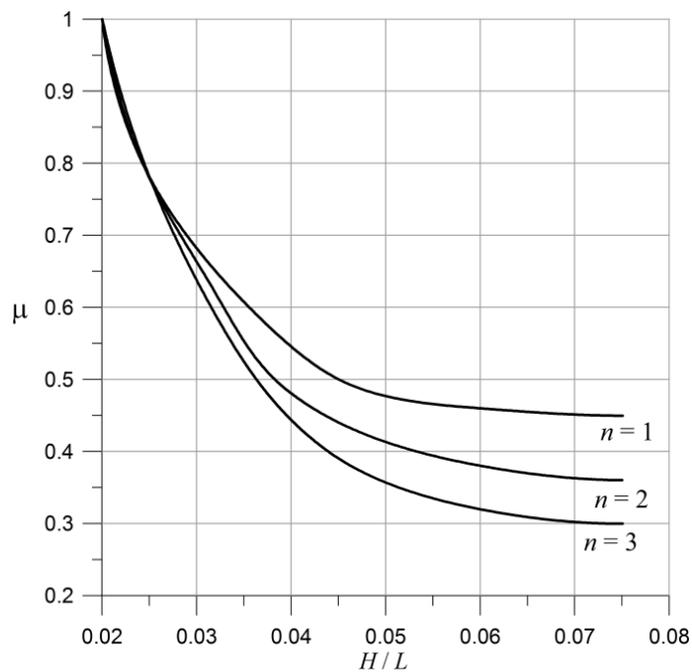


Figura 56 Esquema de distribuciones de presión de Martín et al (1955)

Martín et al. (1995) encontraron que las máximas presiones pseudo-hidroestáticas se producen un poco después del instante de ascenso máximo, por lo que consideraron ambos fenómenos simultáneos.

c) Subpresiones

Se considera que la distribución lineal inicia en el lado expuesto al oleaje, con el valor de P_h o λP_d , la que resulte mayor. Es importante mencionar que este valor aplica cuando el espaldón está cimentado por arriba del nivel medio del mar, en caso contrario, la supresión es γz .

4. Caso de Aplicación

4.1. Descripción de la programación

La parte medular de este trabajo fue la programación de los parámetros de diseño en NetBeans, que es un entorno integrado de desarrollo (Integrated Development Environment IDE) escrito en el lenguaje de programación de Java. Se utilizó NetBeans porque facilita los cálculos, en este caso de los parámetros, mediante el uso de botones y cuadros de texto con los cuales el usuario puede seleccionar y/o ingresar los datos necesarios; además se tiene como ventaja la generación de un archivo ejecutable que se puede utilizar prácticamente desde cualquier dispositivo móvil, sin necesidad de tener acceso a internet o tener instalado Java.

Los parámetros que se programaron son: Run Up, Run Down, Rebase, Transmisión, Reflexión y la determinación del peso de los elementos de estructuras en talud. El resultado de la programación es una interfaz gráfica conformada por una ventana principal que incluye seis botones con los nombres de los parámetros anteriormente mencionados, un cuadro de texto con una breve descripción y un botón para salir, esta ventana se muestra en la Figura 57.

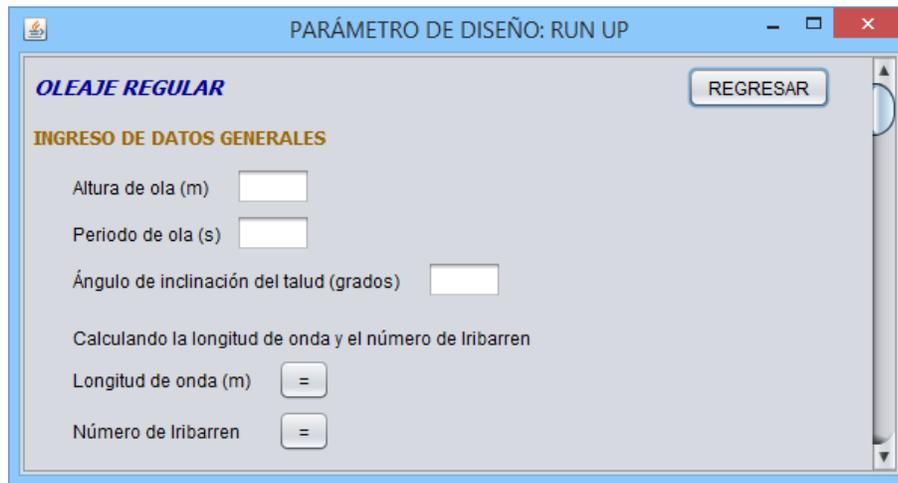


Figura 57 Ventana principal de la interfaz gráfica

En el momento en que el usuario dé click sobre el botón con el nombre del parámetro que desea calcular, se abrirá otra ventana (seis ventanas secundarias) con varias

divisiones, que van desde el tipo de oleaje, tipo de estructuras o simplemente los autores y tiene un botón en la parte superior derecha para poder regresar a la ventana principal.

Es importante mencionar que las ventanas secundarias tienen un apartado denominado "INGRESO DE DATOS GENERALES", estos datos son la altura de ola, periodo y el ángulo de inclinación del talud u otros datos necesarios para poder realizar los cálculos. En este mismo apartado se calculan algunos parámetros que se utilizan en las formulaciones, como es la longitud de ola y el número de Iribarren, como ejemplo se presenta la Figura 58. A continuación se hace una breve presentación de las seis ventanas secundarias que conforman la interfaz gráfica.



The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP". Inside, there is a section labeled "OLEAJE REGULAR" with a "REGRESAR" button in the top right. Below this is the "INGRESO DE DATOS GENERALES" section, which contains three input fields: "Altura de ola (m)", "Periodo de ola (s)", and "Ángulo de inclinación del talud (grados)". Below these fields, the text "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren" is displayed. At the bottom, there are two rows, each with a label and an equals sign in a box: "Longitud de onda (m)" and "Número de Iribarren".

Figura 58 Ejemplo de Ingreso de datos generales

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP

Esta ventana cuenta con dos divisiones, que corresponden al oleaje regular e irregular; posteriormente se tienen los nombres de los autores de las expresiones utilizadas.

Los autores para oleaje regular son Losada y Giménez-Curto y Ahrens y Heimbaugh (Figura 59). En ambas formulaciones para oleaje regular, el usuario deberá de seleccionar el tipo de material y tipo de estructura.

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP". The window has a blue title bar with standard Windows window controls (minimize, maximize, close). The main content area is light gray and contains several sections:

- OLEAJE REGULAR**: A section header in blue, with a "REGRESAR" button to its right.
- INGRESO DE DATOS GENERALES**: A section header in orange. It contains three input fields: "Altura de ola (m)", "Periodo de ola (s)", and "Ángulo de inclinación del talud (grados)". Below these is a text label "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren".
- Longitud de onda (m)** and **Número de Iribarren**: Each has a corresponding "=" button.
- Selección de material y estructura**: A section with a dropdown menu labeled "Tipo de material" and two radio buttons: "Estructuras homogéneas" and "Estructuras impermeables".
- LOSADA Y GIMENEZ-CURTO**: A section header in orange, with a "Run up (m)" label and an "=" button.
- AHRENS Y HEIMBAUGH**: A section header in orange, with a "Run up (m)" label and an "=" button.

Figura 59 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Regular

Para el cálculo del Run Up con oleaje irregular se tiene además una subdivisión que es:

Taludes impermeables. Los autores que se tienen son Battjes, y Waal y van Der Meer (Figura 60 y Figura 61). El usuario deberá de seleccionar el tipo de superficie y el porcentaje de excedencia.

Para la expresión de Battjes se consideró que los perfiles no tienen berma, una distribución del oleaje tipo Rayleigh y que el oleaje tiene una incidencia normal (Figura 60).

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP

OLEAJE IRREGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m)

Período pico de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren Irp =

TALUDES IMPERMEABLES

Selecciona el tipo de superficie

Tipo de superficie

Selecciona el porcentaje de excedencia

Ru2% Ru33%

BATTJES

Run up (m) =

Figura 60 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes impermeables

Para la formulación de Waal y van Der Meer el usuario además deberá de introducir los ángulos equivalente y promedio de inclinación del talud y seleccionará el tipo de ondas (Figura 61). Es importante mencionar que se consideró una distribución de oleaje tipo Rayleigh, es decir, el factor de reducción por influencia de condiciones de aguas someras es igual a uno ($\gamma_h=1$).

Taludes permeables: El cálculo fue programado con la ecuación de van Der Meer y Stam (Figura 62). Esta formulación solamente es aplicable cuando se tiene una permeabilidad de 0.5 y 0.6. El usuario deberá de proporcionar el periodo medio y seleccionar el porcentaje de excedencia.

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP

WAAL Y VAN DER MEER

Considerando el efecto de la berma
 Ingresa los siguientes ángulos

Ángulo equivalente de inclinación del talud

Ángulo promedio de inclinación del talud

Ángulo de incidencia del oleaje

Calculando el número de Iribarren equivalente y promedio

Número de Iribarren equivalente =

Número de Iribarren promedio =

Selecciona el tipo de ondas

Ondas de cresta larga Ondas de cresta corta

Run up (m) =

Figura 61 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes impermeables (continuación)

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP

TALUDES PERMEABLES

VAN DER MEER Y STAM

Para permeabilidad $n= 0.5$ y $n= 0.6$
 Ingresa los siguientes datos

Periodo medio de ola (m)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren Irmed =

Selecciona el porcentaje de excedencia

Porcentaje de excedencia

Run up 1% (m) =

Figura 62 Ventana para el cálculo de Run Up. Oleaje Irregular: Taludes permeables

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN.

Esta ventana cuenta con dos divisiones, que corresponden al oleaje regular e irregular. Para oleaje regular se tiene la expresión de Losada y Giménez-Curto (Figura 63). El usuario deberá de seleccionar el tipo de material.

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN". The window is divided into two main sections. The top section is titled "OLEAJE REGULAR" and contains a "REGRESAR" button. Below this is the "INGRESO DE DATOS GENERALES" section, which includes input fields for "Altura de ola (m)", "Periodo de ola (s)", and "Ángulo de inclinación del talud (grados)". Below these fields are labels for "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren", "Longitud de onda (m)", and "Número de Iribarren", each followed by an equals sign in a box. The bottom section is titled "LOSADA Y GIMENEZ-CURTO" and includes the text "Selecciona el tipo de material", a dropdown menu labeled "Tipo de material", and a label "Run down (m)" followed by an equals sign in a box.

Figura 63 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Regular

En cuanto al oleaje irregular se tiene la subdivisión de taludes impermeables y taludes permeables (Figura 64 y Figura 65).

Taludes impermeables. Se utilizó la ecuación de Burcharth y Hughes; el cálculo del Run Down depende del tipo de talud: Talud impermeable o bien taludes construidos con bloques de concreto y núcleo impermeable. Para ambos tipos de taludes se tiene que la cota de descenso máximo es excedida por el 2% de las olas (Figura 64).

Taludes permeables. El cálculo del Run Down se programó con la formulación de van der Meer (Figura 65). El usuario deberá de ingresar el periodo medio del oleaje y seleccionar la permeabilidad de la estructura.

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN". The main heading is "OLEAJE IRREGULAR". Below it is the section "INGRESO DE DATOS GENERALES". This section contains three input fields: "Altura de ola significativa (m)", "Periodo pico de ola (s)", and "Ángulo de inclinación del talud (grados)". Below these fields is the text "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren". This is followed by two output fields: "Longitud de onda (m)" and "Número de Iribarren I_{rp}", each with an equals sign button. The second section is "TALUDES IMPERMEABLES" with the sub-heading "BURCHARTH Y HUGHES". It contains the text "Taludes impermeables" followed by a "Run down 2% (m)" field with an equals sign button. Below this is the text "Para taludes con bloques de concreto y núcleo impermeable" followed by another "Run down 2% (m)" field with an equals sign button.

Figura 64 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Irregular

The screenshot shows the same software window "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN". The main heading is "TALUDES PERMEABLES" with the sub-heading "VAN DER MEER". It starts with the instruction "Ingresa los siguientes datos" followed by an input field for "Periodo medio de ola (s)". Below this is the text "Calculando la longitud de onda y número de Iribarren". This is followed by two output fields: "Longitud de onda (m)" and "Número de Iribarren I_{rmed}", each with an equals sign button. The next section is "Selecciona la permeabilidad" with a dropdown menu labeled "Permeabilidad". At the bottom, there is a "Run down 2% (m)" field with an equals sign button.

Figura 65 Ventana para el cálculo de Run Down. Oleaje Irregular (continuación)

PARÁMETRO DE DISEÑO: REBASE.

El apartado de “INGRESO DE DATOS GENERALES”, el usuario deberá de introducir la altura de ola significativa, el periodo medio y el francobordo, además tendrá que seleccionar la pendiente de la estructura y el tipo de superficie (Figura 66). Las formulaciones utilizadas para el cálculo de éste parámetro son las de Owen, Aminti y Franco, van Der Meer y Jassen, Bradbury y Allsop, Franco y Franco.

En la expresión de Owen (Figura 66 y Figura 67) se tienen dos condicionantes:

Taludes impermeables rectos, lisos y olas no limitadas por fondo. Para el cálculo del rebase se tienen valores específicos para la pendiente (ver Tabla 7).

Figura 66 Ventana para el cálculo de rebase

Taludes impermeables con berma. El cálculo del rebase depende de la pendiente, que son valores diferentes de los que se utilizan en taludes impermeables rectos y

lisos, así como de la profundidad y ancho de la berma, por lo que el usuario deberá de seleccionar los parámetros anteriormente mencionados (Figura 67).

La ecuación de Aminti y Franco es aplicable en taludes sobre núcleo prácticamente impermeables con superestructura vertical. El resultado del gasto medio de rebase depende de la relación entre el ancho de la corona y la altura de ola significativa, y del ángulo del talud, por lo que el usuario deberá de seleccionar el tipo de material, la relación G/Hs y cota (Figura 67).

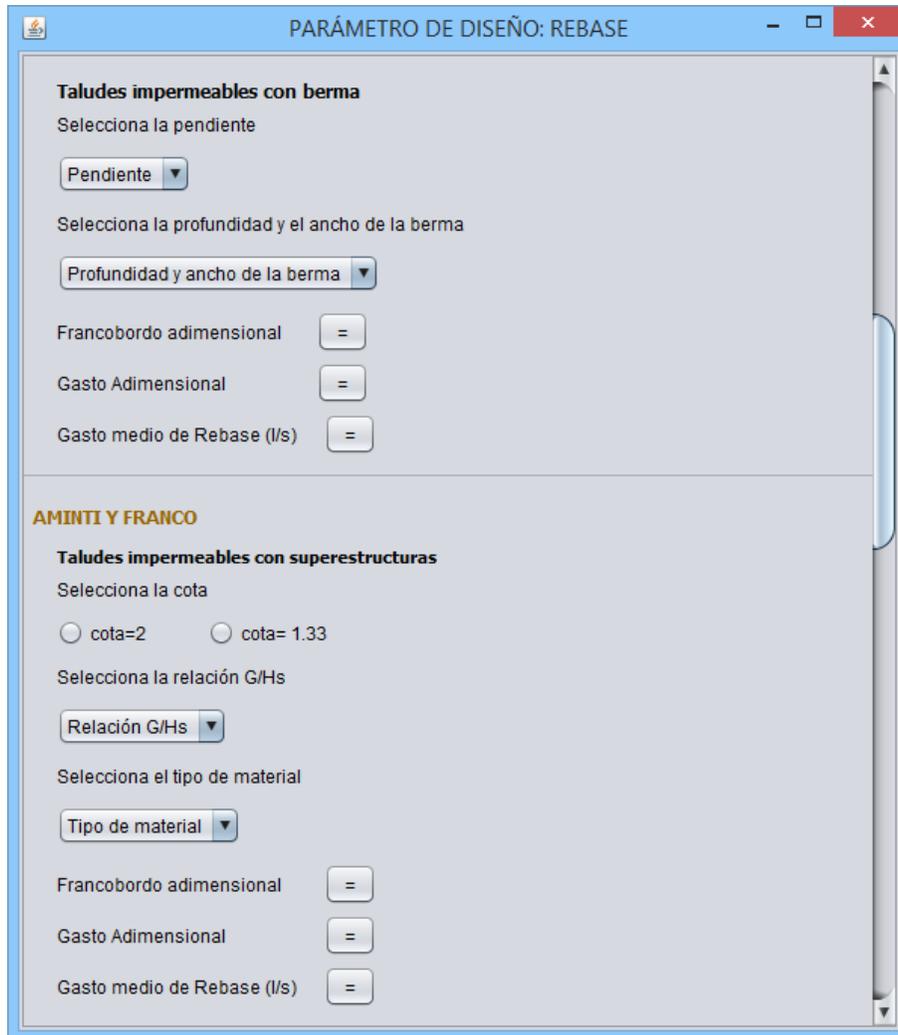


Figura 67 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)

La formulación de van der Meer y Janssen es aplicable para estructuras con taludes rectos y con berma. Para el cálculo del rebase, el usuario deberá de introducir el periodo pico del oleaje, los ángulos equivalente y promedio de inclinación del talud, la altura de ola 2%, el ángulo de incidencia del oleaje, además deberá de seleccionar el tipo de superficie y el tipo de ondas (Figura 68).

PARÁMETRO DE DISEÑO: REBASE

VAN DER MEER Y JANSSEN

Taludes impermeables, lisos, rectos y con berma

Ingresar los siguientes datos

Periodo pico de ola (s)

Ángulo equivalente de inclinación del talud

Ángulo promedio de inclinación del talud

Altura de ola 2% (m)

Ángulo de incidencia del oleaje (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de lribarren

Longitud de onda L_p (m) =

Número de lribarren l_{req} =

Número de lribarren l_{pro} =

Sop =

Selecciona el tipo de superficie

Tipo de superficie

Selecciona el tipo de ola

Ondas de cresta larga Ondas de cresta corta

Francobordo adimensional =

Gasto adimensional =

Gasto medio de Rebase (l/s) =

Figura 68 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)

La expresión de Bradbury y Allsop aplica cuando se trata de estructuras de roca, con superestructura vertical y pendiente 1:2. El rebase es función del ancho de la corona, francobordo y de la altura de coronación, por lo que el usuario deberá de seleccionar relaciones entre los parámetros geométricos anteriormente mencionados (Figura 69).

Se utiliza la ecuación de Franco y Franco en muros verticales permeables e impermeables. Para obtener el valor del rebase con esta ecuación, el usuario deberá de proporcionar el ángulo de incidencia del oleaje en la sección correspondiente a van der Meer y Janssen, posteriormente deberá de seleccionar el tipo de ondas y la geometría frontal de la estructura en este mismo apartado (Figura 69).

The image shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: REBASE". It is divided into two main sections:

- BRADBURY Y ALLSOP**:
 - Sub-section: **Taludes impermeables de roca con superestructura vertical. Pendiente 1: 2**
 - Text: "Selecciona la relación G/Hs, R/Rc y Ac/Rc"
 - Dropdown menu: "Relación G/Hs, G/Rc y Ac/Rc"
 - Input fields: "Francobordo adimensional", "Gasto Adimensional", and "Gasto medio de Rebase (l/s)", each with an "=" button.
- FRANCO Y FRANCO**:
 - Sub-section: **Estructuras veticales permeables e impermeables**
 - Text: "Considerando el mismo ángulo de incidencia del oleaje que en van der Meer y Janssen"
 - Text: "Selecciona el tipo de ondas"
 - Radio buttons: "Ondas de cresta larga" and "Ondas de cresta corta"
 - Text: "Selecciona el tipo de geometría"
 - Dropdown menu: "Tipo de geometría"
 - Input fields: "Francobordo adimensional", "Gasto Adimensional", and "Gasto medio de Rebase (l/s)", each with an "=" button.

Figura 69 Ventana para el cálculo de Rebase (continuación)

PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN.

Las formulaciones programadas para el cálculo del coeficiente de transmisión son las de Numata, Seeling, van der Meer, Daemen, van der Meer (2004) y d'Anfremond (Figura 70, Figura 71 y Figura 72).

El coeficiente de transmisión con la expresión de Numata se puede obtener para estructuras no rebasables y con rebase. Para estructuras no rebasables el usuario deberá de ingresar el ancho de la estructura (a nivel medio del mar) y el diámetro de las piezas. Para estructuras con rebase se deberá de ingresar la profundidad al pie de la estructura y seleccionar el tipo de material (Figura 70).

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN". It is divided into several sections:

- INGRESO DE DATOS GENERALES:** Contains input fields for "Altura de ola significativa (m)", "Periodo medio de ola (s)", and "Ángulo de inclinación del talud (grados)". Below these are two calculation buttons labeled "=" for "Longitud de onda (m)" and "Número de Iribarren". A "REGRESAR" button is in the top right.
- NUMATA:** A sub-section header.
- ESTRUCTURAS NO REBASABLES:** Includes the instruction "Ingresa los siguientes datos", an input field for "Diámetro característico de las piezas de la coraza (m)", and another instruction "Ingresa los siguientes datos". Below are an input field for "Ancho de la estructura a nivel medio del mar (m)" and a calculation button "=" for "Coeficiente de Transmisión Ct".
- ESTRUCTURAS CON REBASE:** Includes the instruction "Ingresa la profundidad al pie de la estructura (m)", an input field, and a calculation button "=" for "h/L".
- Selección de material:** A section with the instruction "Selecciona el tipo de material" and two radio buttons: "Roca clasificada" and "Tetrápodos".
- Final Calculation:** A final calculation button "=" for "Coeficiente de Transmisión Ct" at the bottom.

Figura 70 Ventana para el cálculo de Transmisión

El coeficiente de transmisión depende del ancho de la berma, francobordo, Run Up y altura de la estructura, por lo que el usuario deberá de introducir estos parámetros en la ecuación de Seeling (Figura 71).

Para el cálculo de la transmisión con la formulación de van der Meer, es necesario proporcionar los datos del apartado anterior, es decir de Seeling (Figura 71).

PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN

Ingresar los siguientes datos

Francobordo o bordo libre (m)

Ancho de la berma (m)

SEELING

Ingresar los siguientes datos

Ascenso máximo teórico Run Up (m)

Altura total de la estructura (m)

Coeficiente de Transmisión Ct

VAN DER MEER

El resultado del coeficiente de transmisión es a partir de los datos de Seeling

Rc/Hs

Coeficiente de Transmisión Ct

Figura 71 Ventana para el cálculo de Transmisión (continuación)

En la expresión de Daemen (Figura 72), el usuario deberá de ingresar el diámetro característico de las piezas de coraza (apartado de Numata), el ancho de la berma y francobordo (apartado de Seeling), además deberá de introducir el periodo pico del oleaje en este mismo apartado. El resultado del coeficiente de transmisión solamente es válido cuando se encuentra entre el rango de 0.075 a 0.75 (Ecuación 32).

El cálculo de la transmisión con la ecuación propuesta por van der Meer (2004) considera la influencia de la oblicuidad del oleaje que incide sobre estructuras impermeables. Por lo anterior el usuario deberá de proporcionar el ángulo de incidencia del oleaje para el cálculo (Figura 72).

PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN

DAEMEN

El resultado de transmisión es a partir del diámetro de las piezas (Numata), del franco bordo y ancho de la berma (Seeling).

Ingresa los siguientes datos

Periodo pico de ola (s)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda L_p (m) =

Número de Iribarren I_{rp} =

Sop =

Coeficiente de Transmisión C_t =

VAN DER MEER (2004)

Estructuras impermeables

Considerando la influencia de la oblicuidad del oleaje incidente

Ingresa los siguientes datos

Ángulo de incidencia del oleaje (grados)

Coeficiente de Transmisión C_t =

Figura 72 Ventana para el cálculo de Transmisión (continuación)

PARÁMETRO DE DISEÑO REFLEXIÓN.

El coeficiente de reflexión se puede calcular tanto para oleaje regular como para oleaje irregular. En el primer apartado, que es para oleaje regular, el usuario deberá de ingresar la altura de ola, el periodo de la ola, el ángulo de inclinación del talud y el diámetro característico de los elementos que conforman la coraza de la estructura (Figura 73). Las formulaciones de Numata, Seeling y Ahrens fueron programas para oleaje regular (Figura 73 y Figura 74).

Es necesario que el usuario introduzca el ancho de la berma, la profundidad al pie de la estructura y seleccione el tipo de material para calcular la reflexión con la expresión de Numata (Figura 73).

PARÁMETROS DE DISEÑO: REFLEXIÓN

OLEAJE REGULAR REGRESAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola (m)

Periodo de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Diámetro característico de las piezas de la coraza (m)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren =

NUMATA

ESTRUCTURAS VERTICALES POROSAS

Ingresa los siguientes datos

Ancho de la berma (m)

Profundidad a pie de la estructura (m)

H/L =

B/D =

h/L =

Selecciona el tipo de material

Roca sin clasificar Tetrápodos

Coeficiente de reflexión Cr =

Figura 73 Ventana para el cálculo de Reflexión

La ecuación de Seelig y Ahrens es válida para estructuras permeables no rebasables de taludes lisos, con núcleo impermeable de una capa, con núcleo impermeable multicapa y con núcleo permeable (Figura 74 y Figura 75).

Cuando se trata de una estructura de núcleo impermeable de una capa el usuario deberá de proporcionar el coeficiente obtenido a partir la gráfica que se muestra en la Figura 74. En estructuras de núcleo impermeable y multicapa el usuario deberá de ingresar la relación d/H_i y seleccionar el número de capas (Figura 74 y Figura 75).

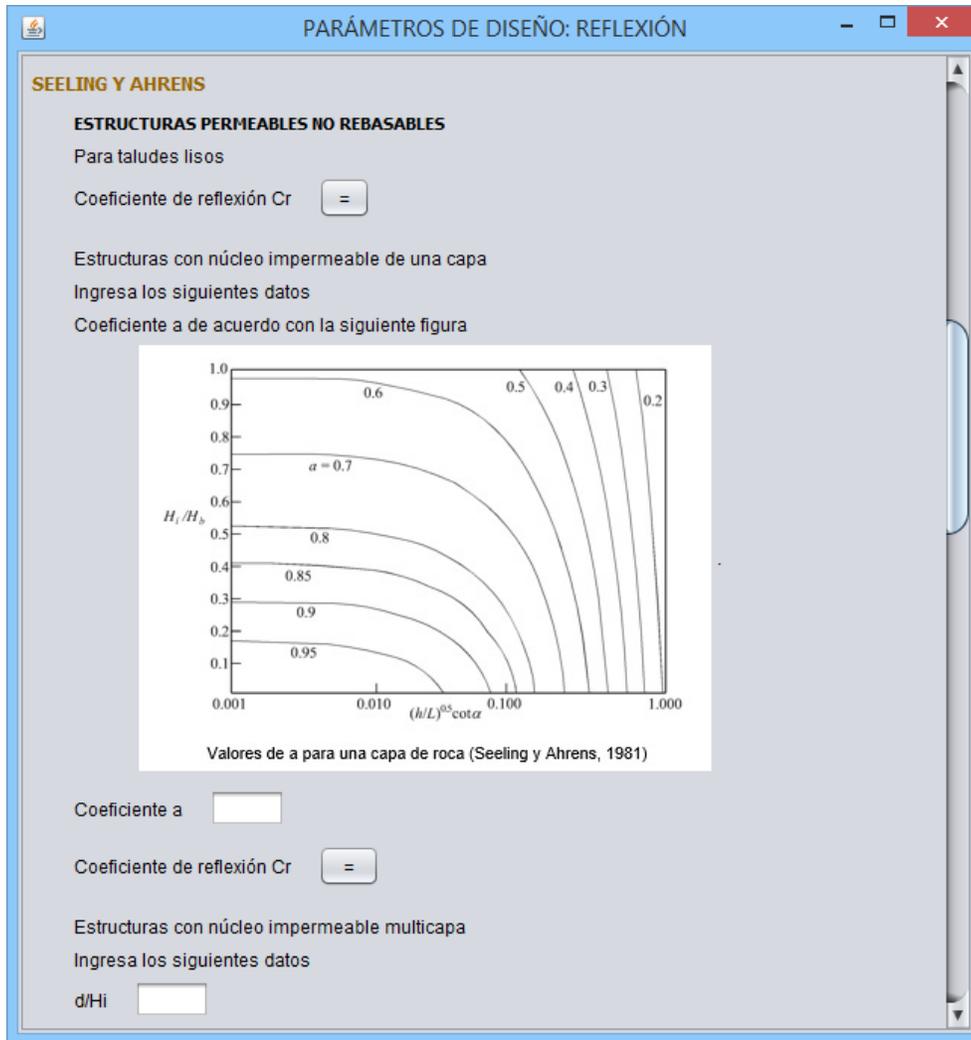


Figura 74 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación)

Cuando se trata de oleaje irregular los datos que el usuario deberá de proporcionar son la altura de ola significativa, periodo medio y ángulo de inclinación del talud. Las formulaciones de Allsop y Zanuttigh y van der Meer fueron utilizadas para el cálculo del coeficiente de reflexión en este apartado (Figura 75 y Figura 76).

Para la expresión de Allsop adicional a los datos generales, el usuario deberá de seleccionar el tipo de manto principal (Figura 75).

PARÁMETROS DE DISEÑO: REFLEXIÓN

Selección del número de capas

Número de capas ▾

Coeficiente de reflexión Cr =

Estructuras con núcleo permeable

Coeficiente de reflexión Cr =

OLEAJE IRREGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m)

Periodo medio de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren =

ALLSOP

Selección del tipo de manto principal

Tipo de manto principal ▾

Coeficiente de reflexión Cr =

Figura 75 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación)

El coeficiente de reflexión con la ecuación de Zanuttigh y van der Meer se puede calcular para estructuras permeables no rebasable, estructuras rebasables y sumergidas, y que a su vez cada tipo de estructura puede ser de roca o elementos prefabricados (Figura 76). Por lo anterior, el usuario deberá de seleccionar el tipo de material o tipo de elemento prefabricado e ingresar el franco bordo y altura de ola al pie de la estructura según corresponda.

PARÁMETROS DE DISEÑO: REFLEXIÓN

ZANUTTIGH Y VAN DER MEER

ESTRUCTURAS PERMEABLES NO REBASABLES

Selecciona el tipo de material

Tipo de material ▼

Coeficiente de reflexión Cr =

Elementos prefabricados

Selecciona el tipo de elementos

Tipo de elementos ▼

Coeficiente de reflexión Cr =

ESTRUCTURAS REBASABLES Y SUMERGIDAS

Ingresa los siguientes datos

francobordo (m)

Altura de ola significativa a pie de la estructura (m)

Rc/Hst =

Selecciona el tipo de material

Tipo de material ▼

Coeficiente de reflexión Cr =

Elementos prefabricados

Selecciona el tipo de elementos

Tipo de elementos ▼

Coeficiente de reflexión Cr =

Figura 76 Ventana para el cálculo de Reflexión (continuación)

DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD

La última venta que conforma la interfaz gráfica es la correspondiente al diseño de estructuras en talud, en la cual se calcula el peso de las piezas que conforman la coraza de dicha estructura. Las formulaciones programadas, Hudson, Losada y Giménez-Curto y van der Meer, son solamente para oleaje regular.

Al igual que en los parámetros de diseño, esta ventana tiene el apartado de **“INGRESO DE DATOS GENERALES”**, en el que el usuario ingresa la altura de ola, el peso volumétrico del material de la coraza y el peso volumétrico del agua marina (Figura 77).

En la expresión de Hudson, es necesario que el usuario introduzca el coeficiente de estabilidad y cota (Figura 78) de acuerdo con la tabla se muestra en la Figura 77.

DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD

OLEAJE REGULAR REGRESAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola (m)

Peso volumétrico del material de la coraza (Ton/m3)

Peso volumétrico del agua marina (Ton/m3)

Sr

HUDSON

Estructuras no rebasables con núcleo impermeable y daño nulo
 Ingresa los siguientes datos apartir de la tabla que se muestra a continuación

Tipo de elemento	No. de elementos de la coraza	Colocación	Cuerpo		Morro		cota
			Rompe delante de la	Rompe sobre el	sí	no	
Elementos naturales							
Lisa redondeada	2	Aleatoria	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3
Lisa redondeada	>3	Aleatoria	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	1	Aleatoria	N/D	2.9	N/D	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Aleatoria	2	4	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2
					1.3	2.3	3
Rugosa y angular	>3	Aleatoria	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Especial	5.8	7	5.3	6.4	1.5 a 3
Paralelepípedo	2	Especial	7 a 20	8.5 a 24	N/D	N/D	1 a 3
			7	8.5			
Elementos artificiales							
Tetrápodos y cuadrípodos	2	Aleatoria	7	8	5	6	1.5
					4.5	5.5	2
					3.5	4	3
Tribar	2	Aleatoria	9	10	8.3	9	1.5
					7.8	8.5	2
Dolos	2	Aleatoria	15	31	6	6.5	3
					8	16	2
Cubos modificados	2	Aleatoria	6.5	7.5	N/D	5	1.5 a 3
Hexápodos	2	Aleatoria	8	9.5	5	7	1.5 a 3
Toskana	2	Aleatoria	11	22	N/D	N/D	1.5 a 3
Tribar	1	Uniforme	12	15	7.5	9.5	1.5 a 3

Figura 77 Ventana para el diseño de estructuras en talud

Para calcular el peso de los elementos con la ecuación de Losada y Giménez-Curto y la de van der Meer, es necesario que el usuario proporcione el periodo de la ola y calcule la longitud de onda (Figura 78).

En la formulación de Losada y Giménez-Curto, el usuario deberá de seleccionar el tipo de pieza que conformará la coraza de la estructura (Figura 78).

The screenshot shows a software window titled "DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD". The window contains several input fields and buttons:

- Input field for "cota" with an equals sign button.
- Input field for "kd" with an equals sign button.
- Input field for "W50 (Ton)" with an equals sign button.
- Section header: "Ingresa los siguientes datos"
- Input field for "Periodo de la ola (s)" with an equals sign button.
- Input field for "Longitud de onda (m)" with an equals sign button.
- Section header: "LOSADA Y GIMENEZ-CURTO"
- Text: "Selecciona el tipo de pieza"
- Dropdown menu for "Tipo de pieza".
- Input field for "Número de Iribarren" with an equals sign button.
- Input field for "W50 (Ton)" with an equals sign button.

Figura 78 Ventana para el diseño de estructuras en talud (continuación)

Con la expresión de van der Meer el peso de los elementos se puede calcular para aguas profundas y para aguas someras. Es necesario que el usuario ingrese el número de olas del estado de mar, la pendiente, el parámetro de daño y que además seleccione el coeficiente de permeabilidad (Figura 79).

DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD

VAN DER MEER

Ingresa los siguientes datos

Número de olas del estado de mar ($1000 < N < 7000$)

Selecciona el coeficiente de permeabilidad

Coeficiente de permeabilidad

Ingresa la pendiente y el valor de daño de acuerdo con la siguiente tabla

Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
1:1.5	2	3 - 5	8
1:2	2	4 - 6	8
1:3	2	6 - 9	12
1:4	3	8 - 12	17
1:6	3	8 - 12	17

Pendiente 1 a:

Parámetro de daño

Número de Iribarren

Número de Iribarren Crítico

Selecciona el tipo de agua

Aguas Profundas Aguas Someras

Ns

W50 (Ton)

Figura 79 Ventana para el diseño de estructuras en talud (continuación)

4.2. Validación de la programación

Un problema presente en la programación son los errores no previstos que distorsionan la ejecución de dicho programa, en este caso, esos errores se presentan si el usuario llegara a ingresar un carácter no numérico. Por lo anterior se validó la programación de los parámetros de diseño mediante excepciones, es decir, que cuando el usuario no ingrese un número o ingrese por error una letra o algún símbolo, en la interfaz gráfica se mostrarán mensajes indicando que no se ingresó un valor numérico y se borra dicho carácter (Figura 80) en cuanto se quiera calcular el parámetro inmediato posterior (al presionar "=").

Figura 80 Excepciones (caracteres no numéricos)

Adicionalmente, en la interfaz gráfica se muestran mensajes para cuando los datos de altura de ola, periodo, ángulos de inclinación, etc. son mayores a valores previamente establecidos, dado que en la realidad no exceden esos valores. Por ejemplo, el valor máximo para la altura de ola es de 20 m y para el periodo son 18 s, el ángulo máximo del talud es de 90° (Figura 81).

Figura 81 Excepciones (valores máximos)

En el cálculo de algunos parámetros de diseño, al seleccionar el tipo de superficie, elementos, etc., están asociados los valores de parámetros o coeficientes necesarios para el cálculo; sin embargo, existen algunas otras listas desplegables que cuando el usuario seleccione determinado elemento, aparecerá un cuadro de diálogo en el que se deberá de ingresar un valor (dentro de un rango preestablecido). Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 82.

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP

OLEAJE IRREGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m)

Período pico de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) = 83.2

Número de Iribarren Irp = 4

TALUDES IMPERMEABLES

Selección el tipo de superficie

Selección el porcentaje de e

Ru2% Ru33%

BATTJES

Run up (m) =

Entrada

Ingresa el factor de reducción (0.55 y 0.6)

Aceptar Cancelar

Figura 82 Excepciones (rangos de valores)

En algunas de las formulaciones existen restricciones en cuanto a los rangos de los resultados que son válidos, por lo que se muestra un mensaje en caso de que las expresiones no apliquen para los valores ingresados (Figura 83).

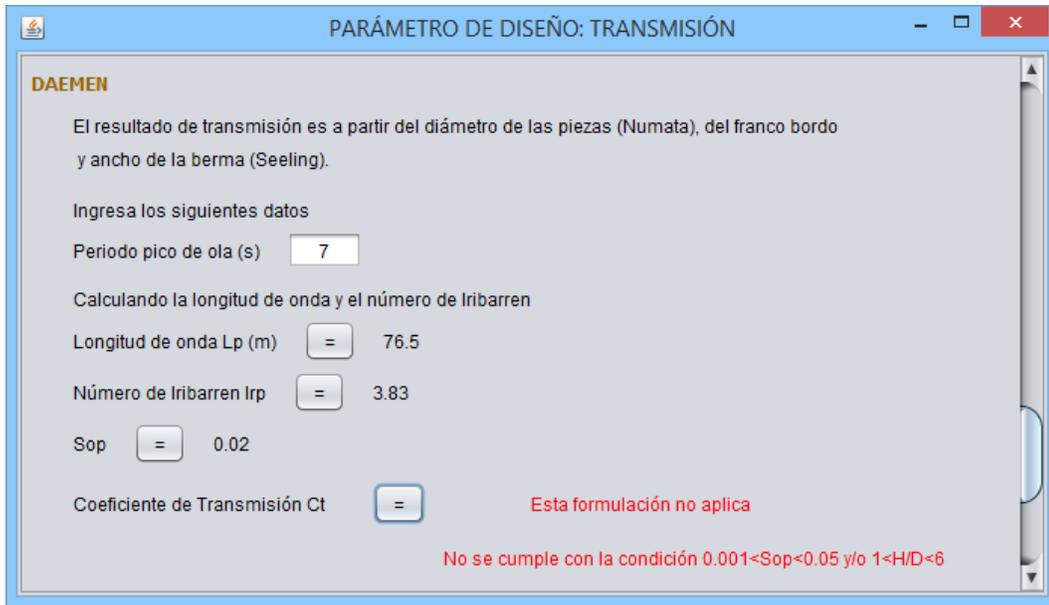


Figura 83 Excepciones (formulación no aplicable)

Como parte de la validación de la programación, también se verificó que los resultados de los parámetros obtenidos en la interfaz gráfica fueran correctos, esto se hizo en una hoja de cálculo (archivo xlsx) y se compararon los resultados programados en NetBeans. En la hoja de cálculo se ingresaron valores aleatorios (dentro de los rangos establecidos) para todas las formulaciones programadas. Como ejemplo se muestra la Figura 84, en la que se pueden observar los datos (en color verde), cálculo de parámetros auxiliares (en color verde) y el resultado, en este caso, del Run Up (subrayado con azul).

DATOS								
h= 4								
t= 8								
ang= 30								
L= 99.92								
Ir 2.89								
RUN UP								
Tipo de dique	Au	Bu	n	Material	LOSADA			AHRENS
					Run up	a	b	Run up
Homogeneo	0.65764	-0.84064	0.56	Dolo	2.40	1.05690406	1.548768	2.23
	0.94	-0.7465	0.5	Tetrapodos	3.32	1.33114849	1.31025	3.21
	1.08118	-0.69943	0.47	Cubo	3.75	1.4086053	1.190991	3.66
	1.4106	-0.5896	0.4	Roca clas	4.61	1.4346498	0.91272	4.56
	1.83414	-0.44839	0.31	Roca sin clas	5.32	1.14992014	0.554943	5.10
Impermeable	1.202	-0.57924	0.56	Dolo	3.90	1.10637238	0.732276	4.10
	1.4315	-0.5085	0.5	Tetrapodos	4.41	1.12337478	0.64845	4.52
	1.54625	-0.47313	0.47	Cubo	4.61	1.11794838	0.606537	4.69
	1.814	-0.3906	0.4	Roca clas	4.91	1.06917816	0.50874	5.00
	2.15825	-0.28449	0.31	Roca sin clas	4.83	0.93219303	0.383001	5.11

Figura 84 Verificación de resultados

4.3. Ejemplo de cálculo

Como parte final del caso práctico, se muestran ejemplos de cálculo de los parámetros de diseño para estructuras de protección costera. Los ejemplos de cálculo solamente se muestran para dos formulaciones de cada parámetro.

Run Up

Los ejemplos mostrados en este apartado son tanto para oleaje regular como para oleaje irregular. Para calcular el run up en oleaje regular se utilizaron los siguientes datos:

- Altura de ola de 1.3 metros
- Periodo de la ola de 7.3 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 26.56°

El resultado, utilizando la expresión de Losada y Giménez-Curto, es de 1.32 m para una estructura homogénea de cubos (Figura 85)

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP". The window contains a form for calculating the Run Up for regular waves. The form is divided into several sections:

- OLEAJE REGULAR**: A button labeled "REGRESAR" is located in the top right corner.
- INGRESO DE DATOS GENERALES**: This section contains three input fields:
 - Altura de ola (m): 1.3
 - Periodo de ola (s): 7.3
 - Ángulo de inclinación del talud (grados): 26.56
- Below the input fields, there is a text label: "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren".
- Below this label, there are two calculated values:
 - Longitud de onda (m): = 83.2
 - Número de Iribarren: = 4
- Selección de material y estructura**:
 - "Selecciona el tipo de material": A dropdown menu showing "Cubos".
 - "Selecciona el tipo de estructura": Two radio buttons, "Estructuras homogéneas" (selected) and "Estructuras impermeables".
- LOSADA Y GIMENEZ-CURTO**: This section shows the final result:
 - Run up (m): = 1.32

Figura 85 Cálculo de run up (oleaje regular)

Para calcular el run up en oleaje irregular se utilizó:

- Altura de ola de 1.3 metros
- Periodo pico de la ola de 8 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 26.56°

Para una estructura de talud impermeable, de una capa de roca, con un factor de reducción de 0.6 y con un porcentaje de excedencia del 33%, el run up es de 2.48 m de acuerdo con la ecuación de Battjes (Figura 86 y la Figura 87).

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP". It is divided into several sections:

- OLEAJE IRREGULAR**: This section contains the "INGRESO DE DATOS GENERALES" where the following values are entered:
 - Altura de ola significativa (m): 1.3
 - Periodo pico de ola (s): 8
 - Ángulo de inclinación del talud (grados): 26.56
- Below these inputs, it states "Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren" and shows calculated results:
 - Longitud de onda (m): = 99.92
 - Número de Iribarren I_{rp}: = 4.38
- TALUDES IMPERMEABLES**: This section includes a dropdown menu for "Selecciona el tipo de superficie" set to "1 capa de roca (Hs/D=1.5-3...)" and radio buttons for "Selecciona el porcentaje de excedencia" with "Ru33%" selected.
- BATTJES**: At the bottom, there is a "Run up (m)" field with an equals sign button.

An "Entrada" dialog box is overlaid on the main window, containing a question mark icon and the text "Ingresa el factor de reducción (0.55 y 0.6)". The input field in the dialog contains the value "0.6", and there are "Aceptar" and "Cancelar" buttons at the bottom.

Figura 86 Cálculo de run up (oleaje irregular)

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN UP". It is divided into three sections:

- OLEAJE IRREGULAR**
 - INGRESO DE DATOS GENERALES**
 - Altura de ola significativa (m): 1.3
 - Periodo pico de ola (s): 8
 - Ángulo de inclinación del talud (grados): 26.56
 - Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren
 - Longitud de onda (m): = 99.92
 - Número de Iribarren Irp: = 4.38
 - TALUDES IMPERMEABLES**
 - Selección de superficie: 1 capa de roca (Hs/D=1.5-3.0)
 - Selección de porcentaje de excedencia: Ru2% (unselected) and Ru33% (selected)
 - BATTJES**
 - Run up (m): = 2.48

Figura 87 Cálculo de run up (oleaje irregular)

Run Down

De manera similar que en el run up, se presenta un ejemplo de cálculo para oleaje regular e irregular. En oleaje regular los datos utilizados para calcular el run down son:

- Altura de ola de 1.3 metros
- Periodo de la ola de 7.3 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 26.56°

Siendo de los el tipo de material, el resultado obtenido con formulación Losada y Giménez-Curto es de 0.14 m (Figura 88).

The screenshot shows a software window titled "PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN". The window contains two main sections: "OLEAJE REGULAR" and "LOSADA Y GIMENEZ-CURTO".

OLEAJE REGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola (m)

Periodo de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren =

LOSADA Y GIMENEZ-CURTO

Selecciona el tipo de material

Run down (m) =

A "REGRESAR" button is located in the top right corner of the window.

Figura 88 Cálculo de run down (oleaje regular)

Los datos utilizados para oleaje irregular son:

- Altura de ola de 1.3 metros
- Periodo pico de la ola de 8 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 26.56°
- Periodo medio de 7.5 segundos
- Porosidad $n=0.1$

Con los datos anteriores se obtuvo un run down de 1.63 m, para taludes impermeables, de acuerdo con la expresión de van der Meer (Figura 89 y Figura 90).

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN

OLEAJE IRREGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m)

Periodo pico de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m)

Número de Iribarren Irp

Figura 89 Cálculo de run down (oleaje irregular)

PARÁMETRO DE DISEÑO: RUN DOWN

TALUDES PERMEABLES

VAN DER MEER

Ingresa los siguientes datos

Periodo medio de ola (s)

Calculando la longitud de onda y número de Iribarren

Longitud de onda (m)

Número de Iribarren Irméd

Run down 2% (m)

Figura 90 Cálculo de run down (oleaje irregular)

Rebase

Los ejemplos de cálculo son con las ecuaciones de Owen y Aminti y Franco. Los datos ingresados son los siguientes:

- Altura de ola significativa de 1.3 metros
- Periodo medio de la ola de 7.3 segundos
- Francobordo de 2 metros

Para la formulación de Owen se seleccionó un talud 1:2 y una superficie lisa impermeable, obteniéndose gasto medio de rebase de 0.2238 l/s (Figura 91).

PARÁMETRO DE DISEÑO: REBASE

INGRESO DE DATOS GENERALES REGRESAR

Altura de ola significativa (m)

Periodo medio de ola (s)

Francobordo o bordo libre

Calculando Smo

Som 0.02

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Selecciona la pendiente

Longitud de onda (m) 83.2

Número de Iribarren 4

Selecciona el tipo de superficie

OWEN

Taludes impermeables rectos, lisos y olas no limitadas por fondo

Calculando el franco bordo adimensional, gasto adimensional y gasto medio de rebase

Francobordo adimensional 0.08

Gasto Adimensional 0.0024

Gasto medio de Rebase (l/s) 0.22381

Figura 91 Cálculo del rebase

El gasto medio de rebase obtenido con la expresión de Aminti y Franco es de 0.00273 l/s con cota= 2 y una relación del ancho de la corona y la altura de ola de 1.1 para una estructura de roca impermeable con superestructura.

PARÁMETRO DE DISEÑO: REBASE

AMINTI Y FRANCO

Taludes impermeables con superestructuras

Selecciona la cota

cota=2 cota= 1.33

Selecciona la relación G/Hs

G/Hs= 1.1

Selecciona el tipo de material

Roca

Francobordo adimensional	=	0.12
Gasto Adimensional	=	0.00003
Gasto medio de Rebase (l/s)	=	0.00273

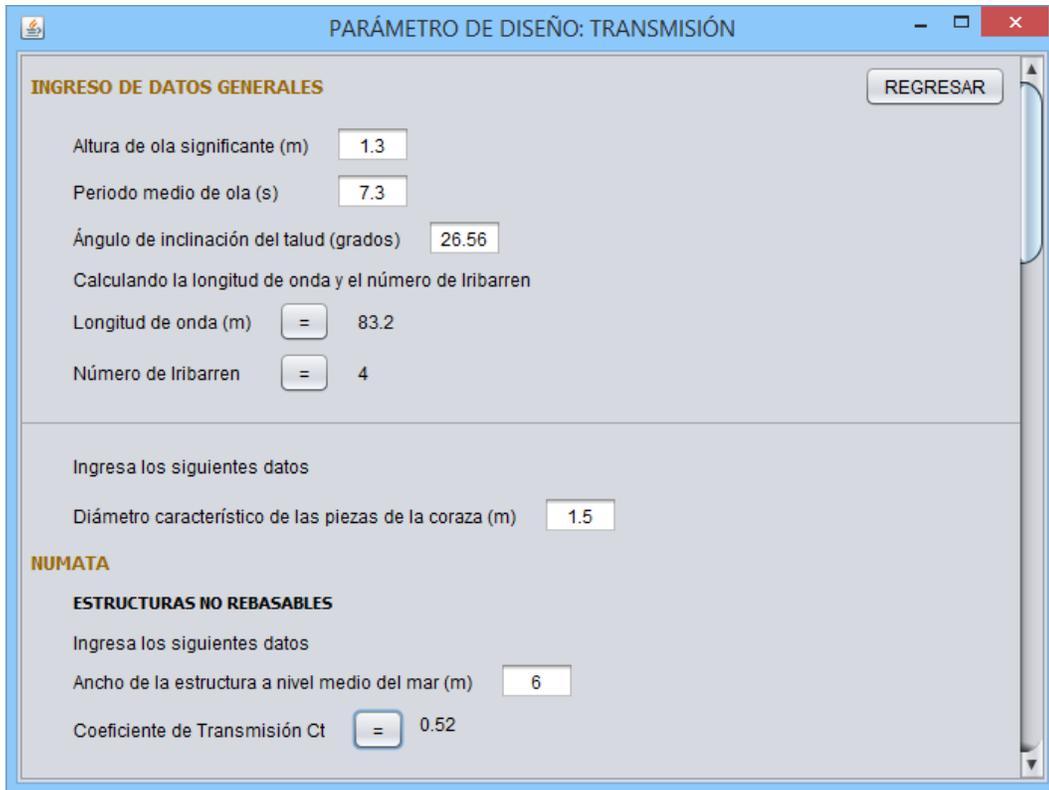
Figura 92 Cálculo del rebase (continuación)

Transmisión

Para la transmisión se muestra el cálculo con las ecuaciones de Numata y Seeling. Los datos utilizados son:

- Altura de ola significativa de 1.3 metros
- Periodo medio de la ola de 7.3 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 26.56°
- Diámetro característico de las piezas de 1.5 metros

Con el ancho a nivel medio del mar de 6 m de una estructura no rebasable, y con los datos anteriores se obtiene un coeficiente de transmisión de 0.52.



PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m)

Periodo medio de ola (s)

Ángulo de inclinación del talud (grados)

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) =

Número de Iribarren =

Ingresar los siguientes datos

Diámetro característico de las piezas de la coraza (m)

NUMATA

ESTRUCTURAS NO REBASABLES

Ingresar los siguientes datos

Ancho de la estructura a nivel medio del mar (m)

Coefficiente de Transmisión Ct =

Figura 93 Cálculo de la transmisión

Al ingresar un francobordo de 2 m, ancho de la berma de 1.5 m, run up de 1.3 m y una altura total de la estructura de 12 m, no se puede obtener el coeficiente de transmisión con la formulación de Seeling, debido a que no se cumple con la condición de que la relación del francobordo y el run up debe de ser menor a uno (Figura 94).



PARÁMETRO DE DISEÑO: TRANSMISIÓN

Ingresar los siguientes datos

Francobordo o bordo libre (m)

Ancho de la berma (m)

SEELING

Ingresar los siguientes datos

Ascenso máximo teórico Run Up (m)

Altura total de la estructura (m)

Coefficiente de Transmisión Ct =

Esta formulación no aplica

No se cumple con la condición $R_c/R_u < 1$

Figura 94 Cálculo de la transmisión (continuación)

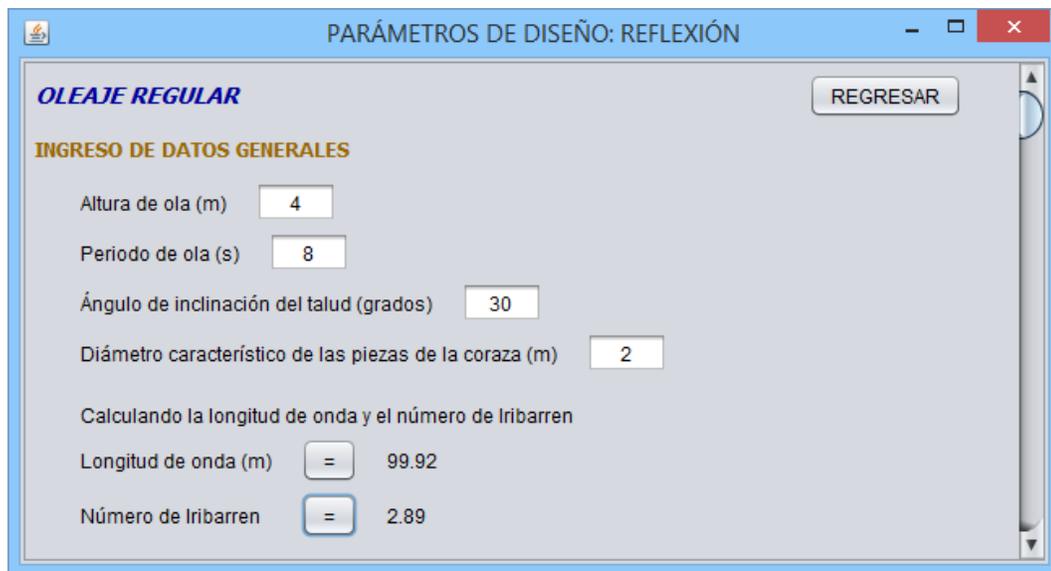
Reflexión

Para el cálculo del coeficiente de reflexión se tiene oleaje regular e irregular, y se muestra que en la interfaz gráfica se pueden ingresar datos diferentes, es decir, que la altura y periodo de la ola no tiene que ser la misma en oleaje regular y en oleaje irregular.

Los datos generales para el cálculo con oleaje regular son:

- Altura de ola significativa de 4 metros
- Periodo medio de la ola de 8 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 30°
- Diámetro característico de las piezas de 2 metros

Considerando que se trata de una estructura vertical porosa de roca sin clasificar, que el ancho de la berma es de 4 m, que la profundidad al pie de la estructura es de 10 m, se obtiene un coeficiente de reflexión de 0.35 con la expresión de Numata (Figura 95 y Figura 96).



The screenshot shows a software window titled "PARÁMETROS DE DISEÑO: REFLEXIÓN". Inside the window, there is a section titled "OLEAJE REGULAR" with a "REGRESAR" button. Below this is the "INGRESO DE DATOS GENERALES" section, which contains several input fields and calculated values:

Parameter	Value
Altura de ola (m)	4
Periodo de ola (s)	8
Ángulo de inclinación del talud (grados)	30
Diámetro característico de las piezas de la coraza (m)	2
Longitud de onda (m)	99.92
Número de Iribarren	2.89

Figura 95 Cálculo de la reflexión

NUMATA

ESTRUCTURAS VERTICALES POROSAS

Ingresa los siguientes datos

Ancho de la berma (m) 4

Profundidad a pie de la estructura (m) 10

H/L = 0.04

B/D = 2

h/L = 0.1

Selecciona el tipo de material

Roca sin clasificar Tetrápodos

Coeficiente de reflexión Cr = 0.35

Figura 96 Cálculo de la reflexión (continuación)

Los datos generales para el cálculo del coeficiente de reflexión con oleaje irregular son:

- Altura de ola significativa de 1.5 metros
- Periodo medio de la ola de 7 segundos
- Ángulo de inclinación del talud 45°

EL coeficiente de reflexión calculado con la ecuación de Allsop es de 0.55 para una estructura con dos capas de roca como manto principal (Figura 97).

PARÁMETROS DE DISEÑO: REFLEXIÓN

OLEAJE IRREGULAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola significativa (m) 1.5

Periodo medio de ola (s) 7

Ángulo de inclinación del talud (grados) 45

Calculando la longitud de onda y el número de Iribarren

Longitud de onda (m) = 76.5

Número de Iribarren = 7.14

ALLSOP

Selecciona el tipo de manto principal

Roca (2 capas)

Coeficiente de reflexión Cr = 0.55

Figura 97 Cálculo de la reflexión (continuación)

Diseño de estructuras

Los ejemplos de diseño de estructuras en talud son utilizando las formulaciones de Hudson y Losada y Giménez-Curto. En este ejemplo los datos utilizados para el cálculo son:

- Altura de ola 1.5 metros
- Peso volumétrico del material de la coraza de 2.2 ton/m³
- Peso volumétrico del agua marina de 1.03 ton/m³

En la expresión de Hudson se ingresó una cota= 1.5 y un coeficiente de estabilidad de 1.2, considerando que se trata del cuerpo de la estructura y que la ola rompe, se obtuvo un peso de 2.81 ton (Figura 98 y Figura 99).

DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD

OLEAJE REGULAR REGRESAR

INGRESO DE DATOS GENERALES

Altura de ola (m)

Peso volumétrico del material de la coraza (Ton/m3)

Peso volumétrico del agua marina (Ton/m3)

Sr 2.14

HUDSON

Estructuras no rebasables con núcleo impermeable y daño nulo
 Ingresa los siguientes datos apartir de la tabla que se muestra a continuación

Tipo de elemento	No. de elementos de la coraza	Colocación	Cuerpo		Morro		cota
			Rompe delante de la	Rompe sobre el	sí	no	
Elementos naturales							
Lisa redondeada	2	Aleatoria	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3
Lisa redondeada	>3	Aleatoria	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	1	Aleatoria	N/D	2.9	N/D	2.3	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Aleatoria	2	4	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2
					1.3	2.3	3
Rugosa y angular	>3	Aleatoria	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5 a 3
Rugosa y angular	2	Especial	5.8	7	5.3	6.4	1.5 a 3
Paralelepípedo	2	Especial	7 a 20	8.5 a 24	N/D	N/D	1 a 3
			7	8.5			
Elementos artificiales							
Tetrápodos y cuadrípodos	2	Aleatoria	7	8	5	6	1.5
					4.5	5.5	2
					3.5	4	3
Tribar	2	Aleatoria	9	10	8.3	9	1.5
					7.8	8.5	2
					6	6.5	3
Dolos	2	Aleatoria	15	31	8	16	2
					7	14	3
Cubos modificados	2	Aleatoria	6.5	7.5	N/D	5	1.5 a 3
Hexápodos	2	Aleatoria	8	9.5	5	7	1.5 a 3
Toskana	2	Aleatoria	11	22	N/D	N/D	1.5 a 3
Tribar	1	Uniforme	12	15	7.5	9.5	1.5 a 3

Figura 98 Ejemplo de diseño de estructuras en talud

Se ingresó en la ecuación de Losada y Giménez-Curto un periodo de ola de 7 s y se seleccionó como tipo de pieza roca sin clasificar con daño nulo y una cota de 2.5, por lo que se obtuvo un peso de 0.59 ton (Figura 99).

The screenshot shows a software window titled "DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN TALUD". The interface includes several input fields and calculation buttons:

- Input field for "cota" with the value 1.5.
- Input field for "kd" with the value 1.2.
- Calculation button "=" next to "W50 (Ton)" resulting in 2.81.
- Section header "Ingresa los siguientes datos".
- Input field for "Periodo de la ola (s)" with the value 7.
- Calculation button "=" next to "Longitud de onda (m)" resulting in 76.5.
- Section header "LOSADA Y GIMENEZ-CURTO".
- Text "Selecciona el tipo de pieza".
- Dropdown menu showing "Roca sin clasificar (Daño nulo), cota=2.5".
- Calculation button "=" next to "Número de Iribarren" resulting in 2.86.
- Calculation button "=" next to "W50 (Ton)" resulting in 0.59.

Figura 99 Ejemplo de diseño de estructuras en talud (continuación)

5. Conclusiones y recomendaciones

En el primer capítulo se presentaron las clasificaciones de las estructuras de protección costera, de acuerdo con su geometría (de talud con pendientes, talud vertical, mixto, horizontales de sección compuesta), desde el punto de vista de comportamiento estructural (flexible, rígida), de acuerdo con la forma en la que disipan el oleaje (sumergida, flotante, hidráulica), por el tipo de material (enrocamiento, elementos artificiales), así como el objetivo que tienen (rompeolas, rompeolas paralelos a la costa, escolleras, espigones, etc.). La selección del tipo de estructura dependerá las necesidades que se tengan o del problema a solucionar, de las condiciones físicas, de los recursos económicos, etc.; de ahí la importancia de este capítulo, pues presenta las características generales de los tipos de estructuras para facilitar la selección.

En el segundo capítulo se describió la interacción del oleaje con una estructura marítima, es decir, los fenómenos relacionados con el flujo en y sobre las estructuras (ascenso máximo, descenso máximo, rebase, transmisión y reflexión). La importancia de estos fenómenos radica en que sirven para diseñar las estructuras y en este trabajo fueron denominados parámetros de diseño; además se presentaron algunas formulaciones de diferentes autores para estimar el valor de estos parámetros. Es importante mencionar que estas formulaciones no son de aplicación general, pues algunas de ellas se obtuvieron a partir de ensayos de laboratorio y con determinadas condiciones de oleaje, pendientes, materiales, etc.

En el tercer capítulo se presentó la clasificación de las cargas a la que está sometida una estructura marítima, los tipos de fallas y averías que se pueden presentar, que a su vez afectan su estabilidad. A partir de los criterios de avería se determina el grado de daño de las estructuras y se considera para el diseño de las estructuras en talud. En este capítulo también se presentaron expresiones para el diseño de estructura en talud, así como de estructuras sumergidas y rebasables que consiste en la determinación del peso de los elementos; también se presentaron las expresiones para el diseño de estructuras verticales, mixtas y con espaldón que consiste en determinar los esfuerzos sobre la estructura.

Respecto al cuarto capítulo se puede concluir que se cumplió con el objetivo de este trabajo, pues se generó la herramienta que facilita el cálculo de los parámetros de diseño para estructuras de protección costera. Esta herramienta consiste en una interfaz gráfica generada en un entorno de desarrollo integrado (IDE) denominado NetBeans, que consiste en una ventana principal y seis ventanas secundarias que corresponden a los parámetros de diseño (run up, run down, rebase, transmisión y flexión) y al diseño de estructuras en talud. En este capítulo se describe la validación de la programación y finalmente se presentan algunos ejemplos de cálculo.

Es importante mencionar que el resultado de este trabajo es solamente una herramienta de cálculo, por lo que el usuario deberá de tener los conocimientos básicos de las restricciones

de cada una de las formulaciones, y con base en eso y el tipo de estructuras, así como de las condiciones oceanográficas decidirá cuál es la que mejor se adapta a sus necesidades.

En cuanto al uso de la interfaz gráfica, se recomienda que cuando se requiera realizar más de un cálculo de un parámetro de un mismo autor se regrese a la ventana principal y se vuelvan a ingresar los datos requeridos.

Como una extensión del trabajo se podría desarrollar otra herramienta de cálculo para estructuras verticales, mixtas y con espaldón.

6. Fuentes de Consulta

- **Dirección de Obras Portuarias/Ministerio de obras Públicas/Chile, 2013.** Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras. Volumen 2: Diseño, Parte II (5 volúmenes).
- **Universidad de Cantabria y Ministerio del Medio Ambiente, 2000** Documento de Referencia. Volumen III Obras (3 volúmenes).
- **Instituto Politécnico Nacional, 2008.** Puertos Marítimos y Dragado. Seminario de titulación.
- **Peña Martínez, Porfirio, 2000.** Diseño hidráulico y geométrico de marinas o puertos deportivos.
- **Quiñones Huerta José Luis, 2006.** Estabilidad de dique en talud.
- **Depardon Sotelo, Francisco, 2000.** Diseño integral de diques rompeolas.
- **Silva Casarín, Rodolfo, 2015.** Visión General de la Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Apuntes de clase.
- **Macdonel Martínez, Guillermo; Pindter Vega, Julio; Herrejón de la Torre, Luis; Pizá Ortiz, Juan y López Gutiérrez, Héctor, 1999.** Ingeniería Marítima y Portuaria. Ed. Alfaomega.
- **Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Puertos Mexicanos, 1992.** Manual de Dimensionamiento Portuario.
- **Comisión Federal de Electricidad, 2014.** "Manual de diseño de obras civiles. Cap.As.17 Obras Marítimas: TOMO IV".
- **Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, 2004.** El manejo costero en México.
- **López Gutiérrez, Hector y AMIP, 2008.** Planeación de la Infraestructura Costera Mexicana.
- **Moreno-Casosola, Patricia y Peresbarbosa Rojas, Elisa.** Manejo Integral de la Zona Costera.

- **Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas y SEMARNAT, 2012.** Política Nacional de Mares y Costas de México. Gestión integral de las regiones más dinámicas del territorio nacional.
- **Salles Afonso de Almeida, Paulo, Silva Casarín Rodolfo, 2004.** El manejo costero en México. Capítulo 13 Infraestructura de protección costera (47 capítulos).