



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE DEFLECTORES DE OLEAJE PARA ROMPEOLAS DE TALUD

Adriana Guadalupe Porres López
Dora Luz Ávila Arzani
Cindy Casas Valencia
Manuel Mendoza Grande

Publicación Técnica No. 655
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta publicación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por la M. en C. Adriana Guadalupe Porres López, M. en I. Dora Luz Ávila Arzani, Ing. Cindy Casas Valencia y M. en I. Manuel Mendoza Grande.

Esta publicación es el producto final del proyecto de investigación de iniciativa interna VI-18/20 “Desarrollo de una metodología para el dimensionamiento de deflectores de oleaje para rompeolas de talud”.

Se agradece la colaboración en esta publicación al Dr. José Miguel Montoya Rodríguez.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	ix
Sinopsis.....	xiii
Abstract.....	xv
Resumen Ejecutivo	xvii
Introducción.....	1
1 Establecimiento del estado del arte.....	3
2 Definición de la metodología de diseño del deflector	11
3 Definición de la rutina computacional para el diseño geométrico del deflector	23
4 Diseño geométrico del deflector de oleaje	29
5 Estudios en modelo hidráulico	51
6 Análisis e interpretación de resultados.....	77
Conclusiones.....	81
Bibliografía	83

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1 Distribución de presiones sobre el deflector.....	3
Figura 1.2 Esquema de cálculo del “run-up”.	4
Figura 1.3 Método de Bradbury, A y Allsop, N. valores de los parámetros empíricos y geométricos ensayadas.....	6
Figura 1.4 Región de aplicación para casos con números de Iribarren inferior a 3.	7
Figura 1.5 Diagrama de subpresiones del método de Berenguer y Baonza.	8
Figura 2.1 Parámetros geométricos del dique.....	13
Figura 2.2 Fenómenos de run-up y overtopping.	14
Figura 2.3 Diagrama del dimensionamiento de la curvatura de deflectores de oleaje típicos.....	18
Figura 2.4 Gráfica de la correlación dimensional del lado A del deflector de oleaje.	18
Figura 2.5 Gráfica de la correlación dimensional del lado B del deflector de oleaje.	19
Figura 2.6 Gráfica de la correlación dimensional del lado C del deflector de oleaje.	19
Figura 2.7 Gráfica de la correlación dimensional del lado D del deflector de oleaje.	20
Figura 2.8 Gráfica de la correlación dimensional del lado E del deflector de oleaje.	20
Figura 2.9 Gráfica de la correlación dimensional del lado F del deflector de oleaje.	21
Figura 3.1 Diagrama de flujo para el desarrollo de la rutina computacional del dimensionamiento geométrico del deflector de oleaje.....	23

Figura 3.2 Parámetros geométricos definidos para el diseño de un rompeolas.	24
Figura 4.1 Definición de la zona de estudio en el rompeolas de puerto de Ensenada, B.C.	29
Figura 4.2 Planteamiento de la problemática en el rompeolas de puerto de Ensenada, B. C.	30
Figura 4.3 Secciones transversales del proyecto ejecutivo del rompeolas de Ensenada.	31
Figura 4.4 Ubicación del nodo en coordenadas 31.5° latitud Norte, 117°.0 longitud.	32
Figura 4.5 Representación gráfica de la relación de las alturas de ola contra períodos de retorno, distribución de Frechet correlación 0.9722.	40
Figura 4.6 Gráfico de estimación del índice de ascenso S_i	41
Figura 4.7 Velocidad máxima de translación de ciclones para el Pacífico Nororiental (km/h).	42
Figura 4.8 Velocidad media de translación de ciclones para el Pacífico Nororiental (km/h).	42
Figura 4.9 Dirección de translación (media y variabilidad) para ciclones tropicales para el Pacífico Nororiental (°).	43
Figura 4.10 Nomograma para determinar el factor de ajuste.	43
Figura 4.11 Nomograma para determinar la relación $H_B/H_{1/3}$	44
Figura 4.12 Diagrama del dimensionamiento geométrico de la curvatura del deflector.	49
Figura 4.13 Impresión de pantalla de resultados del dimensionamiento geométrico del deflector para el morro del rompeolas de Ensenada, B. C.	50
Figura 5.1 Sección transversal del morro del rompeolas del puerto de Ensenada, B. C., para los ensayos en modelo hidráulico.	51
Figura 5.2 Trazo y nivelación de la losa de fondo y sección transversal a ensayar.	54
Figura 5.3 Selección y pesaje de los materiales para la construcción de la sección transversal.	54

Figura 5.4 Procesos de hechura de las cimbras de los deflectores de oleaje a ensayar.	55
Figura 5.5 Proceso de calado de los deflectores de oleaje a ensayar.	55
Figura 5.6 Aplicación de pintura a los deflectores de oleaje diseñados para las pruebas experimentales.	56
Figura 5.7 Construcción de capas de la sección transversal de morro a ensayar.	56
Figura 5.8 Sección transversal de morro estructuralmente preparada para los ensayos.	57
Figura 5.9 Sección transversal de morro estructuralmente preparada para los ensayos.	58
Figura 5.10 Flujograma para la generación, medición y análisis del oleaje en modelo hidráulico.	61
Figura 5.11 Deflectores colocados sobre la sección morro del rompeolas de Ensenada, B. C. para realizar los ensayos en modelo hidráulico.	62
Figura 5.12 Medición de overtopping en modelo hidráulico.	63
Figura 5.13 Medición del accenso del oleaje (run-up) en modelo hidráulico.	64
Figura 5.14 Ubicación de los sensores de medición del oleaje para la determinación de coeficientes de reflexión de oleaje.	65
Figura 5.15 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un período de retorno de 50 años.	68
Figura 5.16 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un período de retorno de 100 años.	70
Figura 5.17 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un período de retorno de 50 años.	71
Figura 5.18 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un período de retorno de 100 años.	73
Figura 5.19 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los períodos de retorno de 50 y 100 años.	75
Figura 5.20 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los períodos de retorno de 50 y 100 años.	76

Figura 6.1 Deflector diseñado geoméricamente mediante la rutina computacional generada. 77

Figura 6.2 Deflector diseñado con las características del proyecto de la prolongación del rompeolas de Ensenada. 78

Figura 6.3 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para los períodos de retorno de 50 y 100 años. 78

Figura 6.4 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los períodos de retorno de 50 y 100 años, para cada uno de los deflectores ensayados. 80

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1 Variables de clima marítimo y geometría del dique rompeolas y deflector.	12
Tabla 2.2 Principales ecuaciones para la estimación del run-up y del gasto medio del rebase del oleaje.	15
Tabla 3.1 Definición de los datos de entrada para la rutina computacional.	24
Tabla 4.1 Resumen de los materiales de las capas que componen la sección transversal de morro del rompeolas de Ensenada, B. C.	31
Tabla 4.2 Distribución de períodos (T_p) por direcciones de oleaje.	34
Tabla 4.3 Distribución de alturas (H_s) por direcciones de oleaje.	34
Tabla 4.4 Distribución de períodos (T_p) por altura de ola (H_s).	34
Tabla 4.5 Distribución de períodos (T_p) por direcciones de oleaje (primavera).	34
Tabla 4.6 Distribución de alturas (H_s) por direcciones de oleaje (primavera).	34
Tabla 4.7 Distribución de períodos (T_p) por altura de ola (H_s) (primavera).	35
Tabla 4.8 Distribución de períodos (T_p) por direcciones de oleaje (verano). .	35
Tabla 4.9 Distribución de alturas (H_s) por direcciones de oleaje (verano). .	35
Tabla 4.10 Distribución de períodos (T_p) por altura de ola (H_s) (verano). .	35
Tabla 4.11 Distribución de períodos (T_p) por direcciones de oleaje (otoño). .	35
Tabla 4.12 Distribución de alturas (H_s) por direcciones de oleaje (otoño). .	35
Tabla 4.13 Distribución de períodos (T_p) por altura de ola (H_s) (otoño). .	36
Tabla 4.14 Distribución de períodos (T_p) por direcciones de oleaje (invierno). .	36

Tabla 4.15 Distribución de alturas (Hs) por direcciones de oleaje (invierno). .	36
Tabla 4.16 Distribución de períodos (Tp) por altura de ola (Hs) (invierno).	36
Tabla 4.17 Distribuciones resultantes del procedimiento de datos del WAVEWATCH III Hindcast phase (NOOA) del nodo 31.5° latitud Norte, 117.0° longitud Oeste.	39
Tabla 4.18 Alturas de ola y período asociados para diferentes períodos de retorno, distribución de Frechet correlación 0.9722.	40
Tabla 4.19 Factores de ajuste para cada dirección de oleaje (Tr=50 años).	44
Tabla 4.20 Factores de ascenso para cada dirección de oleaje (50 años).	45
Tabla 4.21 Amplitud de la marea astronómica.	46
Tabla 4.22 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta Tr para el período de retorno de 50 años.	46
Tabla 4.23 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta Tr para el período de retorno de 100 años.	47
Tabla 4.24 Definición de los datos de entrada para el programa computacional, caso de estudio sección morro del rompeolas de Ensenada.	47
Tabla 4.25 Dimensionamiento de la curvatura del deflector de oleaje para el morro del rompeolas de Ensenada, B. C.	49
Tabla 5.1 Programa de ensayos de la sección morro con período de retorno de 50 años.	58
Tabla 5.2 Programa de ensayos de la sección morro con período de retorno de 100 años.	59
Tabla 5.3 Criterios para el cálculo de la longitud de olas en aguas profundas, intermedias y someras.	65
Tabla 5.4 Resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para un período de 7.57 s, asociado a un período de retorno de 50 años.	67
Tabla 5.5a Resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para un período de 8.57 s, asociado a un período de retorno de 100 años.	69
Tabla 5.5b Continuación de resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para un período de 8.57 s, asociado a un período de retorno de 100 años.	69

Tabla 5.6 Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un período de 7.57 s, para un período de retorno de 50 años.	70
Tabla 5.7a Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un período de 8.57 s, para un período de retorno de 100 años	72
Tabla 5.7b Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un período de 8.57 s, para un período de retorno de 100 años	72
Tabla 5.8 Coeficientes de reflexión obtenidos de los ensayos con período de oleaje de 7.57 s, para un período de 50 años.....	73
Tabla 5.9 Coeficientes de reflexión obtenidos de los ensayos con período de oleaje de 8.57 s, para un período de retorno de 100 años.	74
Tabla 6.1 Resultados de gasto que pasa por rebase de oleaje, obtenidos en modelo hidráulico para períodos de retorno de 50 y 100 años	79
Tabla 6.2 Resultados obtenidos de los ensayos de ascenso del oleaje (run-up), para períodos de retorno de 50 y 100 años.	79

Sinopsis

El estudio se realizó una investigación del estado del arte relacionada con el cambio climático, los factores asociados de interés a la ingeniería costera y se investigaron metodologías que se utilizan para realizar pronósticos del retroceso de la línea de playa debido al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

Se recopiló la información batimétrica, se realizaron trabajos de campo de secciones transversales y de la línea de playa en la zona Norte del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.

Con esta información y los escenarios de incremento del nivel del mar y de oleaje, se seleccionó una metodología con la que se calculó el retroceso de la línea de playa, se calculó el transporte litoral y se recabó información de un modelo de elevación para la zona de estudio para construir un sistema de información geográfica donde se relacionaron los resultados que se obtuvieron y con ello se hicieron las conclusiones y recomendaciones para el presente estudio.

Abstract

The study was conducted as an investigation of the state of the art related to climate change, it were also included the associated factors of interest to coastal engineering and several methodologies that are used to forecast the retreat of the beach line due to the rise in sea level by effect of climate change. Additionally, bathymetric information was collected and field work was carried out on cross sections and on the beach line in the North zone of West breakwater of New Veracruz Port.

With this information and the scenarios of sea level and surge increase, a methodology was selected and the recoil of the beach line was calculated. Littoral transport was also calculated and a model of elevation to build a geographic information system for the area of study was chosen. On the model used, the results obtained were utilized to make the conclusions and recommendations for the present study.

Resumen ejecutivo

La presencia de condiciones oceanográficas cada vez más extremas en nuestro país requiere que la infraestructura portuaria sea cada vez más robusta capaz de soportar dichas condiciones extremas, por ello, con el desarrollo de la presente publicación, se pretende mejorar el diseño de los deflectores de oleaje colocados principalmente en los rompeolas de talud, al identificar una metodología que permita dimensionar al deflector de oleaje adecuado para un proyecto ejecutivo de obras de protección portuaria.

La presente publicación contiene una introducción y siete capítulos, en los que se describen los objetivos y alcances de la presente investigación respecto al entorno en que se desarrolló, así como a los beneficios que se obtuvieron, con el establecimiento del estado del arte, la definición de la metodología de diseño geométrico, la definición de una rutina computacional para el dimensionamiento geométrico de deflectores de oleaje para rompeolas de talud.

Así también, se describe el estudio en modelo físico del comportamiento hidráulico de los diferentes tipos de deflectores de oleaje, realizado en el canal de olas con dimensiones de 50 m de longitud por 0.60 m de ancho y 1.60 m de profundidad del laboratorio de hidráulica marítima del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y se presenta el análisis y la interpretación de los resultados de las pruebas experimentales (ensayos) y del comportamiento para diferentes condiciones de oleaje de cada uno de los deflectores probados en modelo hidráulico.

En el último capítulo se establecen las conclusiones y las recomendaciones correspondientes emitidas para la presente publicación.

Introducción

Derivado de la creciente demanda de infraestructura portuaria en nuestro país, y la presencia de condiciones oceanográficas cada vez más extremas, es necesario que las obras de protección portuaria, sean cada vez más robustas y eficientes, además de económicas.

Por lo anterior, es muy importante analizar el comportamiento hidráulico del deflector de oleaje, el cual consiste en una estructura monolítica, que actualmente se emplea en la corona de los rompeolas de talud, para reducir el volumen de material necesario para su construcción, contribuyendo a elevar el nivel de corona del rompeolas y evitar el rebase del oleaje sobre la corona de la estructura, con lo que se disminuye el costo de ejecución, de explotación de la roca, en su caso de construcción de elementos de coraza de concreto y mantenimiento de las estructuras de protección.

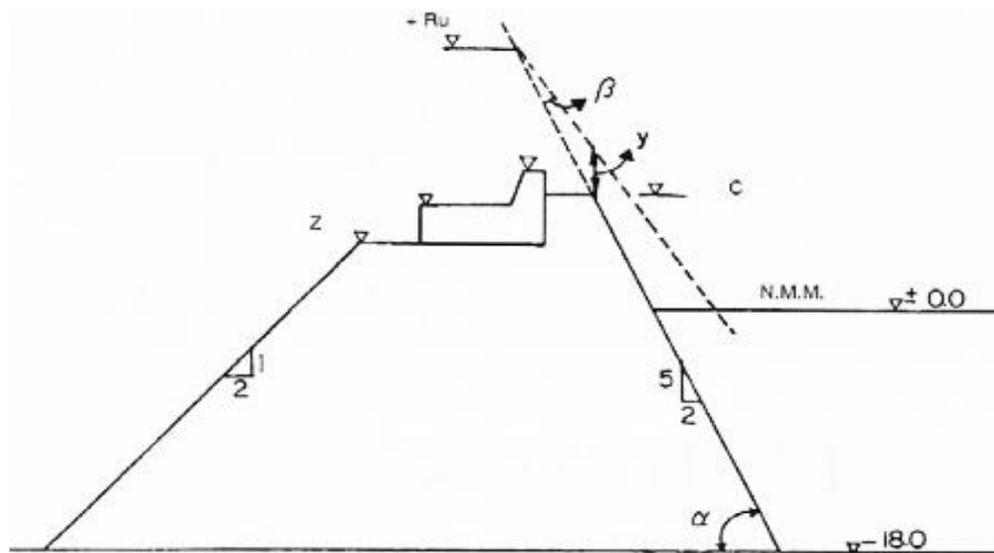
De ahí que el desarrollar una metodología para el dimensionamiento de los deflectores de oleaje, es muy importante y debe ser estudiada en un modelo hidráulico, lo que permitirá definir el comportamiento hidráulico con las diferentes geometrías resultantes, y aplicarla en el diseño del deflector de oleaje, para diferentes condiciones de oleaje, y analizar el comportamiento hidráulico para el caso particular del puerto de Ensenada.

El método de Günbak, A. y Göcke, T., se fundamenta en ensayos tipo regular con un talud de run-up definido, dentro de las ecuaciones plantea presiones y tiene criterios geométricos y ondulatorios. Los datos que intervienen para este método son; la altura del deflector, el ancho de cimentación del deflector, el ángulo del talud (para n Iribarren), el periodo (para n Iribarren, no definido), la altura de ola y el ángulo de la lámina de agua de 15 grados.

Analizando el método se tiene que el oleaje rompe antes de incidir sobre el deflector, al igual que Iribarren y Nogales, este método plantea dos presiones: la de choque y a la hidrostática, siendo la presión que actúa sobre el deflector la suma de ambas. En la figura 1.2, se muestra de manera esquemática los parámetros del cálculo del remonte.

De acuerdo a los ensayos realizados por Günbak, A., y Göcke T., se concluyó que debe haber al menos tres piezas del manto frente al deflector para poder considerar la reducción del 50% en las presiones dinámicas o de impacto.

En la formulación no interviene la longitud de la berma situada frente al deflector por lo que se asume que debe ser siempre igual o superior a la longitud equivalente a tres piezas del manto.



Fuente: Negro, V. et al. 2008

Figura 1.2 Esquema de cálculo del “run-up”

En 1985, Yoshimi Goda, define a un deflector de oleaje como una estructura artificial, que en general es de concreto, cuyo cuerpo del deflector debe ser lo suficientemente resistente a la energía que ejercen las olas hacia la estructura.

En 1988, el método de Bradbury, A y Allsop, N., es aplicado con un talud de 2:1, en el cual se pasa de fuerzas a presiones suponiendo que las horizontales son

uniformes y las verticales son triangulares, de igual forma los autores plantean fuerzas horizontales, verticales y criterios geométricos y ondulatorios. Los datos que intervienen en éste método son: la altura del deflector, el ancho de cimentación del deflector, la altura de ola significativa y la longitud de onda referida al periodo pico.

Siendo el primer método que indica claramente el valor de los parámetros del clima marítimo que participa en los cálculos: altura de ola y longitud de onda.

Para este método, los parámetros son obtenidos empíricamente, ya que dependen de la geometría de la berma y del filtro, por lo que se puede suponer que implícitamente tiene en cuenta todas las particularidades de dichos elementos.

Para los casos donde no se ajusten las secciones, los coeficientes no se obtendrán por medio de ensayos específicos. Esto se centra en dos aspectos fundamentales: el talud y el tipo de piezas. Este método supone que todas las secciones del dique tienen un talud 2:1. No obstante, los autores indican que para este talud 2:1 el valor del run-up es el más desfavorable.

Aplicado el criterio del Shore Protección Manual para filtro del manto, se puede suponer que el método considera en general bermas de tres piezas para las corazas de las escolleras, y de tendido de dos piezas para bloques de elementos artificiales de concreto.

La formulación ofrece como resultado la fuerza horizontal a partir de la cual se obtiene la presión horizontal (adopta una distribución de presiones uniforme en toda la altura del deflector) y la subpresión (para estas presiones verticales asume una distribución triangular, aunque indica que para estar del lado de la seguridad se puede tomar rectangular), obsérvese la figura 1.3.

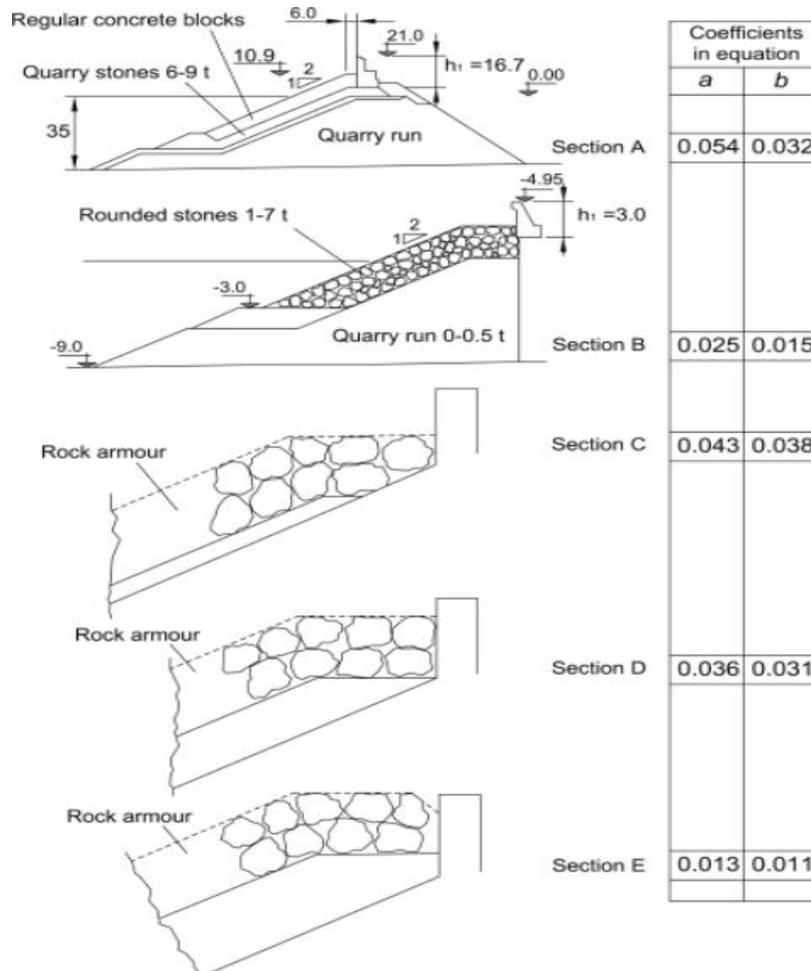
Dado que este método considera explícitamente una presión uniforme en toda la altura del deflector, no permite ninguna reducción de las presiones horizontales en el tramo de muro protegido por la berma, esto no afecta al cálculo de la fuerza horizontal total, puesto, que dicha fuerza es lo que el método calcula inicialmente y se entiende que los parámetros "a" y "b", al proceder de ensayos de laboratorio, tiene implícito el efecto atenuador de la berma, sin embargo, sí afecta al cálculo de las subpresiones horizontales.

Para 1992, el método de Pedersen, J. y Burcharth, H., ocupa un oleaje de espectro JONSWAP, por integración de las presiones obtenida llega a una formulación de fuerzas horizontales sobre el deflector.

Esta fórmula ha de ajustarse con los parámetros "a" y "b". Los datos que intervienen en éste método son: la altura del deflector, el ancho de cimentación del deflector, la altura de ola significativa y la longitud de onda referida al periodo de pico.

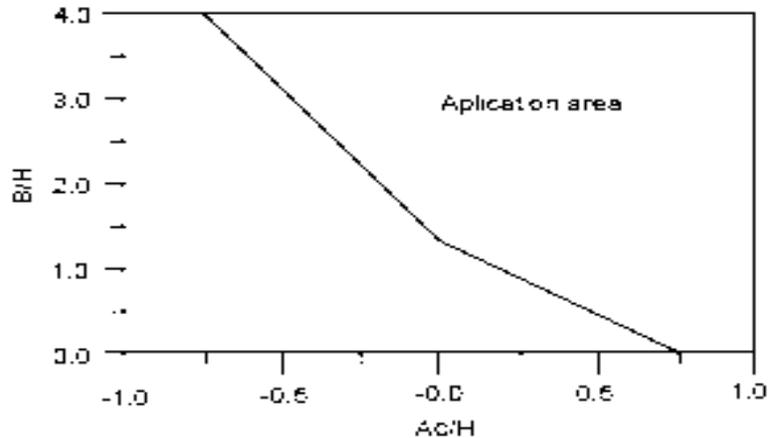
Los ensayos efectuados con este método presentan muy poco rebase, por lo que el método de cálculo parece que es más preciso en diques que presentan una tasa de rebase baja.

En 1999, Martín, F., Vidal, C., Losada, M., Medina, R., y otros autores proponen definir presiones en las que se aumenta el efecto atenuador que tiene la berma, aplicando condiciones específicas; el ángulo de incidencia de hasta +/-20 grados sexagesimales y el oleaje con número de Iribarren superior a 3, cuando el valor es inferior, si la ola rompe por fondo, puede aplicarse este método, en caso contrario se debe comprobar que el caso estudiado queda dentro de la región de aplicación indicada en la figura 1.3.



Fuente: IRIA CUR,1991

Figura 1.3 Método de Bradbury, A y Allsop, N. Valores de los parámetros empíricos y geométricos ensayadas



Fuente: Martin et al. 1995

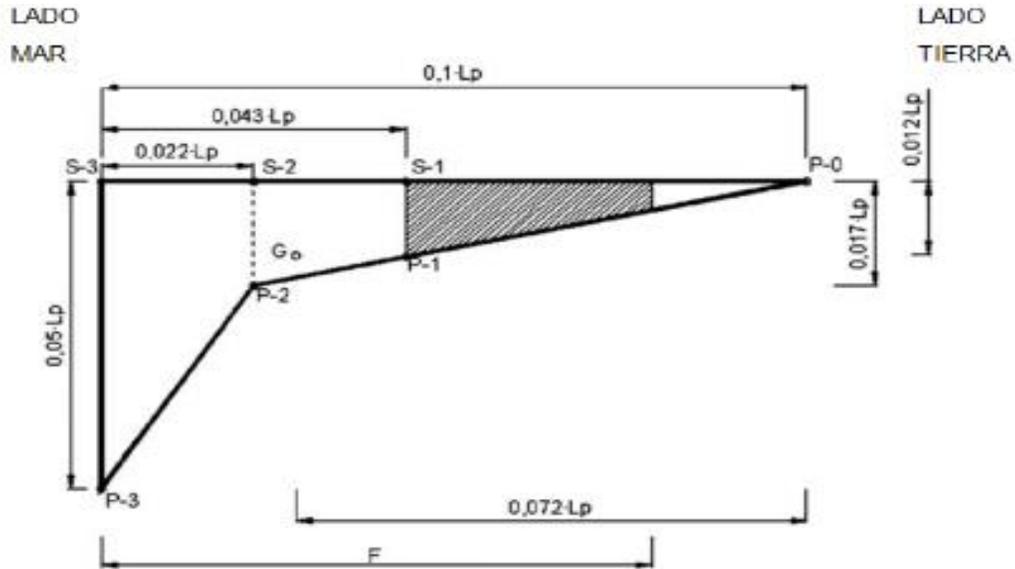
Figura 1.4 Región de aplicación para casos con números de Iribarren inferior a 3

Pedersen, J. y Burcharth, H., en 1992 definen el término $(\frac{aH_s}{A_c} + a \cdot b)$, ésta variación es debida a la diferencia en los cálculos de regresión o en la integración de las presiones causadas por la posición de los sensores o de otros factores de los ensayos en modelo hidráulico. En cualquier caso, si los coeficientes "a" y "b" son siempre positivos.

Posteriormente, hacia 2006, otros investigadores comparten esta opinión y cuantifican los valores a adoptar, como Berenguer, J., Baonza, A. y Martín, F. et al., asumen que la mayor parte de la carga es debida a las presiones hidrostáticas. De los ensayos de ésta alternativa, se observa que las subpresiones debidas al impacto de la ola (presión dinámica), tienen una distribución paralelepípedica, donde el valor de la subpresión en el talón no es nulo. Los autores indican que del lado de la seguridad se considera una ley lineal cuya distribución que se plantea para ese caso se muestra en la figura 1.5.

Los datos que intervienen en este método son la altura de deflector, el ancho de la cimentación del deflector, el ángulo del talud con la horizontal, la altura de ola significativa, la longitud de onda a pie de dique referida a periodo del prototipo (T_p) y al periodo del modelo (T_m), el run-up (superado por 2% de las olas), el ángulo de incidencia del oleaje con la normal al muro, el ancho de la berma, y la altura de la berma emergida.

La investigación se fundamenta en un gran número de ensayos destinados no solo al análisis de la estabilidad de los deflectores, sino también al remonte, rebase y comportamiento de los diques rompeolas que tiene esta tipología. Para el desarrollo de éste método, el coeficiente de rozamiento resulta de determinar en el cálculo del peso teórico y el método de cálculo de las fuerzas sobre el muro, y está diseñado para el caso de que los elementos de la coraza del dique sean escolleras naturales o cubos.



Fuente: Berenguer, J y Baonza, A, 2006

Figura 1.5 Diagrama de subpresiones del método de Berenguer y Baonza

De igual forma Coperio, E. y García, M., en 2008 realizaron un análisis de las piezas de coraza perforadas, y definen que éstas ofrecen una superficie más irregular y con más huecos que los bloques, con los que se obtiene un remonte inferior al obtenido con elementos no perforados, así el run-up empleado para el cálculo puede ser inferior y, en consecuencia, conducir a unas presiones que sean ligeramente inferiores a las obtenidas en cubos o antifer sin perforar.

En los ensayos, relativos a las fuerzas que se presentan sobre el deflector, colocaron intencionalmente algunos bloques de la coraza, con un cierto desplazamiento, para reflejar el estado real de un dique que ha soportado temporalmente a lo largo de su vida útil. En este método se estudian las subpresiones con gran profundidad.

La figura 1.5, indica que no hay subpresiones más allá de un punto situado a $0,1 \cdot L_{pdique}$ de distancia del frente del deflector, en todos los demás puntos existe una fuerza vertical en sentido ascendente. Esto significa que en el talón del deflector la subpresión no se anula a no ser que la cimentación tenga un ancho de $0,1 \cdot L_{pdique}$ m, L_{pdique} (Longitud de prototipo del dique). Se tiene, por tanto, que en el talón del deflector la subpresión no es cero, lo que coincide con lo definido por Jensen y Martin y otros autores en 1999, para el caso de la presión pulsátil.

1.1 Conclusiones del establecimiento del estado del arte

Del análisis de los métodos existentes para el cálculo del diseño y dimensionamientos de un deflector de oleaje, observamos que los métodos realizados hasta ahora, en su mayoría, se basan en ensayos de laboratorio extensos, exceptuando a Iribarren, sin embargo, es el autor con el análisis más antiguo, de 1954.

La determinación del ascenso del oleaje (run-up), así como del cálculo de las fuerzas que actúan sobre el deflector no son homogéneas entre los diferentes métodos, adicionalmente omiten algunas variables de clima marítimo y de geometría, sin embargo, tienen similitud en el comportamiento de las presiones registradas y máximas con referencia a la evolución de las mismas en el tiempo.

Los métodos de cálculo para el diseño de deflectores están fundamentados en ensayos de laboratorio, sin embargo, se debe resaltar que hay muchas variaciones de deflectores de oleaje, tanto en formas como de dimensiones, así como distintos tipos de cimentaciones, por lo cual, es recomendable emplear tanto el método de cálculo teórico como someterse a un ensayo en modelo hidráulico para calibrar los resultados.

2. Definición de la metodología de diseño geométrico del deflector

Con la información obtenida del estado del arte expuesto en el capítulo 1, en el que se exponen los diferentes métodos de cálculo para el dimensionamiento de un deflector dispuesto en un dique rompeolas, en el presente capítulo se define una metodología teórica de diseño que permite, de manera preliminar, dimensionar la estructura monolítica, es decir el deflector de oleaje, antes de tener que construirlo o modelarlo hidráulicamente a escala.

Una vez realizados los análisis de las diferentes metodologías, se denota que las fallas más comunes de los diques verticales son generadas por el efecto de rebase del oleaje, por lo que es importante considerar los efectos de la rugosidad y la porosidad del material con que será construida la capa coraza del dique.

Para dimensionar el deflector de oleaje, es importante destacar que existe un sinnúmero de variaciones de forma de la estructura monolítica, y en la realidad se prefiere incluso ser una estructura que tenga utilidad visual para la zona portuaria, por lo que en diseños europeos se planea como una estructura combinada de muro plano y muro curvado.

Sin embargo, lo más destacado, que incluso se respalda por los análisis realizados por Owen en 1983, es que deben evitarse los diseños que tiendan a arrojar el oleaje de manera vertical, tal que la estructura monolítica quede expuesta a los efectos del viento.

Por lo anterior se debe buscar que el diseño del deflector genere que el oleaje tenga un retroceso lo más horizontal posible, y que por consiguiente el deflector tenga una altura por encima del nivel del mar en calma.

Considerando los diferentes modelos de deflectores de oleaje con los que se ha trabajado en diferentes estudios, a continuación, se describe la metodología de diseño geométrico del deflector de oleaje.

2.1 Definición de las variables que intervienen para el diseño

Los datos que necesitamos conocer son el periodo de oleaje pico (T_p), la longitud de la ola asociada al periodo pico al pie del dique ($L_{p,dique}$), profundidad al pie del dique respecto al nivel de bajamar media (d_{dique}), la altura de ola significativa (H_s), la altura de ola al pie del dique ($H_{s,0}$).

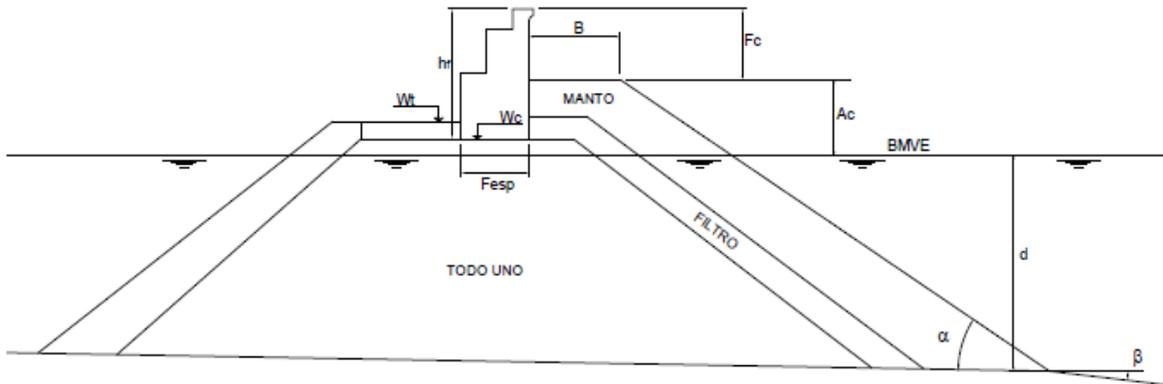
En la tabla 2.1, se identifican las variables que definen el clima marítimo y la geometría tanto del dique en estudio como del deflector que se planea diseñar.

Tabla 2.1 Variables de clima marítimo y geometría del dique rompeolas y deflector

Variables del clima marítimo		
Variable	Nomenclatura	Unidad
Periodo pico	T_p	s
Periodo pico en agua profundas	$T_{p,0}$	s
Longitud de la ola asociada al periodo pico al pie del dique	$L_{p, dique}$	m
Longitud de la ola en aguas profundas	$L_{p,0}$	m
Profundidad al pie del dique respecto al nivel de bajamar media	d_{dique}	m
Talud del fondo marino	β	°
Altura de ola significativa	H_s	m
Altura de ola al pie del dique	H_{sdique}	m
Altura de ola en aguas profundas	$H_{s,0}$	m
Peralte	s	adimensional
Gravedad	g	m/s^2
Peso específico del agua de mar	γ_w	t/m^3
Variables de geometría del dique		
Ángulo del manto con la horizontal	α	°
Ancho de la corona de la coraza	B	m
Altura completa el deflector	hf	m

Altura del deflector expuesto al oleaje	F_c	m
Altura de la coronación de la coraza	A_c	m
Anchura de cimentación del deflector	F_{def}	m
Cota de cimentación del deflector respecto al nivel del mar	W_c	m
Cota de la superestructura del deflector	W_t	m
Cota de coronación del deflector	R_c	m
Peso del deflector por metro lineal de dique	P_{esp}	t/m

Los parámetros geométricos que se requieren para el dimensionamiento de un deflector son los que se muestran en la figura 2.1.



Fuente: Polvorinos, 2013

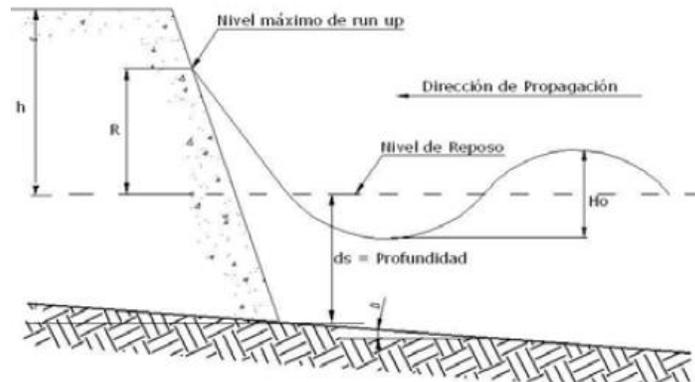
Figura 2.1 Parámetros geométricos del dique

2.2 Consideraciones de pre dimensionamiento del deflector

Para realizar el pre dimensionamiento del deflector, se deben tomar en cuenta diferentes consideraciones generadas a partir de los estudios previamente realizados que contribuirán a la conformación geométrica y estructural del deflector de oleaje.

De acuerdo con las teorías definidas en el capítulo 1, con los diferentes ensayos realizados, se destacan las siguientes consideraciones de pre dimensionamiento:

- La relación entre el ancho del deflector de oleaje (F_{esp}) y la altura total del deflector (h_f), se establece en el entorno de 0.70, $F_{esp}/h_f \approx 0.70$.
- En relación con el peso del deflector por metro de dique (P_{esp}), se estima que dicha variable está entorno al 80% del peso de un monolito de dimensiones $h_f * F_{esp}$, por norma general también se cumple que el peso es inferior al cuadrado de la profundidad del dique (d), $P_{esp} \leq d^2$.
- Siguiendo los planteamientos de las metodologías analizadas, se recomienda colocar dos o tres piezas de material de coraza delante del deflector de oleaje.
- La cota de coronación de la coraza del dique rompeolas (A_c) se estima 0.8 de la altura de la ola significativa a pie del dique, $0.8H_s$.
- La elevación máxima de la coronación de una estructura depende también del rebase del oleaje (overtopping), mismo que a su vez depende del ascenso máximo del oleaje (run up) y éste a su vez de la pendiente, porosidad y rugosidad de la capa coraza, así como de la profundidad al pie de la estructura, como se observa en la figura 2.2.



Fuente: Mora, 2008

Figura 2.2. Fenómenos de run-up y overtopping

En la tabla 2.2, se identifican los modelos que permiten estimar tanto el ascenso o remonte del oleaje (run-up) como el rebase del oleaje (overtopping), y que pueden ser utilizados para definir las variables de acuerdo a los resultados de ensayo a escala reducida del run-up sobre taludes lisos e impermeables.

Tabla 2.2 Principales ecuaciones para la estimación del run-up y del gasto medio del rebase del oleaje

Autores	Estructuras ensayadas	Modelo de rebase	Gasto adimensional	Francobordo adimensional
Owen. (1980); Owen (1982)	Impermeables, lisas, rugosas, taludes rectos y con berma	$Q = ae^{-(\Delta R)}$	$Q = \frac{q}{gH_s T_m}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_{om}}{2\pi} \right)^{0.5} \frac{1}{\gamma_r}$
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	$Q = ae^{-(\Delta R)}$	Para $\zeta_p < 2$	
			$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_{op}}{\tan \alpha}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_n \gamma_p}$
			Para $\zeta_p > 2$	
			$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_n \gamma_p}$
Franco et al (1994) y (Franco y Franco (1999)	Rompeolas vertical con y sin perforaciones en el frente	$Q = ae^{-(\Delta R)}$	$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$R = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_n}$
Pedersen (1996)	Taludes permeables de roca con superestructura	$Q = R$	$Q = \frac{qT_m}{L_m^2}$	$R = 3.2 \times 10^{-5} \frac{H_s^5 \tan \alpha}{R_c^3 A_c B}$

2.3 Procedimiento de cálculo

El procedimiento de cálculo, para el dimensionamiento geométrico del deflector, se llevará a cabo de la siguiente manera:

- a) Inicialmente se deberá obtener el valor del ascenso máximo del oleaje (run-up) y el gasto medio por rebase del oleaje (overtopping) como referencia del nivel de coronamiento del deflector de oleaje, el cual está dado por R_u , éste es el nivel de subida de las olas, medido verticalmente desde la línea de agua en calma; el número de olas que superan este nivel se relaciona con el número de olas entrantes y no con el número que se acumula. Se podrá estimar de acuerdo con los modelos de referencia de la tabla 2.2.

- b) Se debe revisar que se cumpla con el criterio de rebase de Iribarren con una tolerancia de 1.0 m y considerando la altura determinística de Iribarren a la $H_{s,d}$, que corresponde a la altura de ola significativa a pie de dique, mediante las expresiones matemáticas de las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$A_c = 0.75H_{s,d} \pm 1.00 \text{ (m)} \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$R_c = 1.5H_{s,d} \pm 1.00 \text{ (m)} \quad \text{Ec. 2.2}$$

- c) Para obtener la altura total del deflector de oleaje h_f , se procederá con el cálculo del monomio $F_c/L_{p,0}$, aplicando la ecuación 2.3, donde y es el monomio $h_f/L_{p,0}$ descompuesto en la ecuación 2.4 y con ello se calcula la altura total del deflector, para ello se satisface inicialmente que la altura del deflector expuesto al oleaje, $F_c = R_c - A_c$.

$$y = 23.569 (F_c/L_{p,0})^2 + 0.8527(F_c/L_{p,0}) + 0.013 \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$h_f/L_{p,0} = 23.569 (F_c/L_{p,0})^2 + 0.8527(F_c/L_{p,0}) + 0.013 \quad \text{Ec. 2.4}$$

- d) Para obtener el ancho del deflector de oleaje F_{esp} , se calcula el monomio h_f/gT_p^2 aplicando la ecuación 2.5, donde y es el monomio $F_{esp}/L_{p,0}$ descompuesto en la ecuación 2.6, para calcular el ancho del deflector.

$$y = 5.0802 (25.569 (h_f/gT_p^2) - 0.0054) \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$F_{esp}/L_{p,0} = 5.0802 (25.569 (h_f/gT_p^2) - 0.0054) \quad \text{Ec. 2.6}$$

- e) Para calcular el peso del monolito por metro de dique P_{esp} , se debe obtener el monomio $F_{esp}/H_{s,0}$ aplicando la ecuación 2.7 donde y es el monomio $P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}$ descompuesto en la ecuación 2.8 para determinar el peso del deflector.

$$y = 0.9316 (F_{esp}/H_{s,0})^3 + 1.9279(F_{esp}/H_{s,0})^2 - 0.4926 (F_{esp}/H_{s,0}) + 0.3433 \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$P_{esp}/\gamma_w H_{s,0} = 0.9316 (F_{esp}/H_{s,0})^3 + 1.9279(F_{esp}/H_{s,0})^2 - 0.4926 (F_{esp}/H_{s,0}) + 0.3433 \quad \text{Ec. 2.8}$$

Si se cumple el criterio de rebase de Iribarren, con éstos datos se diseña el deflector; en caso de no cumplir dicho criterio, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

- f) Se calcula el peso del monolito por metro de dique P_{esp} , se debe obtener el monomio $F_c/H_{s,0}$ aplicando la ecuación 2.9 donde y es el monomio $P_{esp}/\gamma_w F_c^2$ descompuesto en la ecuación 2.10 para determinar el peso del deflector por metro de dique.

$$y = 69.5992 (F_c/H_{s,0})^3 + 135.7691(F_c/H_{s,0})^2 - 89.9809 (F_c/H_{s,0}) + 24.601 \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$P_{\text{esp}}/\gamma_w F_c^2 = 69.5992 (F_c/H_{s,0})^3 + 135.7691(F_c/H_{s,0})^2 - 89.9809 (F_c/H_{s,0}) + 24.601 \quad \text{Ec. 2.10}$$

- g) Para obtener el ancho del deflector de oleaje F_{esp} , se calcula el monomio $P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2$ aplicando la ecuación 2.11, donde y es el monomio $F_{\text{esp}}/H_{s,0}$ descompuesto en la ecuación 2.12, para calcular el ancho del deflector.

$$y = 0.024(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2)^3 + 0.181(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2)^2 + 0.631(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2) + 0.128 \quad \text{Ec. 2.11}$$

$$F_{\text{esp}}/H_{s,0} = 0.024(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2)^3 + (0.181(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2)^2 - 0.631(P_{\text{esp}}/\gamma_w H_{s,0}^2) + 0.128) \quad \text{Ec. 2.12}$$

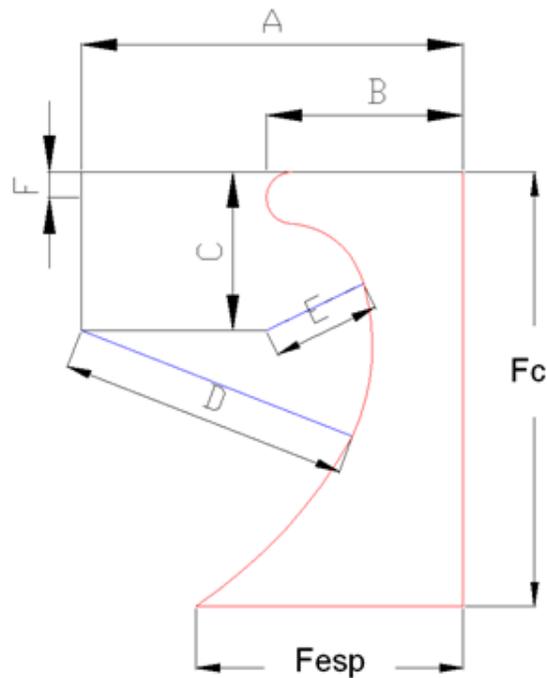
- h) Para obtener la altura total del deflector de oleaje h_f , se procederá con el cálculo del monomio F_{esp}/L_p aplicando la ecuación 2.13, donde y es el monomio h_f/gT_p^2 descompuesto en la ecuación 2.14 y con ello se calcula la altura total del deflector.

$$y = 0.1798x + 0.0013 \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$h_f/gT_p^2 = 0.1798x + 0.0013 \quad \text{Ec. 2.14}$$

- i) Para el diseño geométrico de la curvatura del deflector de oleaje, se refirió el análisis de A. L. Marshall del módulo de estructuras del texto Marine Concrete, para el cual, en esta etapa del estudio, ya contamos con el valor de la altura (F_c), considerando $F_c = R_c - A_c$, y del ancho (F_{esp}) del deflector de oleaje.

De acuerdo con lo anterior, se obtiene el diagrama de la figura 2.3, en el que se determinan cinco tipos de curvaturas del deflector de oleaje en función de la altura del deflector expuesta (F_c).



Fuente: Marshall, 1990

Figura 2.3 Diagrama del dimensionamiento de la curvatura de deflectores de oleaje típicos

Para encontrar la relación entre los diferentes tipos y lograr integrarlos al algoritmo de la programación, que es objeto del presente estudio, se obtuvieron las gráficas 2.4 a la 2.9, con las funciones lineales para cada dimensión incógnita.

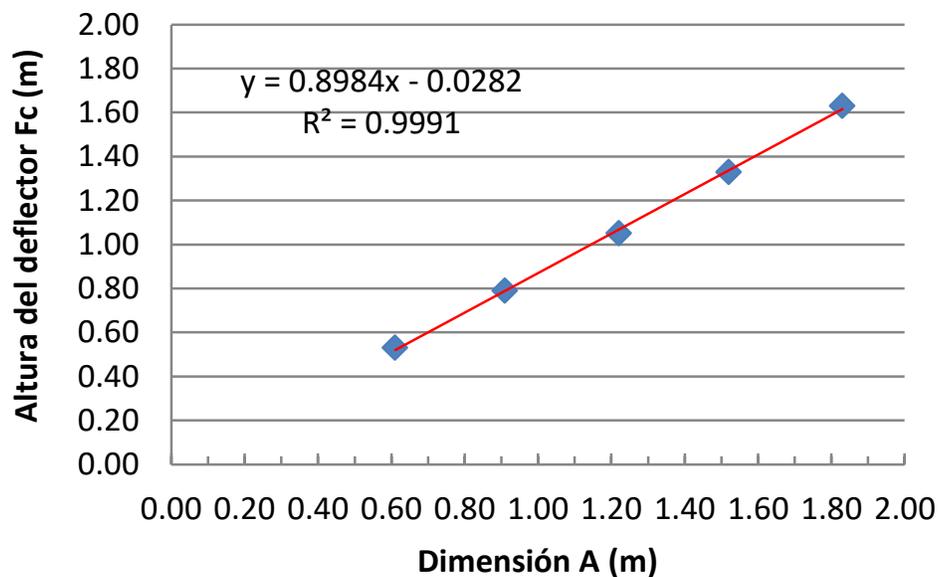


Figura 2.4 Grafica de la correlación dimensional del lado A del deflector de oleaje

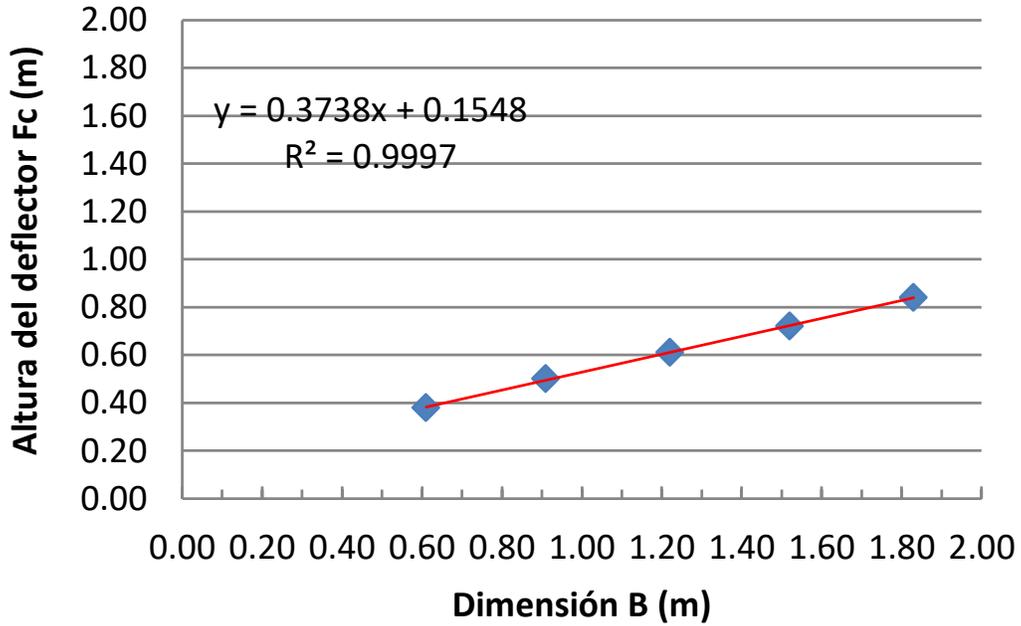


Figura 2.5 Grafica de la correlación dimensional del lado B del deflector de oleaje

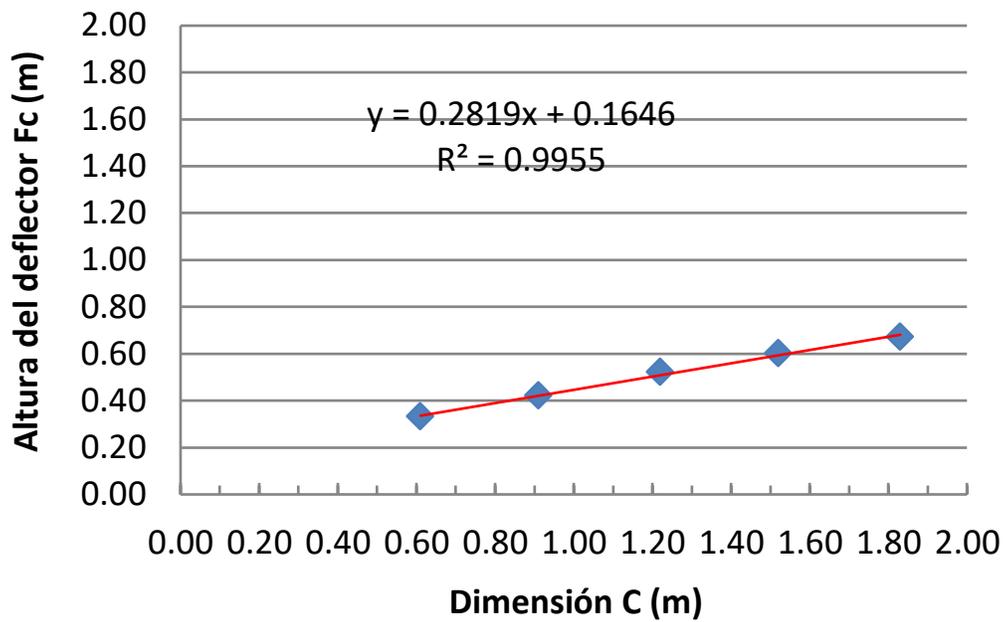


Figura 2.6 Grafica de la correlación dimensional del lado C del deflector de oleaje

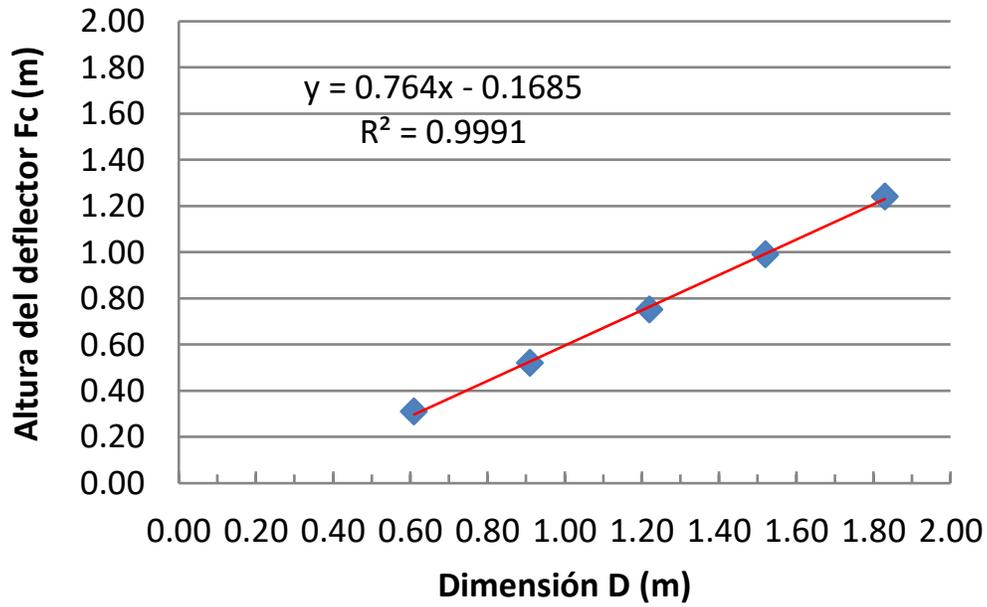


Figura 2.7 Grafica de la correlación dimensional del lado D del deflector de oleaje

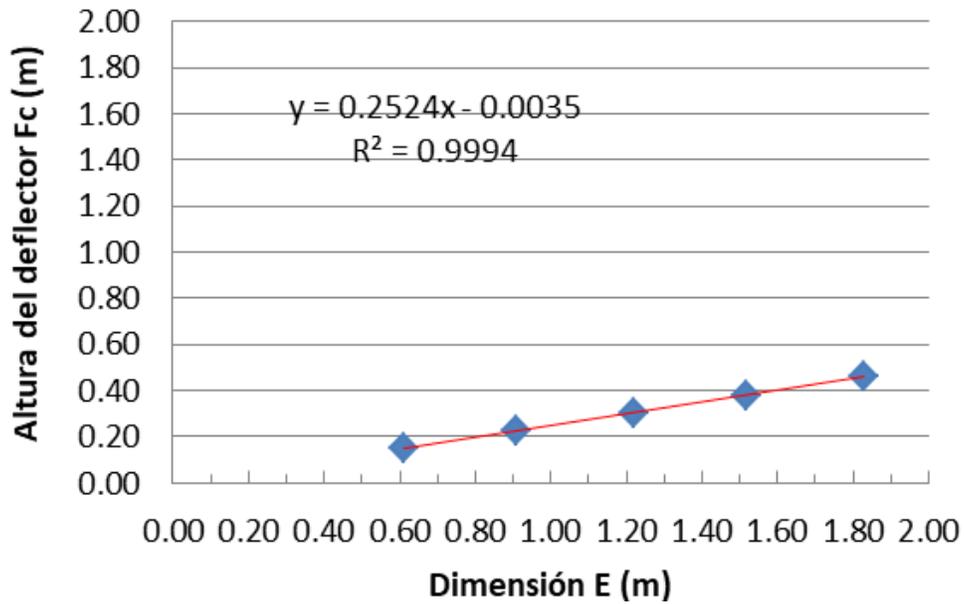


Figura 2.8 Grafica de la correlación dimensional del lado E del deflector de oleaje

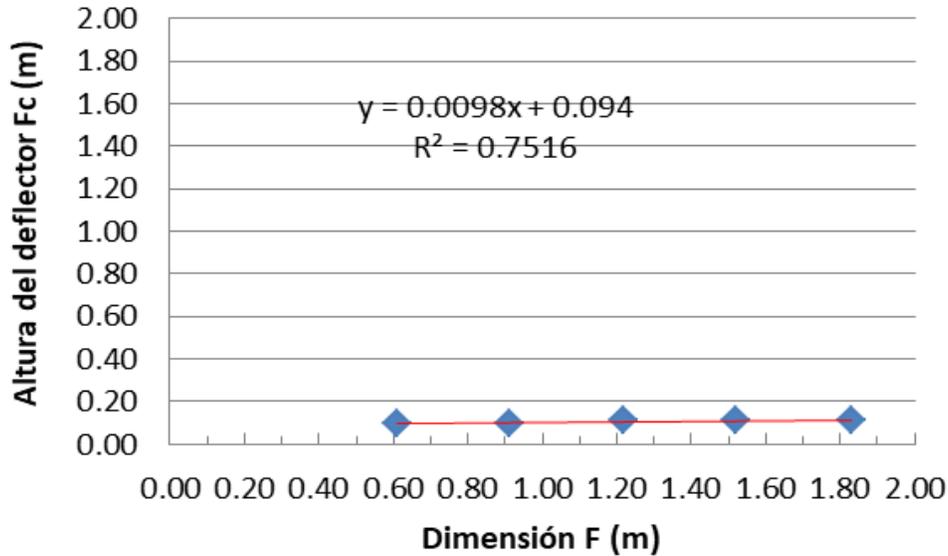


Figura 2.9 Grafica de la correlación dimensional del lado F del deflector de oleaje

La variabilidad de la curvatura dependerá de la altura de diseño del deflector (hf), misma que será evaluada mediante la definición del ascenso máximo del oleaje (run up), así como del rebase del oleaje (overtopping), con objeto de que el deflector que se esté dimensionando este diseñado para trabajar adecuadamente ante condiciones extremas.

Por ello, se evaluará el ascenso del oleaje (run-up) y el rebase del oleaje (overtopping) en modelo hidráulico para referenciar los resultados de la programación y, así mismo para verificar el comportamiento de los diferentes monolitos y se generaran las conclusiones y recomendaciones pertinentes en el capítulo 5, de tal forma que se pueda revisar y, en su caso, readaptar la rutina computacional que se defina en el capítulo 3.

3. Definición de la rutina computacional para el diseño geométrico del deflector

Para llevar a cabo el análisis numérico de la metodología, para el diseño geométrico de los deflectores de oleaje, se generó una rutina computacional, a través de un pseudocódigo (o lenguaje de descripción algorítmico), para describir el principio operativo de un programa informático que permita el dimensionamiento geométrico de deflectores de oleaje para rompeolas de talud de manera rápida y eficiente.

3.1 Determinación del diagrama de flujo para la rutina computacional

En el diagrama de flujo descrito en la figura 3.1, se resume la operación del programa computacional generado para el dimensionamiento geométrico de deflectores de oleaje.

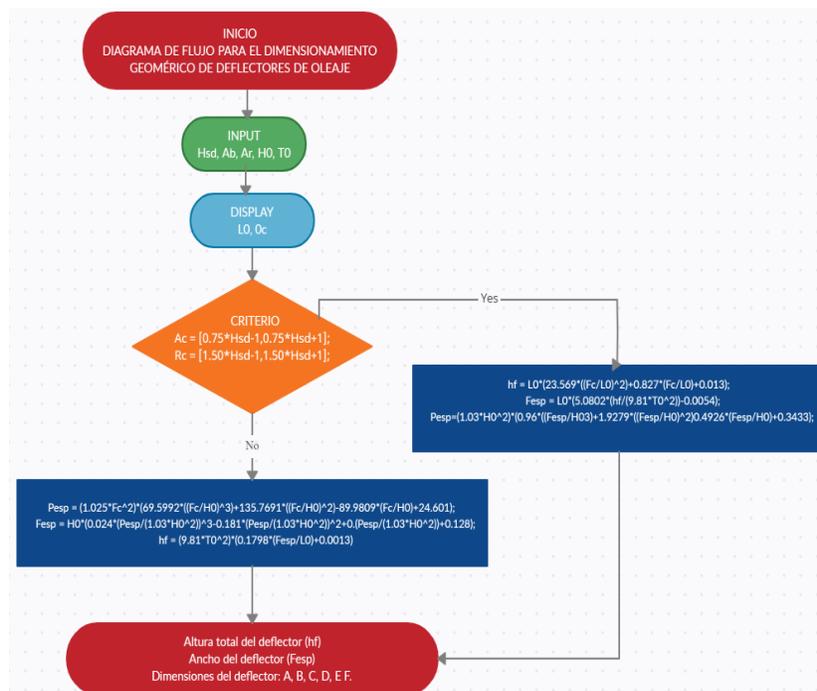
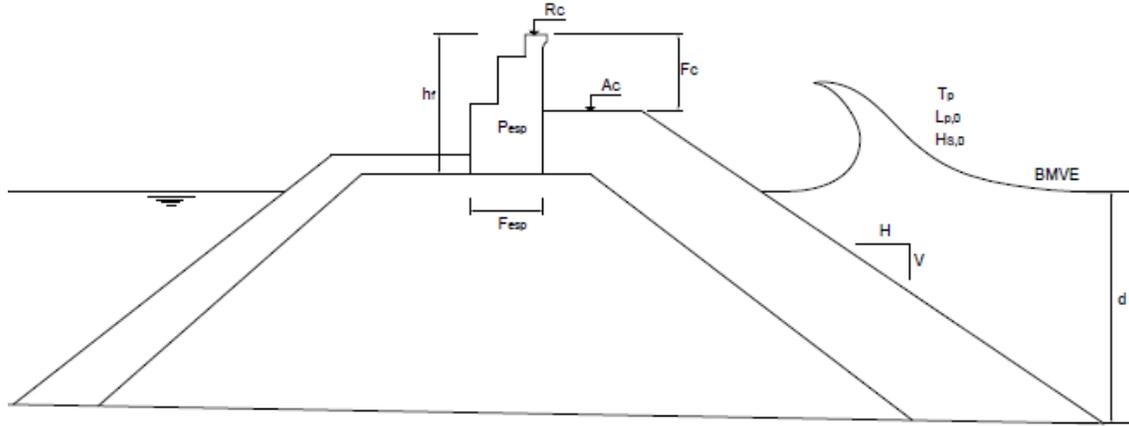


Figura 3.1 Diagrama de flujo para el desarrollo de la rutina computacional del dimensionamiento geométrico del deflector de oleaje

La descripción simplificada de dicha rutina, se indica a continuación:

- a) Definición de los datos de entrada, estos se ejemplifican en la figura 3.2 y se definen en la tabla 3.1.



Fuente: Polvorinos, 2013

Figura 3.2 Parámetros geométricos definidos para el diseño de un rompeolas

Tabla 3.1 Definición de los datos de entrada para la rutina computacional

Variable	Nomenclatura	Unidad
Altura de ola en aguas profundas	H_0	m
Altura de ola al pie del rompeolas	H_{sd}	m
Elevación de la corona del rompeolas	A_b	m
Elevación propuesta de la corona del deflector	A_r	m
Periodo del oleaje en aguas profundas	T_0	s
Aceleración de la gravedad	g	m/s^2

El procedimiento de cálculo para el dimensionamiento geométrico del deflector, se llevará a cabo de la siguiente manera:

- b) revisar que se cumpla el criterio de rebase de Iribarren

$$A_c = 0.8H_{s,d} \pm 1.00 \text{ (m)} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$R_c = 1.5H_{s,d} \pm 1.00 \text{ (m)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

c) Determinación de la altura del deflector expuesta F_c ,

$$F_c = R_c - A_c \quad \text{Ec. 3.3}$$

d) altura total del deflector de oleaje h_f ,

$$h_f = (23.569 (F_c/L_{p,0})^2 + 0.8527(F_c/L_{p,0})) + 0.013) * L_{p,0} \quad \text{Ec. 3.4}$$

e) ancho del deflector de oleaje F_{esp} ,

$$F_{esp} = (5.0802 (h_f/gT_p^2) - 0.0054) * L_{p,0} \quad \text{Ec. 3.5}$$

f) peso del monolito por metro de dique P_{esp} ,

$$P_{esp} = ((0.9316 (F_{esp}/H_{s,0})^3) + (1.9279(F_{esp}/H_{s,0})^3) - (0.4926 (F_{esp}/H_{s,0})) + 0.3433) * (\gamma_w H_{s,0}) \quad \text{Ec. 3.6}$$

Si se cumple el criterio de rebase de Iribarren, con éstos datos se diseña el deflector, en caso de no cumplir dicho criterio, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

g) peso del monolito por metro de dique P_{esp} ,

$$P_{esp} = (69.5992 (F_c/H_{s,0})^3 + 135.7691(F_c/H_{s,0})^2 - 89.9809 (F_c/H_{s,0}) + 24.601) * (\gamma_w F_c^2) \quad \text{Ec. 3.7}$$

h) ancho del deflector de oleaje F_{esp} ,

$$F_{esp} = ((0.024(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2)^3) + (0.181(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2)^2) - 0.631(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2) + 0.128) * (H_{s,0}) \quad \text{Ec. 3.8}$$

i) altura total del deflector de oleaje h_f ,

$$h_f = (0.1798x+0.0013) * (gT_p^2) \quad \text{Ec. 3.9}$$

Con estos datos calculados se diseña la altura total del deflector, la altura del deflector expuesta, el ancho del deflector y su peso por metro de rompeolas, por lo que nos falta diseñar la curvatura de la altura del deflector expuesta al oleaje.

j) diseño geométrico de la curvatura del deflector de oleaje, se diseñan de acuerdo a la altura del deflector expuesta F_c , y se definen cinco tipos de curvaturas que permiten redirigir la energía del oleaje, empleando las siguientes ecuaciones lineales para definir cada lado.

$$\mathbf{A} = 0.8984 F_c - 0.0282 \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$\mathbf{B} = 0.3738 F_c + 0.1548 \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$\mathbf{C} = 0.2819 F_c + 0.1646 \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$\mathbf{D} = 0.764 F_c - 0.1685 \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$\mathbf{E} = 0.2524 F_c - 0.0035 \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$\mathbf{F} = 0.0098 F_c + 0.094 \quad \text{Ec. 3.15}$$

Con el cálculo de cada una de estas variables, podríamos definir el diseño geométrico del deflector de oleaje, de acuerdo a las condiciones de oleaje que se presentan en la zona de estudio de que se trate.

3.2 Generación del programa computacional

Para la generación del programa computacional se utilizó el software MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory), laboratorio de matrices, éste es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) para Windows.

Éste programa permite la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware, del cual se dispuso de la herramienta GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI).

El lenguaje de programación en Matlab tiene la ventaja de poderse complementar, donde sea conveniente, con descripciones detalladas, se utiliza pseudocódigo pues este es más fácil de entender para las personas que el código del lenguaje de programación convencional, ya que es una descripción eficiente y con un entorno independiente de los principios fundamentales de un algoritmo.

El principal objetivo del pseudocódigo es el de representar la solución a un algoritmo de la forma más detallada posible, y a su vez lo más parecida posible al lenguaje que posteriormente se utilizará para la codificación del mismo.

De esta manera, el código del programa, se expone a continuación:

```

lc;clear all;close all;
[FileName Path] = uiputfile('*.txt','GUARDAR RESULTADOS *.txt');
fid = fopen(strcat(Path,FileName),'w');
Hsd = input('Altura de ola al pie del rompeolas (m): ');
fprintf(fid,'Altura de ola al pie del rompeolas (m): %1.2f\n',Hsd);
Ab = input('Elevación de la corona del rompoelas (m): ');
fprintf(fid,'Elevación de la corona del rompoelas (m): %1.2f\n',Ab);
Ar = input('Elevación de la corona del deflector (m): ');
fprintf(fid,'Elevación de la corona del deflector (m): %1.2f\n\n',Ar);
disp(' ');

Ac = [0.75*Hsd-1,0.75*Hsd+1];
Rc = [1.50*Hsd-1,1.50*Hsd+1];
H0 = input('Altura de ola en aguas profundas (m): ');
fprintf(fid,'Altura de ola en aguas profundas (m): %1.2f\n',H0);
T0 = input('Período de ola en aguas profundas (s): ');
fprintf(fid,'Período de ola en aguas profundas (s): %1.2f\n',T0);
disp(' ');
L0 = (9.81*(T0^2))/(2*pi());
fprintf(fid,'Longitud de ola en aguas profundas (m): %1.2f\n\n',L0);
disp('VERIFICANDO EL CRITERIO DE REBASABILIDAD DE IRIBARREN');
fprintf(fid,'VERIFICANDO EL CRITERIO DE REBASABILIDAD DE IRIBARREN\n\n');
disp(' ');
Fc = Ar-Ab;

if Ab > Ac(1) & Ab < Ac(2) & Ar > Rc(1) & Ar < Rc(2);
    disp('CUMPLE CON EL CRITERIO'); disp(' ');
    fprintf(fid,'CUMPLE CON EL CRITERIO\n\n');
    hf = L0*(23.569*((Fc/L0)^2)+0.827*(Fc/L0)+0.013);
    Fesp = L0*(5.0802*(hf/(9.81*T0^2))-0.0054);

Pesp=(1.03*H0^2)*(0.9316*((Fesp/H0)^3)+1.9279*((Fesp/H0)^2)+0.4926*(Fesp/H0)+0.3433);
else
    disp('NO CUMPLE CON EL CRITERIO'); disp(' ');
    fprintf(fid,'NO CUMPLE CON EL CRITERIO\n\n');
    Pesp = (1.025*Fc^2)*(69.5992*((Fc/H0)^3)+135.7691*((Fc/H0)^2)-
89.9809*(Fc/H0)+24.601);
    Fesp = H0*(0.024*(Pesp/(1.03*H0^2))^3-0.181*(Pesp/(1.03*H0^2))^2
+0.631*(Pesp/(1.03*H0^2))+0.128);
    hf = (9.81*T0^2)*(0.1798*(Fesp/L0)+0.0013);
end

fprintf(fid,'Altura total del deflector (m): %1.2f\n',hf);
disp(['Altura total del deflector (m): ',num2str(hf,'%1.2f')]);
fprintf(fid,'Ancho del cimientto (m): %1.2f\n',Fesp);
disp(['Ancho del cimientto (m): ',num2str(Fesp,'%1.2f')]);
fprintf(fid,'Peso del deflector por metro de rompeolas (ton): %1.2f\n\n',Pesp);
disp(['Peso del deflector por metro de rompeolas (ton): ',num2str(Pesp,'%1.2f')]);
disp(' ');
disp('DIMENSIONES DEL DEFLECTOR');
fprintf(fid,'DIMENSIONES DEL DEFLECTOR\n\n');
H = Fc; disp(['H (m): ',num2str(H,'%1.2f')]);
A = 0.8984*H-0.0282; disp(['A (m): ',num2str(A,'%1.2f')]);
B = 0.3738*H+0.1548; disp(['B (m): ',num2str(B,'%1.2f')]);
C = 0.2819*H+0.1646; disp(['C (m): ',num2str(C,'%1.2f')]);
D = 0.7640*H-0.1685; disp(['D (m): ',num2str(D,'%1.2f')]);
E = 0.2524*H-0.0035; disp(['E (m): ',num2str(E,'%1.2f')]);
F = 0.0098*H+0.0940; disp(['F (m): ',num2str(F,'%1.2f')]);
fprintf(fid,'H (m): %1.2f\n',H);
fprintf(fid,'A (m): %1.2f\n',A);
fprintf(fid,'B (m): %1.2f\n',B);
fprintf(fid,'C (m): %1.2f\n',C);
fprintf(fid,'D (m): %1.2f\n',D);
fprintf(fid,'E (m): %1.2f\n',E);
fprintf(fid,'F (m): %1.2f\n',F);
fclose(fid);

```


4. Diseño geométrico del deflector de oleaje

Mediante la aplicación de la metodología y una rutina computacional, definidas en los capítulos anteriores, se realizó el diseño geométrico del deflector, aplicándolo a datos del proyecto realizado por el IMT en el rompeolas del puerto de Ensenada, B.C.

4.1 Antecedentes

En el puerto de Ensenada, B.C., se construyó un rompeolas con la finalidad de disipar la energía del oleaje y crear una zona protegida para realizar operaciones de carga y descarga de embarcaciones en muelles adosados al mismo rompeolas (ver figura 4.1).



Figura 4.1 Definición de la zona de estudio en el rompeolas de puerto Ensenada, B.C

Dentro del proceso de vida útil del rompeolas, se han presentado temporales extraordinarios trayendo como consecuencia el rebase del oleaje sobre el mismo (ver figura 4.2), provocando daños sobre las estructuras contiguas a éste, especialmente un depósito de tierra sobre los patios y muelles situados a respaldo del rompeolas y que tienen como origen el depósito de rezaga de la pedrera en el arranque del rompeolas, fenómeno que se quiere evitar.



Fuente: debate.com.mx, 2019

Figura 4.2 Planteamiento de la problemática en el rompeolas de puerto Ensenada, B.C

Para encontrar la solución al problema anterior se planteó la construcción de un deflector de oleaje colocado sobre la corona del rompeolas actual para evitar el rebase de oleajes extraordinarios, por lo que, en este capítulo, se describe el proceso de cálculo y diseño del dimensionamiento geométrico del deflector mediante la metodología y rutina computacional definida en el presente estudio.

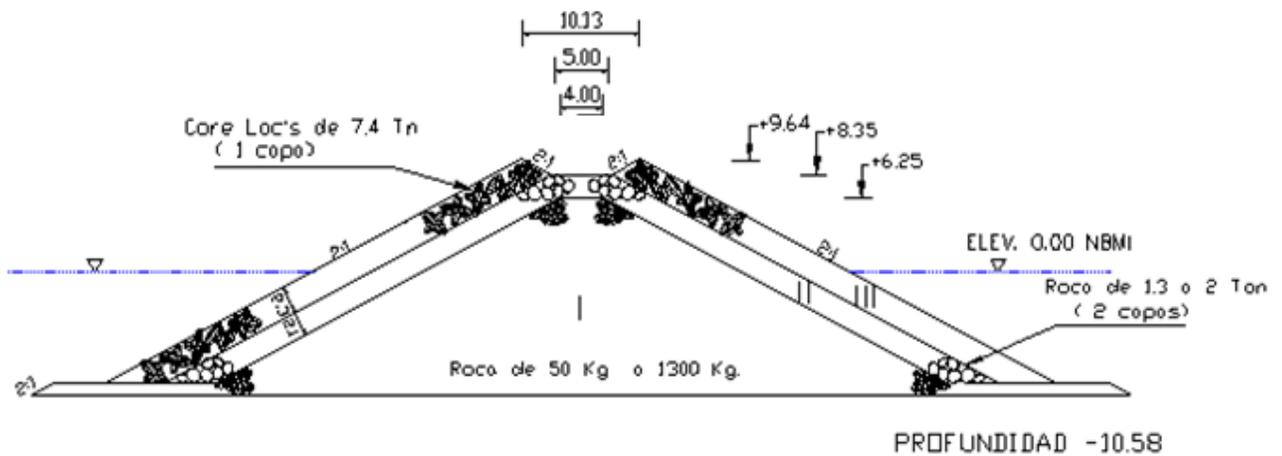
4.2 Diseño estructural del rompeolas actual

El diseño del rompeolas, se retomó del estudio No.VE-16/10: Estudios en modelos hidráulicos para definir el proyecto constructivo de prolongación del rompeolas del puerto de Ensenada, realizado por el IMT, en el cual se definió para el proyecto ejecutivo, las secciones transversales que se muestran en la figura 4.3.

De las modelaciones numéricas de la refracción de oleaje extremal realizadas, se seleccionaron las alturas de ola que sirvieron de base para realizar el diseño estructural del morro y del cuerpo del proyecto, por lo que la altura de ola de diseño del rompeolas es equivalente a 5.05 m, y fue diseñada con elementos prefabricados Core-Loc en la coraza.

Los coeficientes de estabilidad K_D de los elementos de protección Core-Loc a utilizados en el diseño fue $K_D=16$ para el cuerpo y $K_D=13$ para el morro, el coeficiente de capa fue de 1.50 y el porcentaje de vacíos fue del 60%.

Los pesos específicos utilizados fueron para la roca $\gamma_r = 2.60 \text{ t/m}^3$, para los elementos prefabricados Core-Loc $\gamma_c = 2.20 \text{ t/m}^3$ y el peso específico del agua de mar fue de $\gamma_w = 1.03 \text{ ton/m}^3$.



Fuente: IMT, 2010

Figura 4.3 Secciones transversales del proyecto ejecutivo del rompeolas de Ensenada, B.C

Como se observa en la figura 4.3, los pesos de las capas se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de los materiales de las capas que componen la sección transversal de morro del rompeolas de Ensenada, B.C

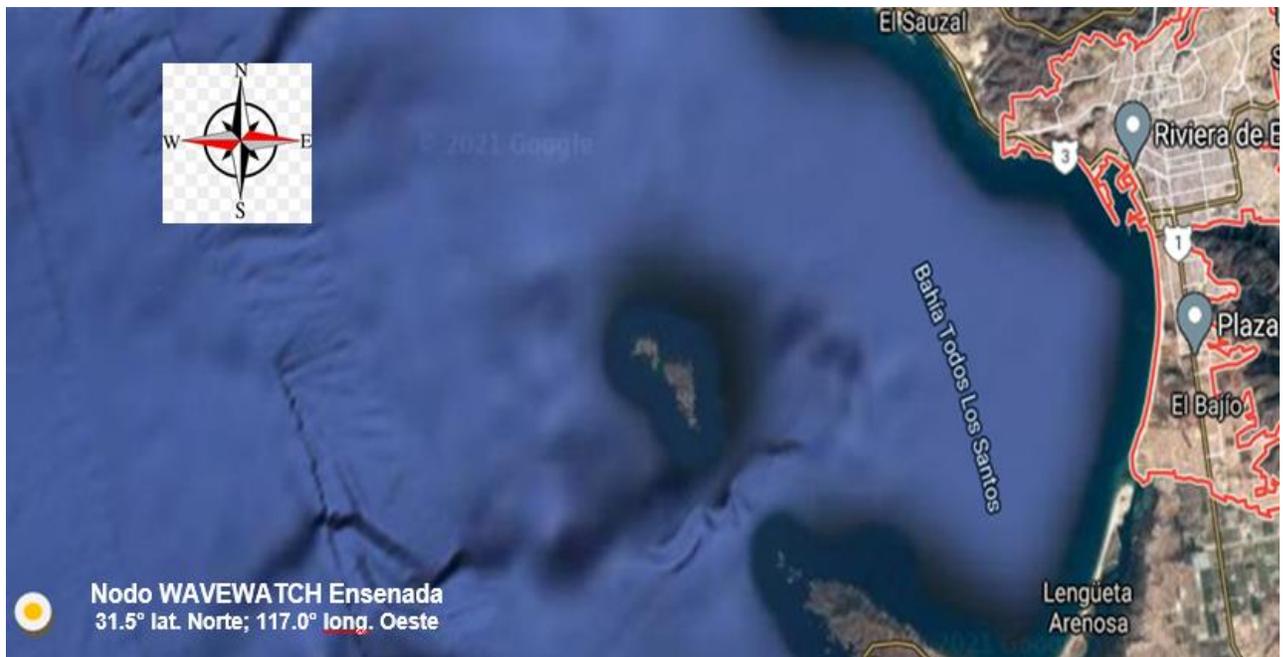
Sección	Capa	Material	Peso	Elevación
Morro	Coraza	Core loc	7.40 T	+9.64 m
	Capa secundaria	Roca	1.3 A 2.0 T	+8.35 m
	Núcleo	Roca	0.05 A 1.3 T	+6.25 m

Fuente: IMT, 2010

4.3 Caracterización del clima de oleaje normal y extremal

La caracterización del oleaje normal, en sus regímenes anual y estacional, en la zona de estudio, se realizó con la información de la base de datos WAVEWATCH III®, la cual fue elaborada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de Norteamérica, NOAA por sus siglas en inglés, utilizando el modelo desarrollado por Ardhuin y otro autores en el año 2010, para 15 mallas regulares, en latitud y longitud, y con la base de datos horaria en alta resolución del viento correspondiente al Reanálisis y Predicción del Sistema de Pronóstico Climático, CFSRR por sus siglas en inglés, para el período comprendido entre el 1 de enero de 1979 y el 31 de diciembre de 2009.

El nodo utilizado se localiza en las coordenadas 31.5° latitud Norte; 117.0° longitud Oeste en aguas del Océano Pacífico, como se muestra en la figura 4.4.



Fuente: Wavewatch III, 2020

Figura 4.4 Ubicación del nodo en coordenadas 31.5° latitud Norte; 117.0° longitud

4.3.1 Caracterización del oleaje normal

La información de oleaje se procesó considerando tres direcciones de incidencia divididas en 60°, correspondiendo estas direcciones al sector comprendido entre la dirección S 60° O y la dirección N 60° O.

Las características medias del oleaje se calcularon de acuerdo con lo siguiente.

El período medio del oleaje \bar{T} se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k \quad \text{Ec. 4.1}$$

Dónde:

T_k Representa una serie de datos de periodos de oleaje en el tiempo.

n_k Es el número total de datos de períodos del oleaje, ($k = 1, 2, \dots, n_k$).

La altura media del oleaje \bar{H} se estimó mediante la siguiente ecuación, la cual toma en cuenta el flujo de la energía del oleaje.

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H_k^2}{\bar{T}}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Dónde:

H_k Es una serie de datos de la altura del oleaje en el tiempo.

(T_k, H_k) Es un grupo de datos de período de altura de ola.

En las tablas 4.2 y 4.3 se presentan las distribuciones de periodos y alturas de ola por dirección de oleaje y en la tabla 4.4 se presenta la distribución de periodos por alturas de ola.

En las tablas 4.5 y 4.6 se presentan las distribuciones de periodos y alturas de ola por dirección de oleaje y en la tabla 4.7 se presenta la distribución de periodos por alturas de ola todas estas distribuciones para la estación primavera.

En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan las distribuciones de periodos y alturas de ola por dirección de oleaje y en la tabla 4.10 se presenta la distribución de periodos por alturas de ola todas estas distribuciones para la estación verano.

En las tablas 4.11 y 4.12 se presentan las distribuciones de periodos y alturas de ola por dirección de oleaje y en la tabla 4.13 se presenta la distribución de periodos por alturas de ola todas estas distribuciones para la estación otoño.

En las tablas 4.14 y 4.15 se presentan las distribuciones de periodos y alturas de ola por dirección de oleaje y en la tabla 4.16 se presenta la distribución de periodos por alturas de ola todas estas distribuciones para la estación invierno.

Tabla 4.2 Distribución de períodos (Tp) por direcciones del oleaje

Dirección	Períodos (s)																							Total	%
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0		
S 60° O		5	4	11	26	23	45	129	221	344	577	835	762	510	266	100	15	10						3883	5.88
OESTE		3	8	7	19	37	176	456	790	1548	2164	2398	1857	997	449	170	62	21		7	4			11173	16.91
N 60° O	1		11	65	231	1306	3546	4063	4024	5463	6949	7845	7089	5028	2940	1410	570	297	144	20			1	51003	77.21
Total	1	8	23	83	276	1366	3767	4648	5035	7355	9690	11078	9708	6535	3655	1680	647	328	151	24	0	1	66059		
%	0.00	0.01	0.03	0.13	0.42	2.07	5.70	7.04	7.62	11.13	14.67	16.77	14.70	9.89	5.53	2.54	0.98	0.50	0.23	0.04	0.00	0.00			

Tabla 4.3 Distribución de alturas (Hs) por direcciones del oleaje

Dirección	Alturas (m)																	Total	%						
	<=0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0			8.5	9.0				
S 60° O	54	471	2335	861	122	30	8		2															3883	5.88
OESTE	26	749	5228	3457	989	356	185	76		37	14	7	3		1									11173	16.91
N 60° O	1	848	12183	19191	10848	4814	1932	728	303	105	41	4			1	1	1	1	1	1	1	1	1	51003	77.21
Total	81	2068	19746	23509	11959	5200	2125	804	349	142	55	11	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	66059	
%	0.12	3.13	29.89	35.59	18.10	7.87	3.22	1.22	0.53	0.21	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Tabla 4.4 Distribución de períodos (Tp) por alturas de ola (Hs)

Hs (m)	Períodos (s)																							Total	%
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0		
0.0 0.5	1		6	15	30							1	9	11	4									81	0.12
0.5 1.0		4	6	7		19	22	84	279	406	361	44	314	232	159	95	41	19	10	6	4			2068	3.13
1.0 1.5			10	47	154	577	1133	1286	1821	3161	3449	3081	2155	1366	785	402	173	102	41	3				19746	29.89
1.5 2.0			1	14	85	665	2151	1979	1538	2382	3681	4060	3234	1807	992	517	212	117	62	11			1	23509	35.59
2.0 2.5				7	77	375	959	845	840	1464	2222	2240	1555	800	335	139	70	27	4					11959	18.10
2.5 3.0					26	60	221	359	323	475	962	1160	857	471	191	62	20	12	1					5200	7.87
3.0 3.5						2	23	84	122	136	171	281	468	453	258	100	20	6	1					2125	3.22
3.5 4.0							3	29	53	75	57	79	149	173	140	32	12	1	1					804	1.22
4.0 4.5								6	13	19	22	45	43	96	67	32	3	2	1					349	0.53
4.5 5.0								4	4	8	5	18	10	45	21	18	2	1						142	0.21
5.0 5.5												5	4	2	17	13	7	3						55	0.08
5.5 6.0										1				2	1	3	2	2						11	0.02
6.0 6.5																		3						3	0.00
6.5 7.0																								1	0.00
7.0 7.5																								2	0.00
7.5 8.0																								1	0.00
8.0 8.5																								2	0.00
8.5 9.0																								1	0.00
Total	1	8	23	83	276	1366	3767	4648	5035	7355	9690	11078	9708	6535	3655	1680	647	328	151	24	0	1	66059		
%	0.00	0.01	0.03	0.13	0.42	2.07	5.70	7.04	7.62	11.13	14.67	16.77	14.70	9.89	5.53	2.54	0.98	0.50	0.23	0.04	0.00	0.00			

Tabla 4.5. Distribución de períodos (Tp) por direcciones del oleaje (primavera)

Dirección	Períodos (s)																							Total	%
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0		
S 60° O					1		5	3	3	38	129	243	213	154	69	28	2							888	4.78
OESTE					1	4	5	36	62	109	337	614	722	557	319	129	52	18	7	1				2973	15.99
N 60° O			1	18	52	310	848	1433	1738	2038	2188	2159	1697	1097	630	305	117	62	29	4				14726	79.23
Total	0	0	1	19	57	315	889	1498	1850	2413	2931	3124	2467	1570	828	385	137	69	30	4	0	0	18587		
%	0.00	0.00	0.01	0.10	0.31	1.69	4.78	8.06	9.95	12.98	15.77	16.81	13.27	8.45	4.45	2.07	0.74	0.37	0.16	0.02	0.00	0.00			

Tabla 4.6 Distribución de alturas (Hs) por direcciones del oleaje (primavera)

Dirección	Alturas (m)																	Total	%						
	<=0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0										
S 60° O		42	461	311	63	8	1		2															888	4.78
OESTE		93	1041	1206	408	121	34	23	20	15	4	5	3											2973	15.99
N 60° O		120	2505	5640	3733	1830	594	202	75	23	4													14726	79.23
Total	0	255	4007	7157	4204	1959	629	225	97	38	8	5	3	0	18587										
%	0.00	1.37	21.56	38.51	22.62	10.54	3.38	1.21	0.52	0.20	0.04	0.03	0.02	0.00											

Tabla 4.7 Distribución de períodos (Tp) por alturas de ola (Hs). (primavera)

Hs (m)	P e r í o d o s (s)																								Total	%	
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0				
0.0 0.5																									0	0.00	
0.5 1.0							2	6	17	40	64	50	32	21	12	6	3	2								255	1.37
1.0 1.5				15	27	104	146	229	372	719	774	670	410	291	151	72	19	7	1							4007	21.56
1.5 2.0			1	4	27	167	496	594	630	882	1223	1232	894	483	271	151	47	35	18	2						7157	38.51
2.0 2.5					3	33	196	456	455	430	583	692	623	389	204	71	45	19	4	1						4204	22.62
2.5 3.0						9	35	139	226	187	197	356	370	248	105	54	17	8	7	1						1959	10.54
3.0 3.5							10	44	84	68	72	85	95	91	53	23	4									629	3.38
3.5 4.0								16	37	41	19	26	33	26	23	3	1									225	1.21
4.0 4.5									3	6	15	10	22	14	12	11	4									97	0.52
4.5 5.0											4	2	9	6	16	1										38	0.20
5.0 5.5											3	1			1	2	1									8	0.04
5.5 6.0																	2	1	2							5	0.03
6.0 6.5																				3						3	0.02
6.5 10.0																										0	0.00
Total	0	0	1	19	57	315	889	1498	1850	2413	2931	3124	2467	1570	828	385	137	69	30	4	0	0	0	0	18587		
%	0.00	0.00	0.01	0.10	0.31	1.69	4.78	8.06	9.95	12.98	15.77	16.81	13.27	8.45	4.45	2.07	0.74	0.37	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.8 Distribución de períodos (Tp) por direcciones del oleaje. (verano)

Dirección	P e r í o d o s (s)																								Total	%	
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0				
S 60° O		5	4	10	21	16	61	126	161	213	228	175	80	51	27	6	2									1186	12.20
OESTE		3	8	6	11	4	77	230	218	384	379	263	139	81	48	9	6	2	3	3						1974	20.30
N 60° O			9	29	115	644	2022	1660	923	575	270	142	80	49	25	13	3	2	1							6562	67.50
Total	0	8	21	45	147	648	2115	1951	1367	1120	862	633	394	210	124	49	15	6	4	3	0	0	0	0	9722		
%	0.00	0.08	0.22	0.46	1.51	6.67	21.75	20.07	14.06	11.52	8.87	6.51	4.05	2.16	1.28	0.50	0.15	0.06	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.9 Distribución de alturas (Hs) por direcciones del oleaje. (verano)

Dirección	A l t u r a s (m)														Total	%												
	<=0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5			7.0											
S 60° O		54	95	760	271	6																				1186	12.20	
OESTE		21	124	1278	533	18																					1974	20.30
N 60° O			54	2328	3346	731	95	8																			6562	67.50
Total	75	273	4366	4150	755	95	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9722		
%	0.77	2.81	44.91	42.69	7.77	0.98	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.10 Distribución de períodos (Tp) por alturas de ola (Hs). (verano)

Hs (m)	P e r í o d o s (s)																								Total	%	
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0				
0.0 0.5		4	6	15	30								8	9	3											75	0.77
0.5 1.0		4	6	7									10	19	12	8	2									273	2.81
1.0 1.5			9	18	88	326	731	669	688	611	459	315	200	123	72	33	13	6	4	1						4366	44.91
1.5 2.0				5	29	317	1281	930	429	370	312	242	138	50	39	8										4150	42.69
2.0 2.5						5	96	315	151	58	56	31	29	13	1											755	7.77
2.5 3.0								12	40	17	5	11	8	2												95	0.98
3.0 3.5											8															8	0.08
3.5 4.0																										0	0.00
4.0 4.5																										0	0.00
4.5 5.0																										0	0.00
5.0 5.5																										0	0.00
5.5 6.0																										0	0.00
6.0 6.5																										0	0.00
6.5 10.0																										0	0.00
Total	0	8	21	45	147	648	2115	1951	1367	1120	862	633	394	210	124	49	15	6	4	3	0	0	0	0	9722		
%	0.00	0.08	0.22	0.46	1.51	6.67	21.75	20.07	14.06	11.52	8.87	6.51	4.05	2.16	1.28	0.50	0.15	0.06	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.11 Distribución de períodos (Tp) por direcciones del oleaje. (otoño)

Dirección	P e r í o d o s (s)																								Total	%	
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0				
S 60° O					1	1	2	6	40	91	137	195	277	292	204	119	42	5	7							1419	8.97
OESTE						2	10	36	118	256	525	653	695	527	253	120	44	15	7	1						3262	20.62
N 60° O			1	18	51	281	534	752	941	1604	1845	1783	1439	930	515	254	105	63	25							11141	70.41
Total	0	0	1	19	54	293	576	910	1288	2266	2693	2755	2258	1387	754	340	125	77	26	0	0	0	0	0	15822		
%	0.00	0.00	0.01	0.12	0.34	1.85	3.64	5.75	8.14	14.32	17.02	17.41	14.27	8.77	4.77	2.15	0.79	0.49	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.12 Distribución de alturas (Hs) por direcciones del oleaje. (otoño)

Dirección	A l t u r a s (m)														Total	%												
	<=0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5			7.0											
S 60° O		230	951	218	18	2																				1419	8.97	
OESTE		313	1927	849	135	31	7																				3262	20.62
N 60° O			279	3777	4242	1893	658	223	54	13	2																11141	70.41
Total	0	822	6655	5309	2046	691	230	54	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15822		
%	0.00	5.20	42.06	33.55	12.93	4.37	1.45	0.34	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.13 Distribución de períodos (Tp) por alturas de ola (Hs). (otoño)

Hs (m)	Períodos (s)																				Total	%			
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0			22.0	23.0	24.0
0.0 0.5																								0	0.00
0.5 1.0							10	6	37	131	168	135	120	104	58	34	10		2	4	3			822	5.20
1.0 1.5			1	14	32	125	190	330	588	1199	1259	1100	781	475	296	149	66	40	10				6655	42.06	
1.5 2.0				5	20	139	321	355	345	645	935	964	782	388	218	114	44	23	11				5309	33.55	
2.0 2.5					2	14	47	131	154	156	279	428	393	263	112	45	11	9	2				2046	12.93	
2.5 3.0						5	10	40	54	55	62	109	157	117	62	17	2	1					691	4.37	
3.0 3.5							2	15	12	23	20	23	35	78	18	4							230	1.45	
3.5 4.0								2	2	16	3	6	6	8	10	1							54	0.34	
4.0 4.5										2													13	0.08	
4.5 5.0											2												2	0.01	
5.0 5.5																							0	0.00	
5.5 6.0																							0	0.00	
6.0 6.5																							0	0.00	
6.5 10.0																							0	0.00	
Total	0	0	1	19	54	293	576	910	1288	2266	2693	2755	2258	1387	754	340	125	77	26	0	0	0	15822		
%	0.00	0.00	0.01	0.12	0.34	1.85	3.64	5.75	8.14	14.32	17.02	17.41	14.27	8.77	4.77	2.15	0.79	0.49	0.16	0.00	0.00	0.00			

Tabla 4.14 Distribución de períodos (Tp) por direcciones del oleaje. (invierno)

Dirección	Períodos (s)																				Total	%		
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0			22.0	23.0
S 60° O						3	21	18	25	1	8	40	87	82	72	27	3	2	1				390	1.78
OESTE						2	18	27	46	107	302	518	718	634	344	152	65	23	5	2	1		2964	13.52
N 60° O	1				13	71	142	218	422	1246	2646	3761	3873	2952	1770	838	345	170	89	16		1	18574	84.70
Total	1	0	0	0	18	110	187	289	530	1556	3204	4566	4589	3368	1949	906	370	176	91	17	0	1	21928	
%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.50	0.85	1.32	2.42	7.10	14.61	20.82	20.93	15.36	8.89	4.13	1.69	0.80	0.41	0.08	0.00	0.00		

Tabla 4.15 Distribución de alturas (Hs) por direcciones del oleaje. (invierno)

Dirección	Alturas (m)															Total	%							
	<=0.5	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0			7.5	8.0	8.5	9.0			
S 60° O		104	163	61	35	20																	390	1.78
OESTE	5	219	982	869	428	204	144	53	24	22	10	2											2964	13.52
N 60° O	1	395	3573	5963	4491	2231	1107	472	215	80	37	4			1	1	1	1		1		1	18574	84.70
Total	6	718	4718	6893	4954	2455	1258	525	239	102	47	6	0	0	1	2	1	2	1	2	1	1	21928	
%	0.03	3.27	21.52	31.43	22.59	11.20	5.74	2.39	1.09	0.47	0.21	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Tabla 4.16 Distribución de períodos (Tp) por alturas de ola (Hs). (invierno)

Hs (m)	Períodos (s)																				Total	%		
	<3.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0			22.0	23.0
0.0 0.5	1											1	1	2	1								6	0.03
0.5 1.0						7	7	3	5	49	118	146	136	97	70	43	20	13	6	3	2		718	3.27
1.0 1.5						7	22	66	58	173	632	957	996	764	477	266	148	75	49	26	2		4718	21.52
1.5 2.0						9	42	53	100	134	485	1211	1622	1420	886	464	244	121	59	33	9	1	6893	31.43
2.0 2.5						2	25	36	57	85	196	546	1071	1195	890	483	219	83	42	21	3		4954	22.59
2.5 3.0							12	15	30	39	64	211	486	625	490	304	120	43	11	5			2455	11.20
3.0 3.5							2	11	25	26	37	79	173	338	284	187	73	16	6	1			1258	5.74
3.5 4.0								3	11	14	18	35	47	110	139	107	28	11			1		525	2.39
4.0 4.5									3	5	2	12	18	29	84	52	28	3	2	1			239	1.09
4.5 5.0										4	2	3	9	4	29	30	18	2	1				102	0.47
5.0 5.5											2	3	4	1	15	12	7	3					47	0.21
5.5 6.0																							6	0.03
6.0 6.5																							0	0.00
6.5 7.0																							1	0.00
7.0 7.5													1	1									2	0.00
7.5 8.0																							1	0.00
8.0 8.5																							2	0.00
8.5 9.0																							1	0.00
Total	1	0	0	0	18	110	187	289	530	1556	3204	4566	4589	3368	1949	906	370	176	91	17	0	1	21928	
%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.50	0.85	1.32	2.42	7.10	14.61	20.82	20.93	15.36	8.89	4.13	1.69	0.80	0.41	0.08	0.00	0.00		

4.3.2 Caracterización del clima extremal del oleaje

Para definir las características del oleaje extremal, la información de oleaje del WAVEWATCH III® se procesó para formar series de datos con los eventos de tormenta, utilizando el mismo nodo que para el oleaje normal, localizado en las coordenadas 31.5° latitud Norte; 117.0° longitud Oeste, como se muestra en la figura 4.4.

El procesamiento de datos se realizó de la siguiente manera:

- Obtenidas las series de datos con los eventos de tormenta, se seleccionaron 4 funciones de distribución de probabilidad, para evaluar cada conjunto de dichos datos.

Las distribuciones seleccionadas fueron la distribución Exponencial, la distribución de Weibull, la distribución de Gumbel (Fisher-Tippett I) y la distribución de Frechet (Fisher Tippett II), cuyas expresiones se indican a continuación:

$$\text{(Exponencial)} \quad F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\text{(Weibull)} \quad F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$\text{(FT-I)} \quad F = P(X \leq x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\text{(FT-II)} \quad F = P(X \leq x) = e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Se ordenaron de forma descendente los valores de cada una de las series de datos, y se le asignó a cada altura de ola (x_i) una probabilidad de no excedencia (F_i) en función del orden (m) de cada valor, mediante la expresión (1.7):

$$F_i = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta}, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad \text{Ec. 4.7}$$

Los valores de las constantes α y β para cada una de las funciones de distribución de probabilidad son los siguientes:

$$\bullet \text{Exponencial} \quad \alpha = \dots \quad \beta = 1 \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$\bullet \text{Weibull} \quad \alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k} \quad \beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$\bullet \text{FT-I} \quad \alpha = 0.44 \quad \beta = 0.12 \quad \text{Ec. 4.10}$$

$$\bullet \text{FT-II} \quad \alpha = 0.44 + 0.52/k \quad \beta = 0.12 - 0.11/k \quad \text{Ec. 4.11}$$

Las funciones de distribución se reescribieron en la forma $X = AY + B$, para resolver la ecuación se aplicó el método de mínimos cuadrados y se obtienen los valores de los parámetros de escala y de posición (A y B) de cada una de dichas funciones, obteniendo primeramente el valor de la variable reducida Y , cuyas expresiones se indican a continuación:

$$\text{Exponencial} \quad Y = -\ln(1 - F) \quad \text{Ec. 4.12}$$

$$\text{Weibull} \quad Y = \left(-\ln(1 - F)\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{Ec. 4.13}$$

$$\text{FT-I} \quad Y = -\ln(-\ln(F)) \quad \text{Ec. 4.14}$$

$$\text{FT-II} \quad Y = (-\ln(F))^{-\frac{1}{k}} \quad \text{Ec. 4.15}$$

Cabe señalar que en el caso de las distribuciones FT-I y exponencial (que tienen dos parámetros) pueden ser analizadas por el método de los mínimos cuadrados directamente. Las distribuciones FT-II y Weibull tienen tres parámetros, por lo tanto, tienen que ser modificadas en una forma de funciones de dos parámetros, fijando para ello el parámetro de forma (k).

La razón principal para fijar el parámetro k es la dificultad de predecir la verdadera matriz de distribución de una muestra de tamaño pequeño. Goda (1988) demostró esta dificultad recomendando fijar el parámetro k en uno de los siguientes valores para estas distribuciones: Weibull ($k = 0.75; 1.0; 1.4; 2.0$) y FT-II ($k = 2.5; 3.3; 5.0; 10.0$).

Los coeficientes de la regresión A y B de las funciones de distribución se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{\text{Cov}(Y, X)}{\text{Var}(Y)} ; \quad B = \bar{X} - A\bar{Y} \quad \text{Ec. 4.16}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i ; \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{Ec.4.17}$$

$$\text{Var}(Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2 ; \quad \text{Cov}(Y, X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X}) \quad \text{Ec. 4.18}$$

Para elegir la función de distribución con la mejor aproximación a los datos de oleaje, se calcularon el coeficiente de correlación lineal (ρ) y el error relativo promedio (E), utilizando las dos siguientes ecuaciones:

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}} ; \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{i,estimada} - x_{i,observada}|}{x_{i,observada}} \quad \text{Ec. 4.20}$$

Tomando las funciones de distribución expresadas en la forma $X = AY + B$ y considerando que el periodo de retorno (T_r) puede expresarse como:

$$T_r = \frac{1}{\lambda(1-F(x))}; F = 1 - \frac{1}{\lambda T_r} \quad \text{Ec. 4.21}$$

Las ecuaciones para obtener la altura de ola (x^T) asociada a cierto periodo de retorno (T_r) quedan definidas como sigue:

Exponencial $x^T = A \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T_r} \right) \right) + B \quad \text{Ec. 4.22}$

Weibull $x^T = A \left(\ln(\lambda T_r)^{\frac{1}{k}} \right) + B \quad \text{Ec. 4.23}$

FT-I $x^T = A \left(-\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \right) \right) + B \quad \text{Ec 4.24}$

FT-II $x^T = A \left(k \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \right)^{-\frac{1}{k}} \right) + B \quad \text{Ec. 4.25}$

Donde λ es la densidad de muestreo, la cual es definida como la razón entre el número de eventos de tormenta y el número de años del periodo de observación.

Finalmente, el periodo del oleaje (T_p) asociado a las alturas de ola para diferentes periodos de retorno, se obtuvo con la siguiente ecuación.

$$T_p = 4.4 \sqrt{H_s} \quad \text{Ec. 4.26}$$

Aplicando el análisis extremal se obtuvieron los coeficientes de correlación de la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Distribuciones resultantes del procesamiento de datos del WAVEWATCH III Hindcast phase 2 (NOAA) del nodo 31.5° latitud Norte; 117.0° longitud Oeste

Tr	GUMBEL (FT-I)		EXPONENCIAL		WEIBULL						FRECHET		FT-II							
	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)	k = 0.75		k = 1.0		k = 1.4		k = 2.0		k = 2.5		k = 3.3		k = 5.0		k = 10.0	
5	5.48	10.30	5.62	10.43	5.52	10.33	5.56	10.37	5.52	10.34	5.44	10.26	5.26	10.09	5.39	10.21	5.47	10.29	5.49	10.31
10	5.82	10.61	6.08	10.85	6.05	10.82	5.99	10.77	5.85	10.64	5.69	10.49	5.77	10.57	5.90	10.69	5.94	10.72	5.90	10.69
25	6.25	11.00	6.68	11.37	6.82	11.49	6.57	11.28	6.26	11.01	5.98	10.76	6.71	11.40	6.75	11.43	6.66	11.35	6.48	11.20
50	6.58	11.29	7.13	11.75	7.43	12.00	7.00	11.65	6.55	11.26	6.18	10.94	7.68	12.19	7.57	12.11	7.30	11.88	6.95	11.60
75	6.77	11.45	7.40	11.97	7.81	12.29	7.26	11.86	6.72	11.41	6.30	11.04	8.38	12.74	8.13	12.55	7.71	12.22	7.23	11.83
100	6.91	11.57	7.59	12.12	8.08	12.51	7.44	12.00	6.84	11.50	6.37	11.11	8.96	13.17	8.57	12.88	8.03	12.47	7.45	12.01
A	0.4725		0.6566		0.4002		0.6284		0.9178		1.2517		0.2172		0.2909		0.3618		0.4234	
B	4.2270		3.8563		4.0214		3.8695		3.6612		3.3882		4.2320		4.2091		4.2018		4.2087	
R	0.8597		0.8907		0.9388		0.9164		0.8634		0.7971		0.9624		0.9722		0.9526		0.9123	

La distribución con mejor ajuste de los datos es Frechet (FT-II) para el umbral $k = 3.3$, con un coeficiente de correlación de 0.9722, lo que se resumen en la distribución de la tabla 4.18 y en la figura 4.5.

Tabla 4.18 Alturas de ola y periodos asociados para diferentes periodos de retorno, distribución de Frechet correlación 0.9722

Periodo de retorno en años (T_r)	Altura de Ola en m (H)	Periodo de oleaje en s (T)
5	5.39	10.21
10	5.90	10.69
25	6.75	11.43
50	7.57	12.11
75	8.13	12.55
100	8.57	12.88

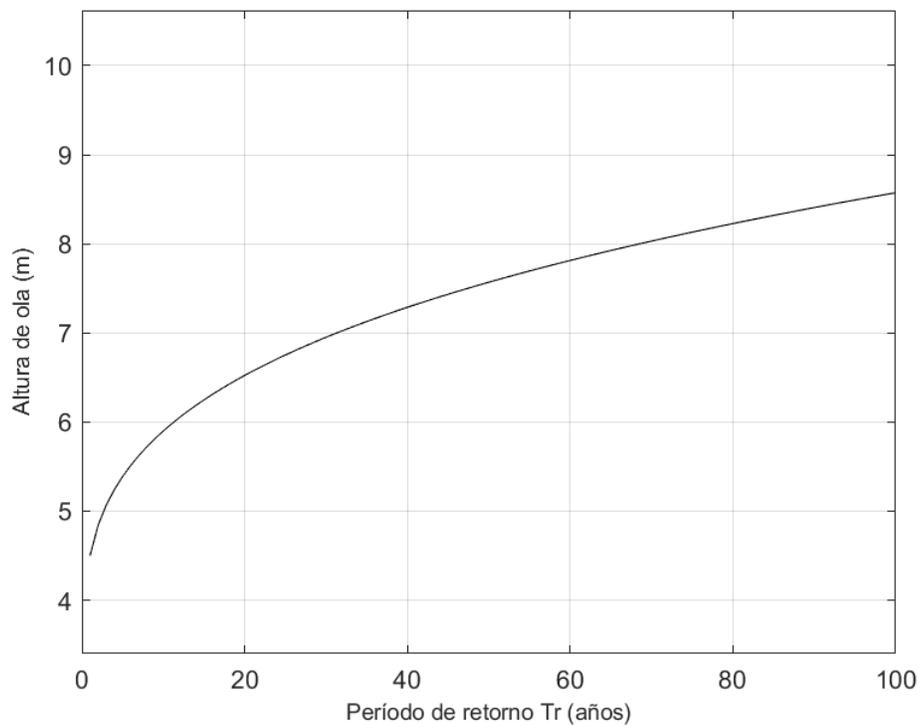
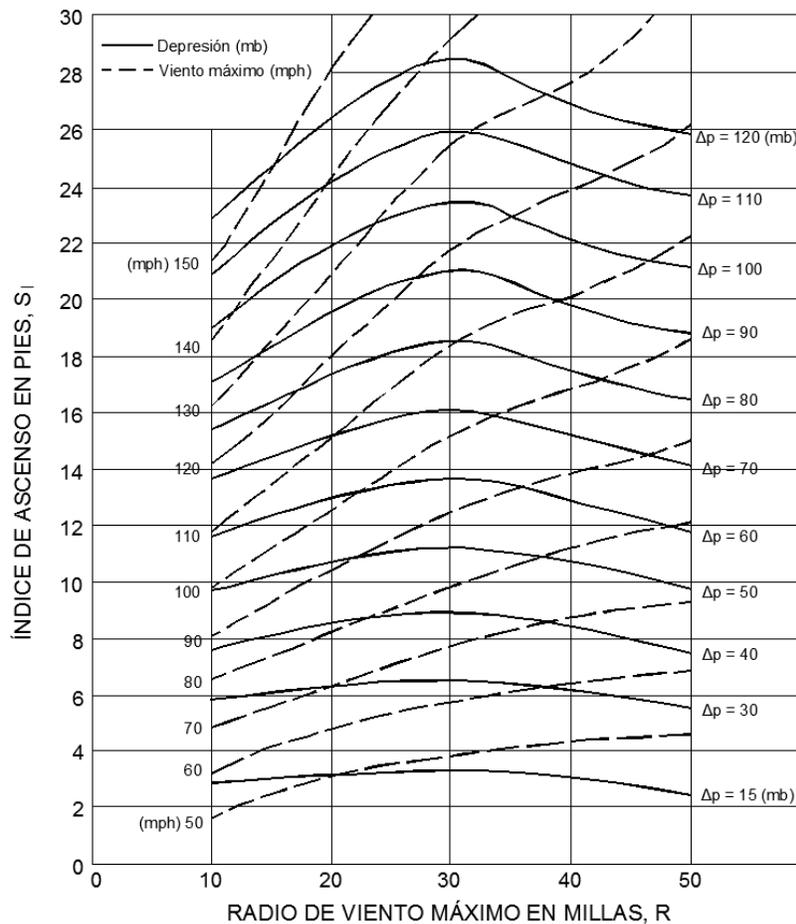


Figura 4.5 Representación gráfica de la relación de las alturas de ola contra periodos de retorno, distribución de Frechet correlación 0.9722

4.3.3 Cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta

El cálculo de la sobreelevación por marea de tormenta se realizó de acuerdo al criterio propuesto por el Shore Protection Manual, para los periodos de retorno de 50 y 100 años, el cual considera lo siguiente:

Se requiere determinar varios factores: latitud y longitud de la zona de estudio, altura y período en aguas profundas, y con lo anterior se determinarán la presión, la depresión y el radio máximo del huracán. Tomando en cuenta la información antes mencionada, se calcula el valor del índice de ascenso (S_i), mediante el nomograma que se muestra en la figura 4.6



Fuente: Jelesnianski, 1972

Figura 4.6 Gráfico de estimación del índice de ascenso S_i

Para el cálculo del factor F_M , se consultó en el Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México (ACCTM), los valores medio y máximo de las velocidades de

desplazamiento de los ciclones históricos ocurridos en el Pacífico de 1949 al 2000, se determinan utilizando las figuras 4.7 y 4.8.

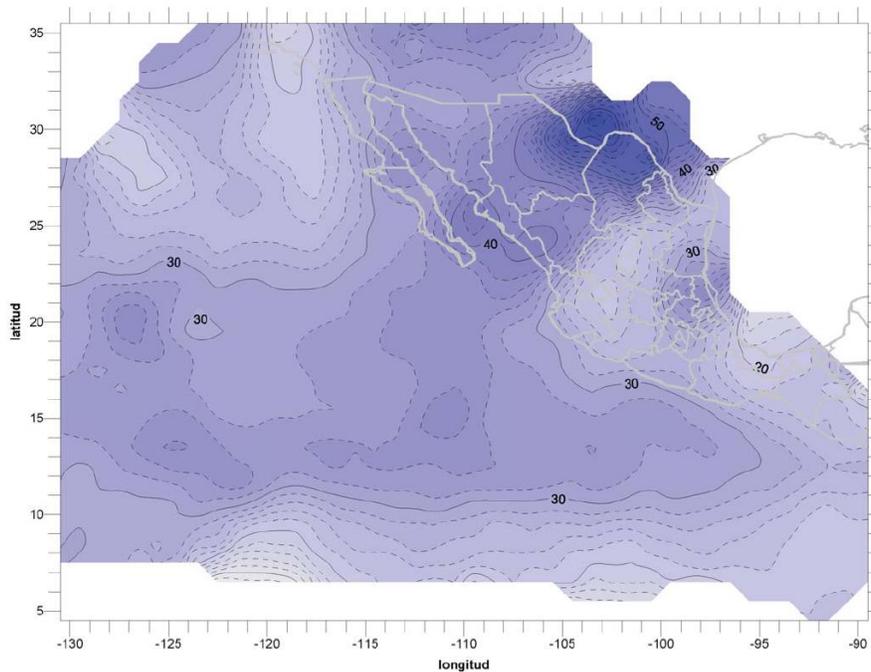


Figura 4.7 Velocidad máxima de translación de ciclones para el Pacífico nororiental (km/h)

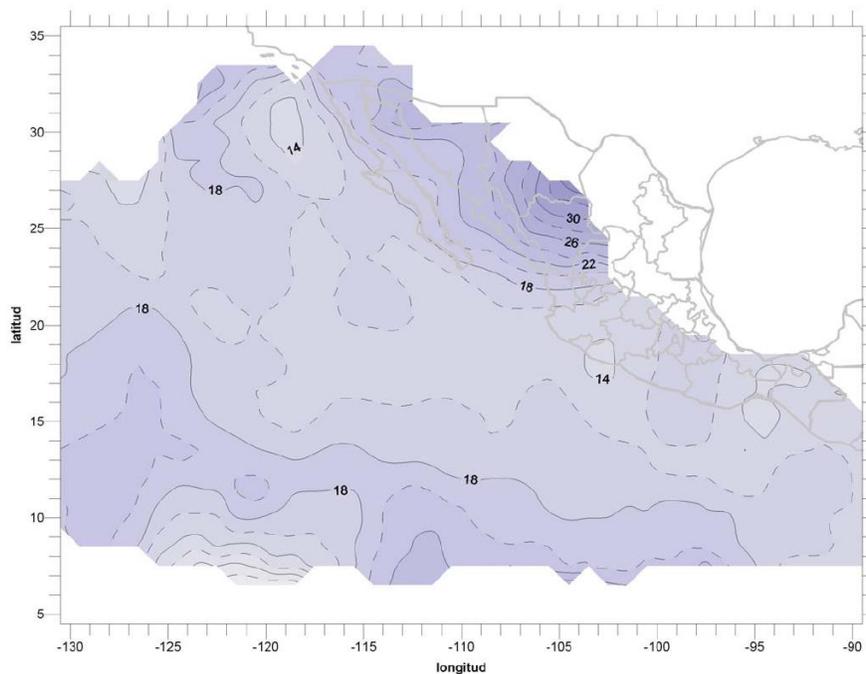


Figura 4.8 Velocidad media de translación de ciclones para el Pacífico Nororiental (km/h)

Además, se requiere determina la dirección media de traslación de los huracanes, dicho valor se determina con la figura 4.9.

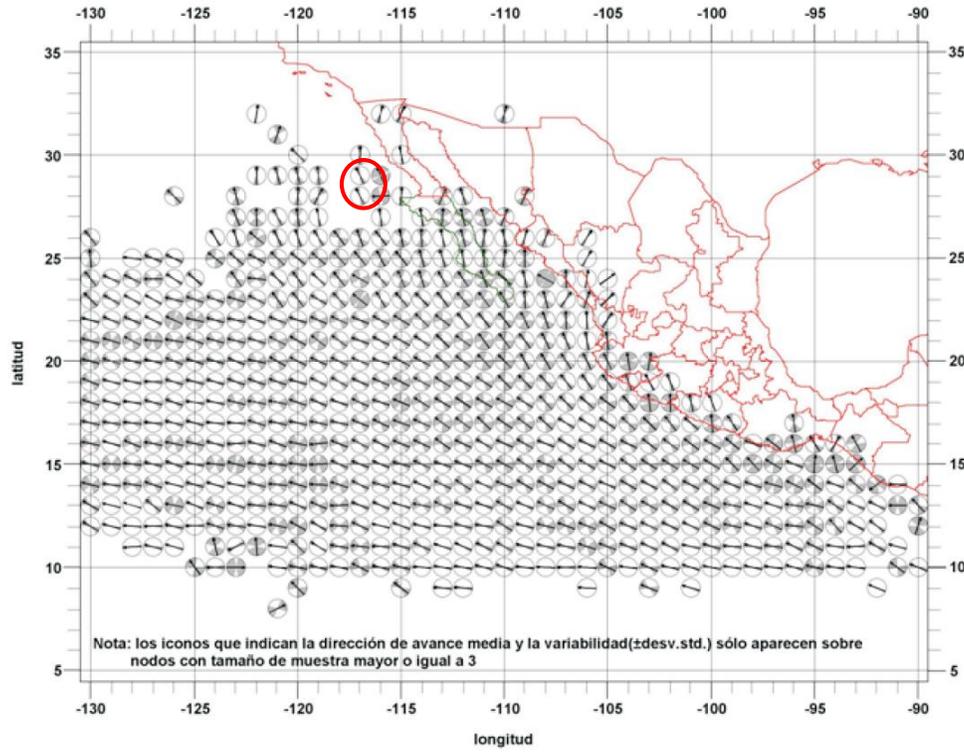
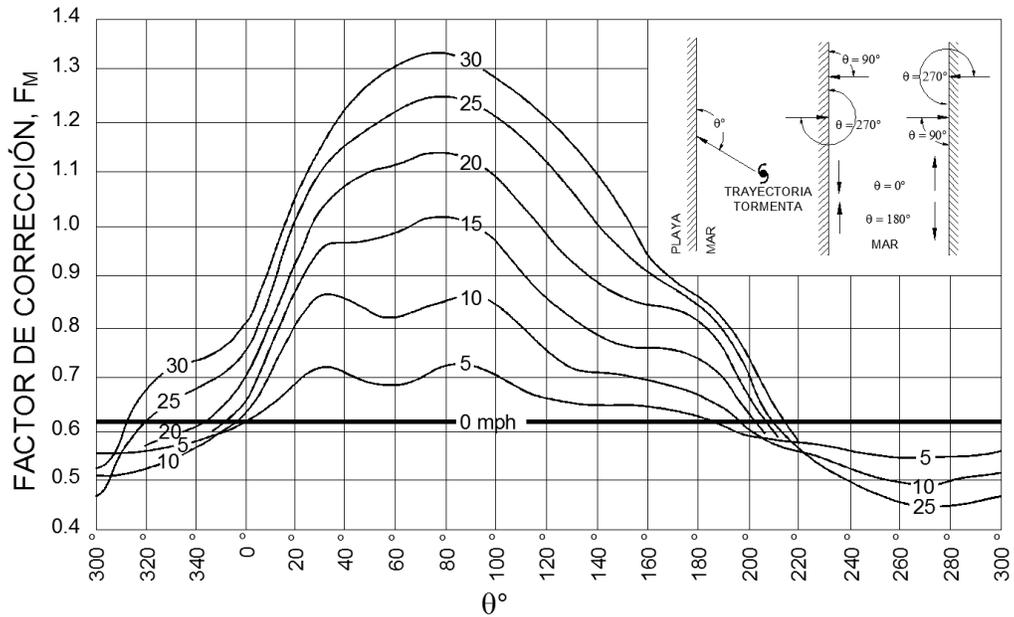


Figura 4.9 Dirección de translación (media y variabilidad) para ciclones tropicales para el Pacífico Nororiental (°)



Fuente: Jelesnianski, 1972

Figura 4.10 Nomograma para determinar el factor de ajuste

De acuerdo con los valores señalados y el nomograma para determinar el factor de ajuste F_M mostrado en la figura 4.10, se determinó el valor del factor de ajuste para cada dirección de oleaje:

Tabla 4.19 Factores de ajuste para cada dirección de oleaje ($T_r=50$ años)

Direcciones de Oleaje	F_M
S 60° W	0.63
Oeste	0.75
N 60° W	0.84
$F_{M\text{ MAX}} =$	0.84

Dada la pendiente de la playa de 0.05 definida de la batimetría de referencia para el estudio base de dicho proyecto, se calcula la ola rompiente H_B , con apoyo del nomograma de la figura 4.11.

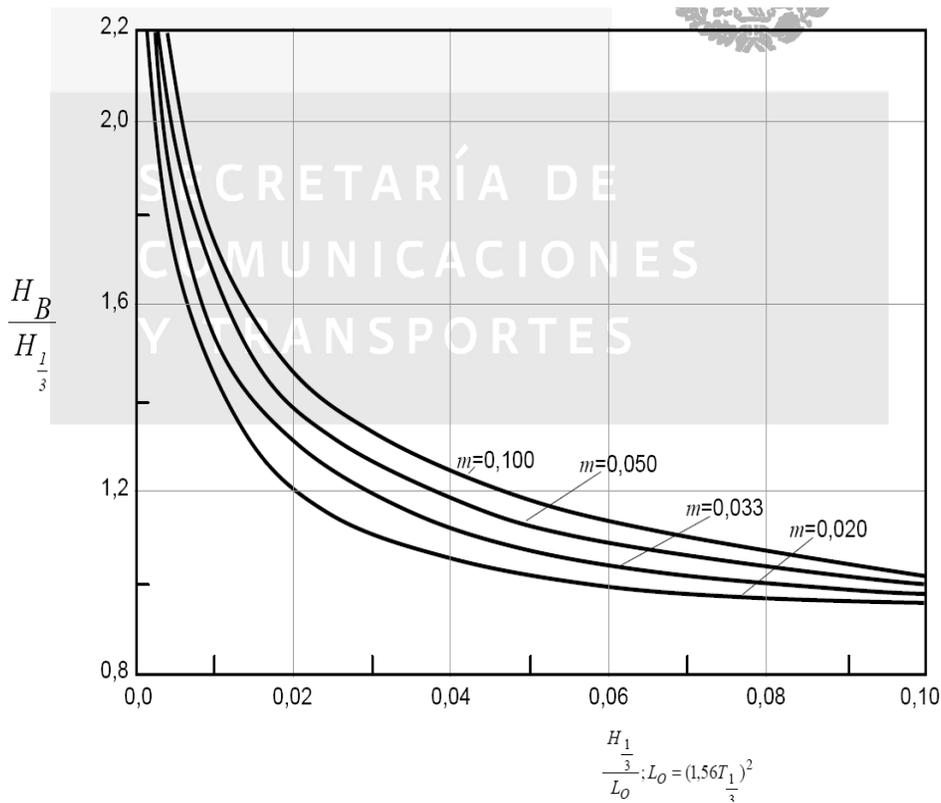


Figura 4.11 Nomograma para determinar la relación $H_B/H_{1/3}$

Se determina la longitud de la ola en aguas profundas, mediante la ecuación 4.34.

$$L_0 = 1.56 T^2$$

Ec. 4.34

$$L_o = 228.78 \text{ m.}$$

$$H_{1/3}/L_o = 0.033$$

$$H_B/H_{1/3} = 1.22$$

Por lo que despejando valores se obtiene que $H_B = 9.24 \text{ m}$

El ascenso producido por el viento, comúnmente llamado marea de viento (S_p), se calculó para cada dirección de incidencia utilizando la ecuación 4.35.

$$S_p = S_I (F_M) \quad \text{Ec. 4.35}$$

Donde (S_p) es el ascenso producido por la marea de viento (en pies), (S_I) es el índice de ascenso y (F_M) es el factor de ajuste, por lo tanto:

Tabla 4.20 Factores de ascenso para cada dirección de oleaje (50 años)

Direcciones de Oleaje	S_p	
S 60° W	1.32	m
Oeste	1.58	m
N 60° W	1.76	m
$S_{P \text{ MAX}} =$	1.76	m

El ascenso producido por el viento $S_{P\text{máx}}$, es equivalente a 1.76 m para periodo de retorno de 50 años.

Para el cálculo del ascenso de la ola sobre la costa se determina la sobreelevación de la superficie del mar debido al transporte de la masa de agua sobre la costa debido al oleaje (Wave Setup), se utilizó la expresión siguiente, donde (S_w) es el ascenso de la ola, (H_b) es la altura de la ola rompiente, (g) es la aceleración de la gravedad y (T) es el período de la ola, por lo tanto, $S_w = 1.61 \text{ m}$.

$$S_w = 0.19 \left(1 - \left(\frac{H_b}{gT^2} \right)^{1/2} \right) H_b \quad \text{Ec. 4.36}$$

Para determinar el máximo nivel de ascenso del mar, se comparó el valor resultante de la suma de ($S_p + S_w$) contra el valor de $S_{P\text{max}}$, debiendo aplicar uno de los siguientes criterios:

Si $\rightarrow S_p + S_w > S_{P\text{max}}$; se utiliza la ecuación

$$\Delta Z_T = Z_{MA} + (S_p + S_w) \quad \text{Ec. 4.37}$$

Si $\rightarrow S_p + S_w < S_{P\text{max}}$; se utiliza la ecuación

$$\Delta Z_T = Z_{MA} + S_{P_{max}} \quad \text{Ec. 4.38}$$

Donde (Z_{MA}) es la amplitud de la marea astronómica.

Para el caso de este análisis se tomaron valores de la tabla de predicción de mareas, de las cuales se obtienen las elevaciones definidas en la tabla 4.21, por lo que se evalúan los niveles y se define $Z_{MA} = 1.40$ m.

Tabla 4.21 Amplitud de la marea astronómica

Nivel de referencia	Elevación con Respecto al NBM
Nivel de Pleamar Media	0.577
Nivel de Bajamar Media Inferior	-0.822

Fuente: TPM, 1983

De acuerdo con la metodología expresada mediante las ecuaciones 4.32 y 4.33, el valor de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta respecto al N. B. M. I. por cada dirección de incidencia, se muestra en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta para el período de retorno de 50 años

Direcciones de Oleaje	DZ _T	
S 60° W	4.33	m
OESTE	4.59	m
N 60° W	4.77	m
DZ _T =	4.56	m

Finalmente obtenemos que el valor de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta respecto al N. B. M. I. para periodo de retorno de 50 años es $DZ_{TT50} = 4.56$ m.

Tomando en cuenta, el procedimiento anteriormente descrito, se calculó la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta para un período de retorno de 100 años, y para ello se definió la sobreelevación del mar por cada dirección, dichos resultados se muestran en la tabla 2.23.

Tabla 4.23 Sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta para el periodo de retorno de 100 años

Direcciones de Oleaje	DZ _T	
S 60° W	4.55	m
Oeste	4.81	m
N 60° W	4.99	m
DZ _T =	4.78	m

El valor de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta respecto al N. B. M. I. para el periodo de retorno de 100 años es $DZ_{TTr100} = 4.78$ m.

4.3.4 Aplicación del programa para el diseño geométrico del deflector de oleaje de la sección morro del rompeolas del puerto de Ensenada, B.C

Tomando como base los resultados de los cálculos realizados en los subcapítulos anteriores, mismos que sirven como base de la para los datos de entrada y referencia del diseño geométrico del deflector, se aplica la metodología definida en el capítulo 2, se definen los datos de entrada conforme a la tabla 4.24.

Tabla 4.24 Definición de los datos de entrada para el programa computacional, caso estudio sección morro del rompeolas de Ensenada, B. C

Variable	Valor	Unidad
Altura de ola en aguas profundas (H0)	8.57	m
Altura de ola al pie del rompeolas (Hsd)	5.05	m
Elevación de la corona del rompeolas (Ac)	9.64	m
Periodo del oleaje en aguas profundas (T0)	12.88	s

Para definir la elevación de la corona del deflector (A_r), para evitar el rebase del oleaje, se realizó un cálculo teórico en base al método descrito por la Coastal Engineering Technical Note (CETN) de 1977, para aplicar dicho método se utilizaron

los datos de la marea astronómica y de tormenta indicados en el capítulo 3, la altura de ola al pie del rompeolas, conforme al cual se definió que run up es equivalente a 10.98 m, por lo que se definió lo siguiente:

Variable	Valor	Unidad
Elevación propuesta de la corona del deflector (Rc)	12	m

Con los datos de proyecto, el programa calcula los siguientes datos:

Altura del deflector expuesta:

$$F_c = R_c - A_c = 2.71 \text{ m}$$

$$L_{p0} = 259.01 \text{ m}$$

Posteriormente el programa verifica que el criterio de rebase de Iribarren no se cumple debido a que la tolerancia de +/-1.0 m de la altura al pie del rompeolas $H_{s,d}$ se ubica en el rango de 4.05 m a 6.05 m, dadas las resultantes siguientes:

Criterio de Iribarren

$$A_c = 0.8H_{s,d} = 4.04 \text{ m}$$

$$R_c = 1.5H_{s,d} = 7.58 \text{ m}$$

Dado que no se cumple con el criterio de rebase de Iribarren se deberá realizar el dimensionamiento, con el criterio de las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 antes expuestas, de tal manera que:

Tomando en cuenta que $\gamma_w = 1.03 \text{ ton/m}^3$

Peso del monolito por metro de dique Pesp

$$P_{esp} = ((69.5992 (F_c/H_{s,0})^3) + (135.7691(F_c/H_{s,0})^2)$$

$$- (89.9809 (F_c/H_{s,0})) + 24.601)(\gamma_w F_c^2) = 89.76 \text{ T.}$$

Ancho del deflector de oleaje Fesp

$$F_{esp} = ((0.024*(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2)^3) + (0.181(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2)^2)$$

$$+ 0.631(P_{esp}/\gamma_w H_{s,0}^2) + 0.128)*(H_{s,0}) = 5.69 \text{ m}$$

Altura total del deflector de oleaje hf

$$h_f = (0.1798(F_{esp}/L_0) + 0.0013)*(gT_p^2) = 8.54 \text{ m}$$

Desplante de proyecto

Desplante (D)= $Rc-h_f = 4.48$ m

Para diseñar la curvatura de la altura del deflector expuesta al oleaje, el programa emplea las ecuaciones lineales referidas como 3.10 a 3.15 para definir cada lado, resultando las dimensiones recomendables presentadas en la tabla 4.25 y se representan en el diagrama.

Tabla 4.25 Dimensionamiento de la curvatura del deflector de oleaje para el morro del rompeolas de Ensenada, B. C

Variable		Dimensión	
$A = 0.8984 Fc - 0.0282$	=	2.09	m
$B = 0.3738 Fc + 0.1548$	=	1.04	m
$C = 0.2819 Fc + 0.1646$	=	0.83	m
$D = 0.764 Fc - 0.1685$	=	1.63	m
$E = 0.2524 Fc - 0.0035$	=	0.59	m
$F = 0.0098 Fc + 0.094$	=	0.12	m

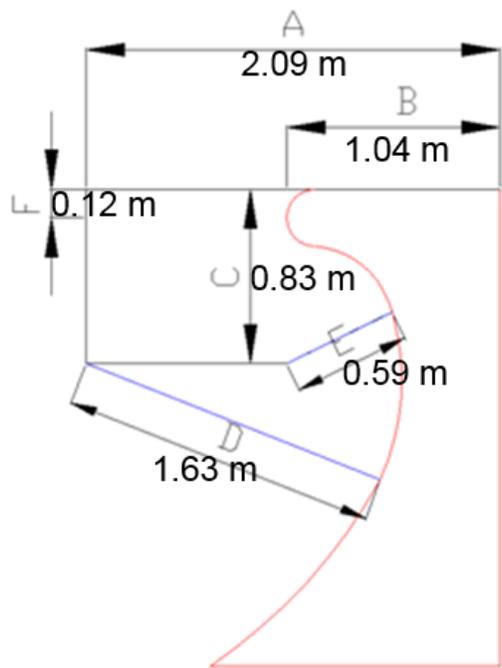


Figura 4.12 Diagrama del dimensionamiento geométrico de la curvatura del deflector

Los resultados mostrados se generaron en una hoja de cálculo en Excel con objeto de mostrar explícitamente los resultados a cada variable, sin embargo, en la figura 4.13. se muestra la Impresión de pantalla de resultados de la corrida para el dimensionamiento geométrico del deflector para el morro del rompeolas de Ensenada, B.C.

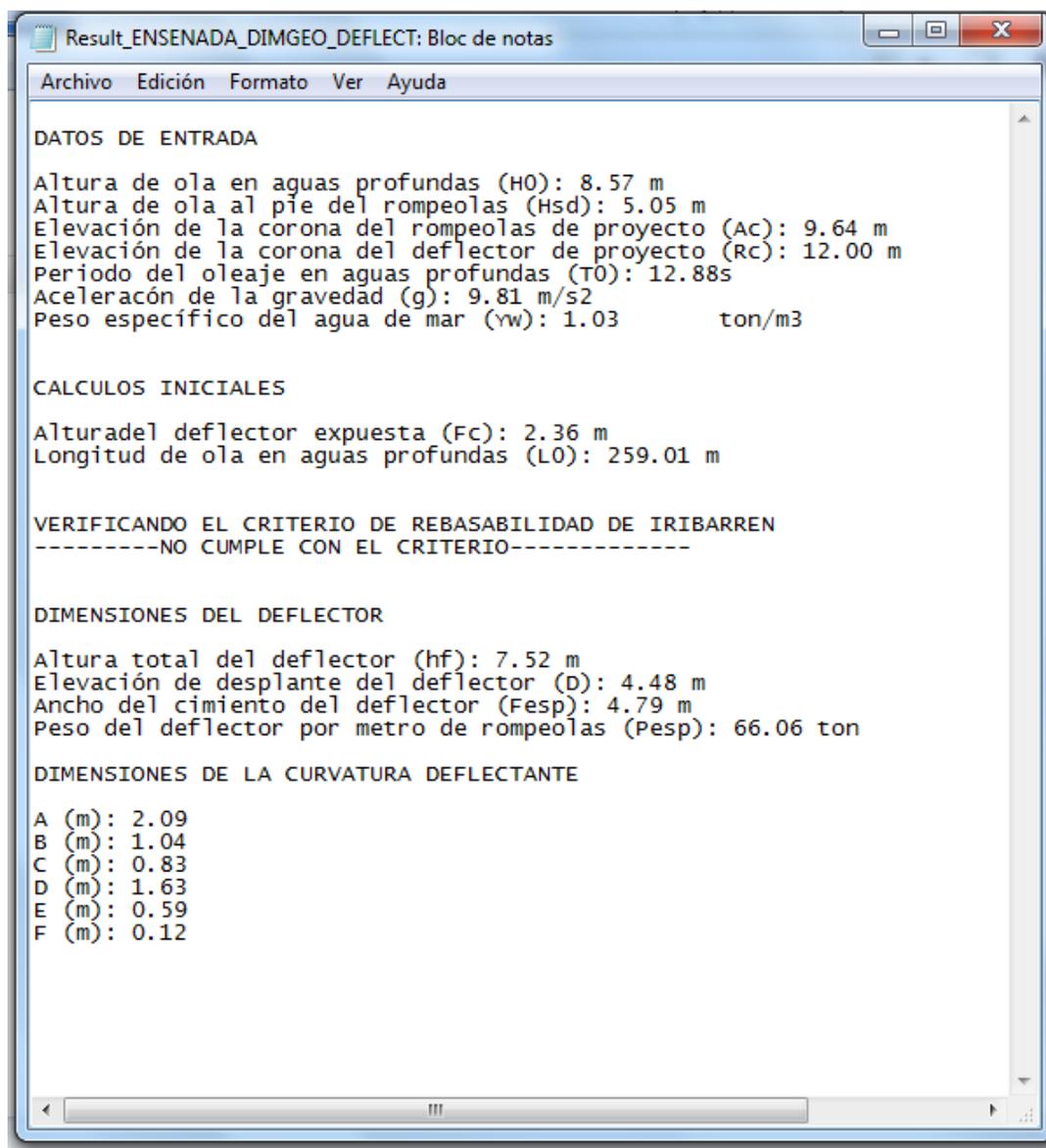


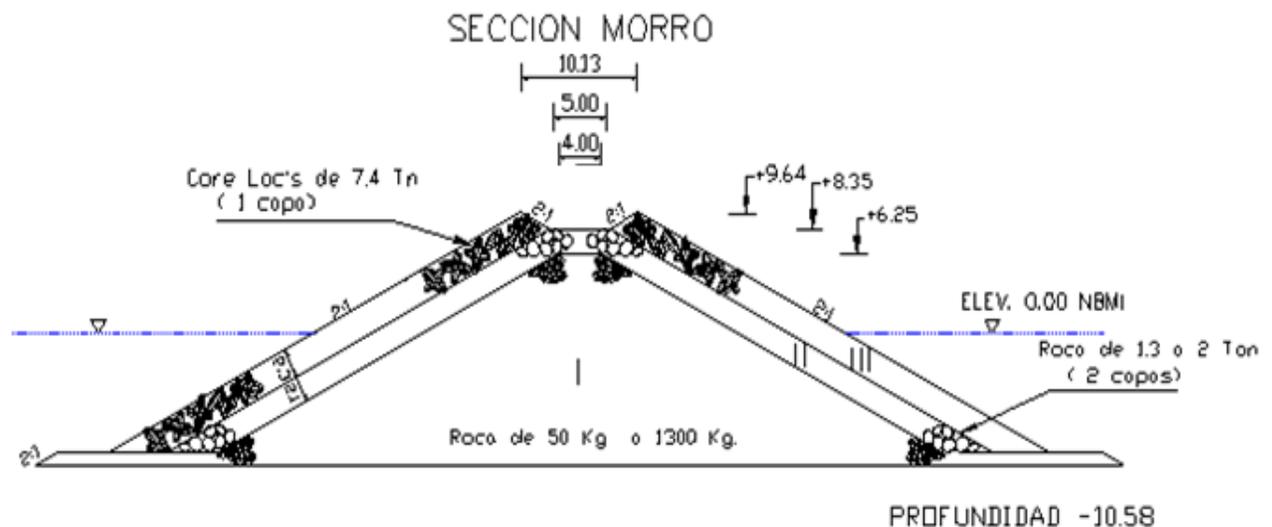
Figura 4.13 Impresión de pantalla de resultados del dimensionamiento geométrico del deflector para el morro del rompeolas de Ensenada, B.C

5. Estudio en modelo hidráulico

Mediante la aplicación de la metodología y rutina computacional definidas en los capítulos anteriores, se realizó el diseño geométrico del deflector, aplicándolo a datos del proyecto realizado por el IMT en el rompeolas del puerto de Ensenada, B. C.

5.1 Diseño de las secciones de playa

Derivado de que la metodología se aplicará, conforme al protocolo de investigación realizado a un rompeolas existente en el puerto de Ensenada, B. C., las secciones se retomaron del diseño del proyecto ejecutivo de la sección morro del proyecto No. VE-16/10 “Estudios en modelos hidráulicos para definir el proyecto constructivo de prolongación del rompeolas del puerto de Ensenada” realizado por el IMT, la cual se muestra en la figura 5.1.



Fuente: IMT, 2010

Figura 5.1 Sección transversal del morro del rompeolas del puerto de Ensenada, B. C. para los ensayos en modelo hidráulico.

5.2 Definición de la escala de líneas

5.2.1 Definición de la escala de líneas

De acuerdo con el diseño geométrico de la sección transversal definida en la figura 5.1 y considerando los elementos de la coraza que integran cada una de las capas de dicha sección, se seleccionó la escala de líneas a utilizar en el modelo hidráulico con objeto de garantizar la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo mediante la ley de Similitud que se utilizó es la de Froude.

Esta Ley de Similitud establece que los números de Froude en prototipo y modelo deberán ser iguales. El número de Froude F^2 se define como:

$$F^2 = \frac{V^2}{gL} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Dónde:

V: Es la velocidad,

g: La aceleración de la gravedad.

L: La longitud característica,

La condición que deberá cumplirse es:

$$F_m^2 = F_p^2 \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde los subíndices m y p significan modelo y prototipo, respectivamente.

Sustituyendo la ecuación 5.1 en 5.2 se obtiene:

$$\frac{V_m^2}{g_m \cdot L_m} = \frac{V_p^2}{g_p \cdot L_p} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Dado que la aceleración de la gravedad g es la misma tanto en modelo como en prototipo, entonces:

$$g_p = g_m \quad \text{Ec. 5.4}$$

Por lo que la ecuación 5.3 cambia a:

$$\frac{Vm^2}{Lm} = \frac{Vp^2}{Lp}$$

Ec. 5.5

Para el caso de la sección morro del rompeolas de Ensenada, B. C., la escala de líneas seleccionada fue de 1:46 tanto vertical como horizontal.

Cabe mencionar que la selección de la escala de líneas se realizó considerando las dimensiones y pesos de los elementos de coraza (coreloc's) disponibles en el IMT, de las condiciones de oleaje a estudiar en el modelo hidráulico, y de la capacidad de generación del oleaje de los equipos.

5.3 Adecuación del modelo hidráulico

Para llevar a cabo los ensayos de estabilidad, de medición de overtopping y de run-up de los diferentes deflectores diseñados para el presente estudio, se trazó la pendiente de la losa de fondo en el canal de olas de 35 m de longitud, 4.9 m de ancho y 1.20 m de profundidad ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Fluviomarítima del IMT.

5.3.1 Configuración de la losa de fondo

El procedimiento para realizar el trazo y la nivelación de la pendiente del fondo marino en el canal de olas fue el siguiente:

- a. Sobre las caras interiores de los muros y ventanas de observación del canal, se trazarán y se nivelarán la pendiente del fondo marino a representar.
- b. Realizado el trazo y la nivelación del fondo marino, se realizará el relleno a base de grava hasta los niveles indicados en el proyecto del modelo hidráulico.

Para el caso particular de éste estudio, la losa del perfil del fondo marino fue colocada a base de placas de acero de ± 3.00 cm de espesor.

- c. Se realiza una nivelación final, ya colocada la placa, solo para verificar los niveles.



Figura 5.2 Trazo y nivelación de la losa de fondo y sección transversal a ensayar

5.3.2 Selección del material

La selección del material que integran las diferentes capas de la sección morro del rompeolas de Ensenada, B. C., se realizó buscando satisfacer las necesidades de la escala, se seleccionó roca de 1.3 ton a 2.0 ton de prototipo (13.36 g a 20.55 g en modelo), para la capa secundaria y elementos artificiales de concreto de 7.4 ton de prototipo (76 g en modelo).



Figura 5.3 Selección y pesaje de los materiales para la construcción de la sección transversal

5.3.3 Fabricación de los diferentes deflectores a ensayar

Para la fabricación de los diferentes deflectores de oleaje que que fueron ensayados, inicialmente se construyó la cimbra de cada uno de ellos (ver figura 5.4), y posteriormente se colaron a base de concreto, sin refuerzo (ver figura 5.5), y finalmente se les aplicaron dos capas de pintura de diferente color a cada uno, con objeto de idetificar correctamente en el modelo la diferencia entre cada uno de ellos.



Figura 5.4 Proceso de hechura de las cimbras de los deflectores de oleaje a ensayar



Figura 5.5 Proceso de colado de los deflectores de oleaje a ensayar

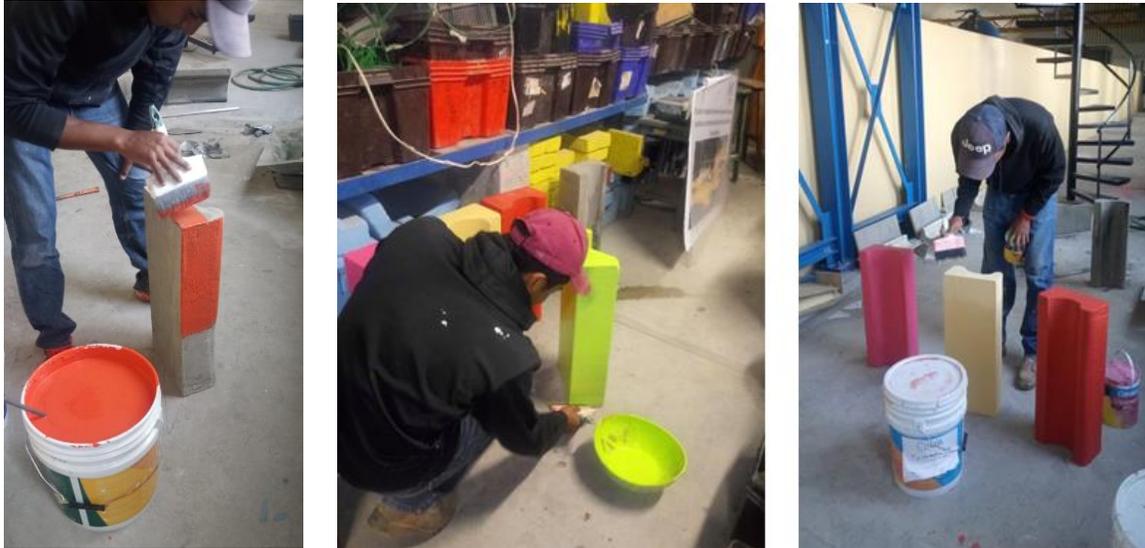


Figura 5.6 Aplicación de pintura a los deflectores de oleaje diseñados para las pruebas experimentales

5.3.4 Construcción de la sección transversal

La construcción de la sección transversal se llevo a cabo colocando y nivelando cada una de las diferentes capas de núcleo, secundaria y coraza, como se muestra de manera ilustrativa en la figura 5.7.



Figura 5.7 Construcción de capas de la sección transversal de morro a ensayar

Una vez que se termina de construir las capas se monta el deflector de oleaje en el desplante definido por el diseño y se indican las elevaciones y niveles de referencia para los ensayos, como se muestra en la figura 5.8.

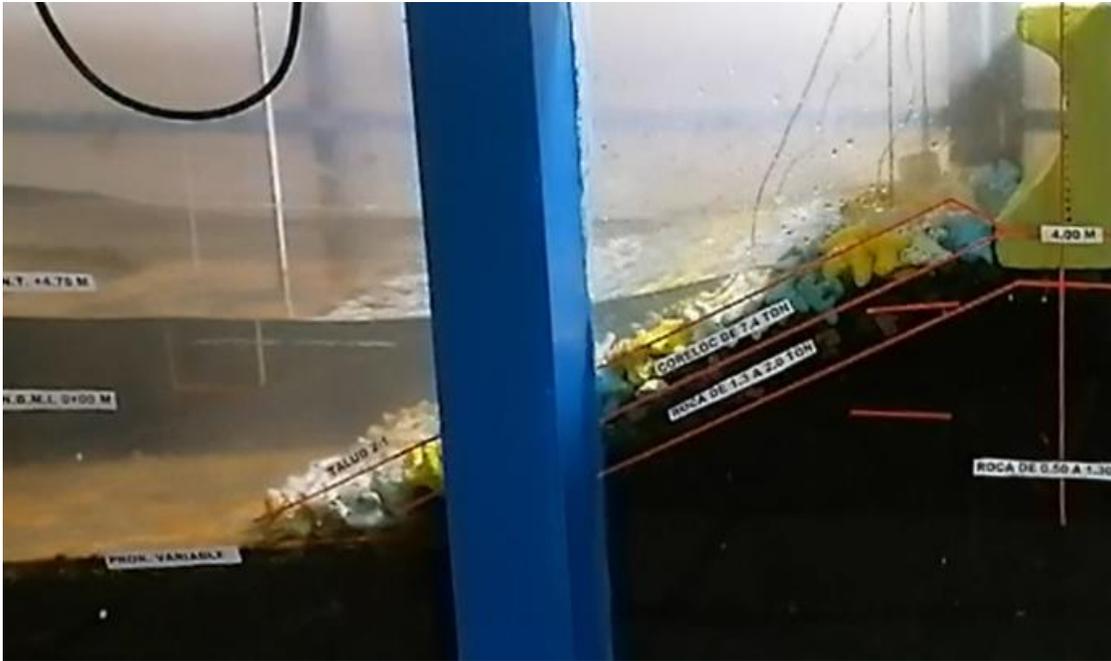


Figura 5.8 Sección transversal de morro estructuralmente preparada para los ensayos

5.3.5 Colocación de sensores de medición

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico en el canal de olas se utilizaron sensores de oleaje tipo capacitivo de ± 5 volts de resolución (A, B, C), colocados a una distancia de 1.5 veces la longitud de la ola frente a la estructura, y para la medición del ascenso del oleaje se utilizaron sensores de tipo resistivo (1,2,3), esto con objeto de medir la altura de ola incidente, quedando como se muestra en la figura 5.9.

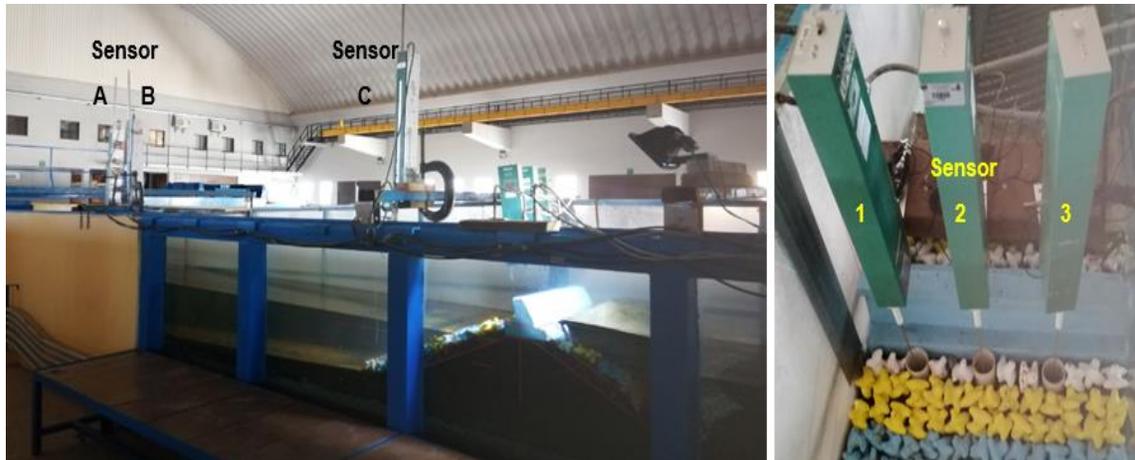


Figura 5.9 Sección transversal de morro estructuralmente preparada para los ensayos

5.4 Programa de ensayos

De acuerdo con los alcances establecidos para el presente estudio se realizó la programación de los ensayos en modelo hidráulico de la sección morro del rompeolas de Ensenada, B. C para cada uno de los deflectores diseñados, para periodos de retorno de 50 y 100 años en condiciones de oleaje de tormenta, con nivel de sobrelevación de 4.78 m, de acuerdo con los programas de ensayos definidos en las tablas 5.1 y 5.2, respectivamente.

Tabla 5.1 Programa de ensayos de la sección morro con periodo de retorno de 50 años

Sección	Periodo de oleaje en s (T)	Deflector	Altura de ola en m (H)	No. de ensayo
Morro	7.57	D1 (amarillo)	3.00	Ensayo_01
			4.00	Ensayo_02
			5.05	Ensayo_03
			6.00	Ensayo_04
			7.00	Ensayo_05
		D2 (Naranja)	3.00	Ensayo_06
			4.00	Ensayo_07
			5.05	Ensayo_08
			6.00	Ensayo_09
			7.00	Ensayo_10

		D13 (Verde)	3.00	Ensayo_11
			4.00	Ensayo_12
			5.05	Ensayo_13
			6.00	Ensayo_14
			7.00	Ensayo_15
		D4 (Beige)	3.00	Ensayo_16
			4.00	Ensayo_17
			5.05	Ensayo_18
			6.00	Ensayo_19
			7.00	Ensayo_20
		D5 (Rosa)	3.00	Ensayo_21
			4.00	Ensayo_22
			5.05	Ensayo_23
			6.00	Ensayo_24
			7.00	Ensayo_25

Tabla 5.2 Programa de ensayos de la sección morro con periodo de retorno de 100 años

Sección	Periodo de oleaje en s (T)	Deflector	Altura de ola en m (H)	No. de ensayo
Morro	8.57	D1 (amarillo)	3.00	Ensayo_26
			4.00	Ensayo_27
			5.05	Ensayo_28
			6.00	Ensayo_29
			7.00	Ensayo_30
		D2 (Naranja)	3.00	Ensayo_31
			4.00	Ensayo_32
			5.05	Ensayo_33
			6.00	Ensayo_34
			7.00	Ensayo_35
		D13 (Verde)	3.00	Ensayo_36
			4.00	Ensayo_37
			5.05	Ensayo_38
			6.00	Ensayo_39
			7.00	Ensayo_40
			3.00	Ensayo_41

		D4 (Beige)	4.00	Ensayo_42
			5.05	Ensayo_43
			6.00	Ensayo_44
			7.00	Ensayo_45
		D5 (Rosa)	3.00	Ensayo_46
			4.00	Ensayo_47
			5.05	Ensayo_48
			6.00	Ensayo_49
			7.00	Ensayo_50

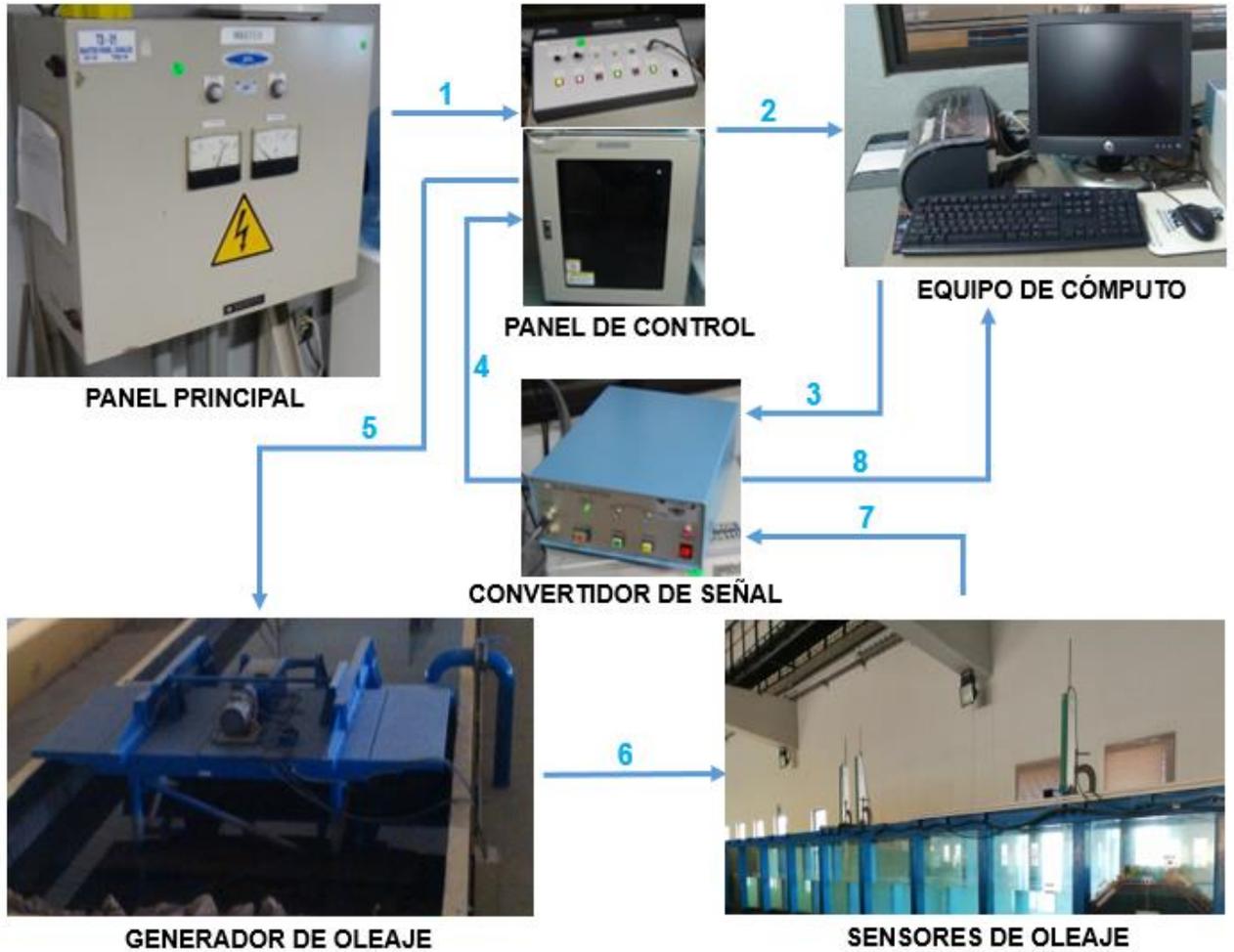
5.5 Ensayos en modelo hidráulico

Los ensayos en modelo hidráulico permiten analizar el comportamiento hidráulico de diferentes tipos de deflectores de oleaje de acuerdo al programa de ensayos establecido con anterioridad.

Los ensayos de medición de overtopping y run-up para cada uno de los deflectores diseñados se realizaron a la escala 1:46 con oleaje irregular y con sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta de +4.78 m respecto al Nivel de Bajamar Media Inferior (NBMI).

En los extremos del canal de olas se colocaron taludes absorbentes para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje, cabe mencionar que el generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción de oleaje que evita la reflexión del mismo.

Para la operación del modelo hidráulico se utilizó una computadora PC en la cual se genera un archivo de señales digitales de oleaje basadas en un espectro tipo Bretschneider-Mitsuyasu, estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje tipo pistón, como se indica en la figura 5.10.



Fuente: IMT, 2021

Figura 5.10 Flujograma para la generación, medición y análisis de oleaje en modelo hidráulico

Los ensayos se realizaron sobre la sección morro del rompeolas del puerto de Ensenada, con 6 deflectores de oleaje de diferente curvatura, en el orden y características que se muestran en la figura 5.11. ensayadas conforme al programa de ensayos presentado en la sección 5.4.

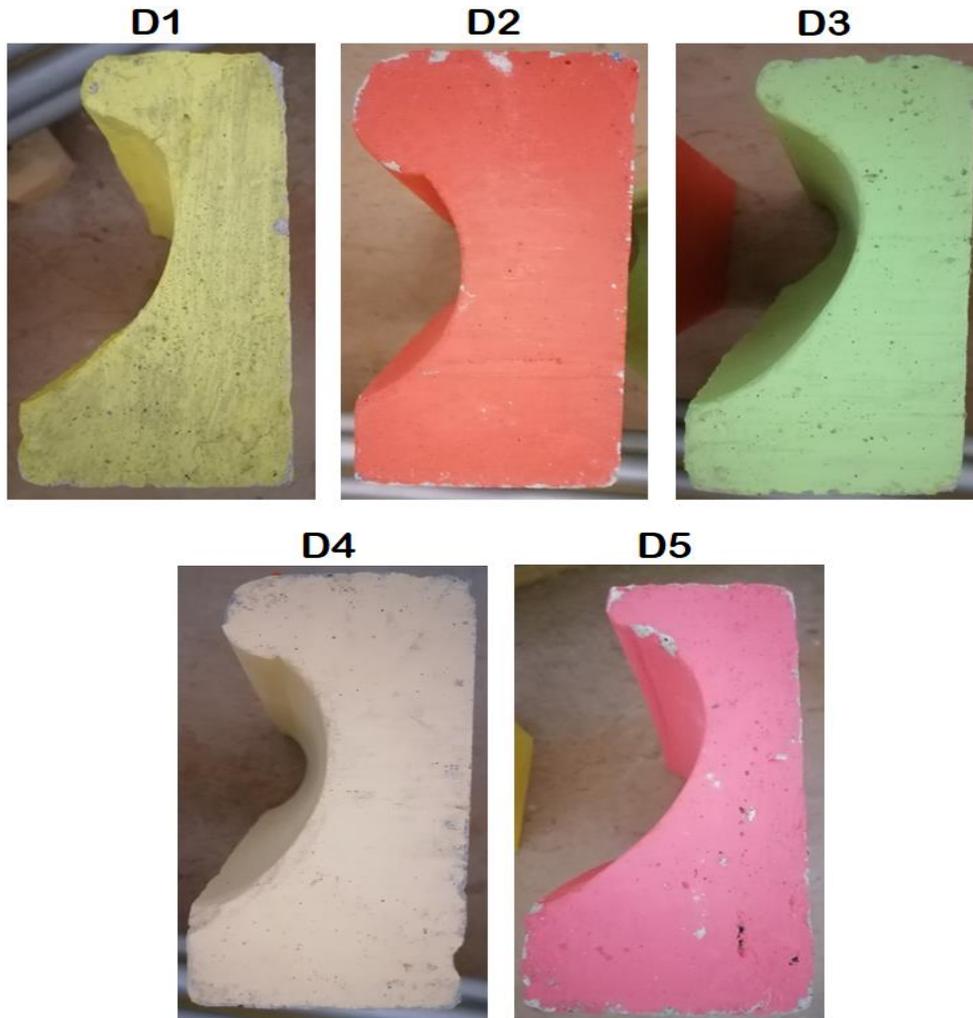
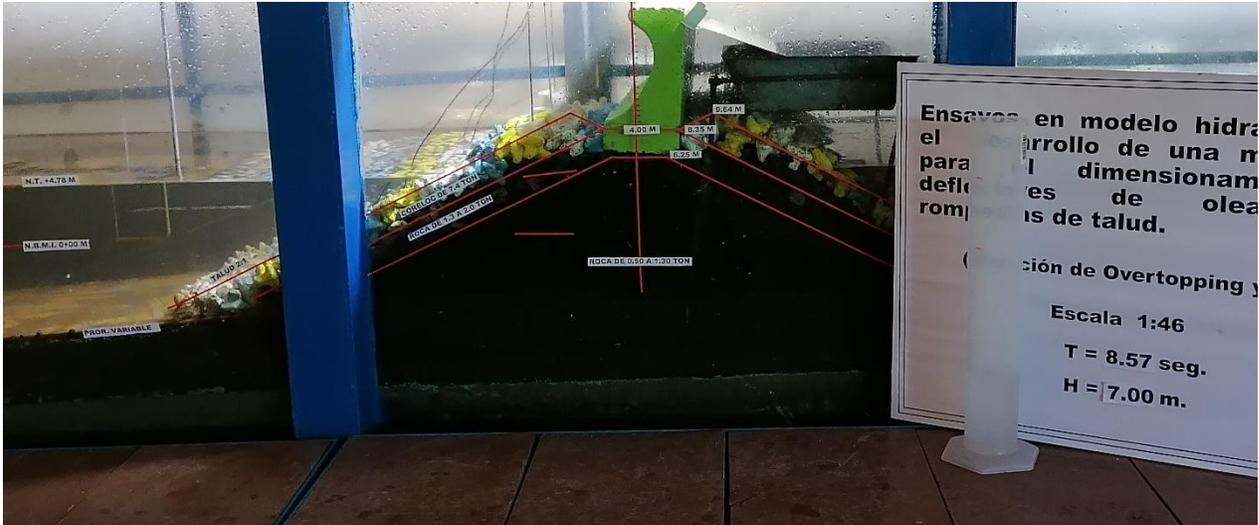


Figura 5.11 Deflectores colocados sobre la sección morro del rompeolas de Ensenada, B.C. para realizar los ensayos en modelo hidráulico

5.5.1 Ensayos de rebase del oleaje (overtopping)

Los ensayos en modelo hidráulico de overtopping de la sección transversal morro del rompeolas de Ensenada, B. C. se llevaron a cabo con la finalidad de conocer el rebase del oleaje que se presenta para cada uno de los diferentes diseños geométricos de deflectores de oleaje, como se muestra en la figura 5.12.



Fuente: IMT, 2021

Figura 5.12 Medición de overtopping en modelo hidráulico

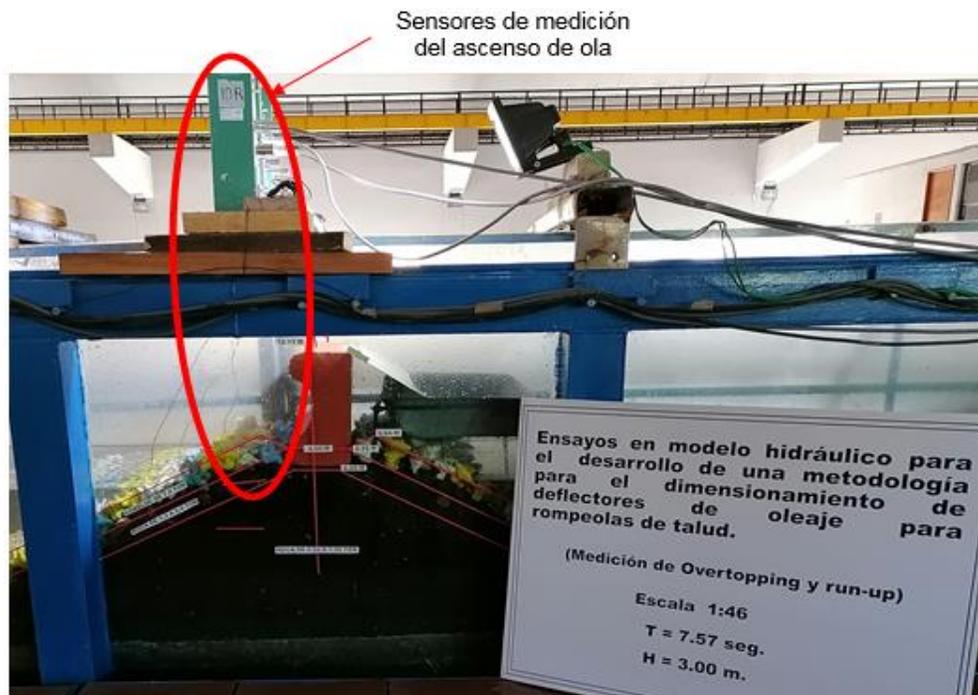
La metodología usada para la medición del overtopping en modelo hidráulico es la siguiente:

- Se genera un tren de 1000 olas para cada altura de ola asociada al periodo de oleaje.
- Al paso del tren de olas, se realizó la captación del agua que pasa a través de la estructura y que es retenida en los contenedores de aluminio la cual al final del ensayo fue medida en probetas.
- Para cuantificar en modelo la cantidad de overtopping.

5.5.2 Ensayos del ascenso del oleaje (run-up)

Los ensayos en modelo hidráulico del ascenso del oleaje (run-up) de la sección transversal morro del rompeolas del puerto de Ensenada, B. C. se realizó con objeto de analizar el ascenso máximo del oleaje con las diferentes geometrías de cada deflector para las diferentes alturas de ola y periodos de oleaje asociados a periodos de retorno de 50 y 100 años.

La metodología de la medición del ascenso máximo vertical del agua sobre el talud de la sección transversal analizada para cada uno de los deflectores de oleaje diseñados consistió en que a través de 3 sensores resistivos, se realizó la medición de oleaje sobre la estructura tal como se muestra en la figura 5.13 y se obtuvo el promedio de las alturas registradas por los sensores.

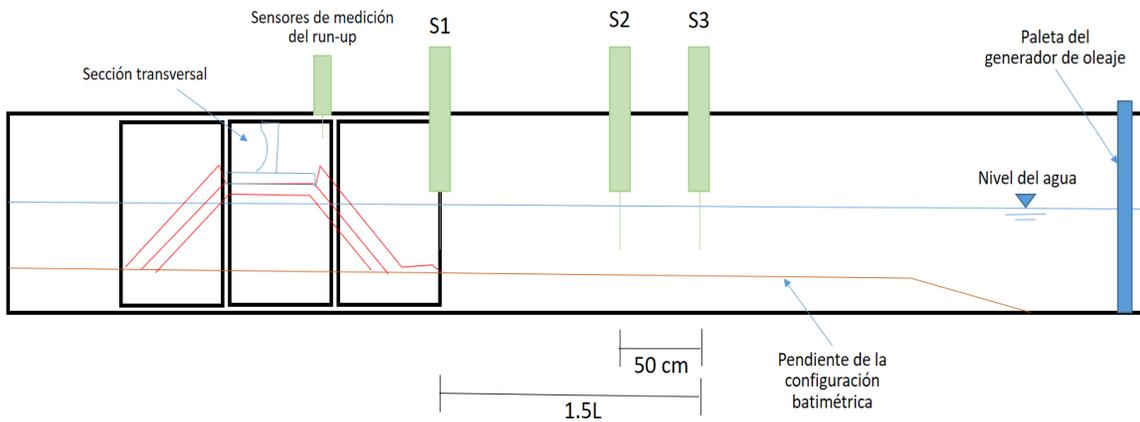


Fuente: IMT, 2021

Figura 5.13 Medición del ascenso del oleaje (run-up) en modelo hidráulico

5.5.3 Ensayos para obtener los coeficientes de reflexión de oleaje

Para determinar los coeficientes de reflexión del oleaje para cada una de las disposiciones geométricas de los deflectores de oleaje en la sección morro del rompeolas del puerto de ensenada, se realizó con la colocación de 3 sensores de medición de oleaje capacitivos (S1, S2 y S3), instalados tal como se muestra en la figura 5.14, con objeto de llevar a cabo el análisis de las alturas de ola que inciden y se reflejan sobre la estructura y obtener los coeficientes de reflexión que se presenta para cada uno de los deflectores de oleaje.



Fuente: IMT, 2021

Figura 5.14 Ubicación de los sensores de medición del oleaje para la determinación de coeficientes de reflexión de oleaje

El primer sensor (S1) se colocó al pie de la estructura con la finalidad de obtener la altura de ola que incide directamente sobre la estructura.

Para la colocación del sensor 2 (S2) y del sensor 3 (S3) se debe realizar primero el cálculo de la longitud de ola utilizando los criterios del Shore Protection Manual tal como se muestra a continuación:

Ecuación de la longitud de la ola en aguas profundas:

$$L_o = 1.56 * T^2 \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

T = Período

Tabla 5.3 Criterios para el cálculo de la longitud de la ola, aguas profundas, intermedias o someras

Clasificación	d/L	2πd/L	tanh (2πd/L)
Aguas profundas	> 1/2	> π	≈ 1
Aguas intermedias	1/25 a 1/2	1/4 a π	tanh (2πd/L)
Aguas someras o profundas	< 1/25	< 1/4	≈ 2πd/L

Fuente: Shore Protection Manual, 1987

De acuerdo a los criterios establecidos en la tabla 5.3:

Si $\frac{d}{L_o} < \frac{l}{25}$ se utiliza la ecuación 5.2 para el cálculo de la longitud de la ola en aguas someras o de profundidad reducida:

$$L = T\sqrt{g * d} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

d = Profundidad

Si $\frac{l}{25} < \frac{d}{L_o} < \frac{l}{2}$ se utiliza la ecuación 5.3 para el cálculo de la longitud de la ola en aguas intermedias:

$$L = \frac{g * T^2}{2\pi} \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \text{Ec. 5.3}$$

De acuerdo a los criterios descritos con anterioridad, el sensor 2 (S2) fue colocado en el modelo hidráulico a 2.77 m de la estructura para los ensayos con periodo de retorno de 50 años (7.57 seg.) y para los ensayos con periodo de retorno de 100 años (8.57 seg.) el sensor 2 (S2) fue colocado a 3.50 m.

Para definir el coeficiente de reflexión se durante la realización de los ensayos, se realizó el análisis del oleaje incidente y reflejado sobre la estructura para obtener los coeficientes de reflexión de la misma, en términos de la ley de la conservación de la energía, como se indica en la ecuación 5.4:

$$K_R = H_r / H_i \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde:

H_i = Altura de ola incidente

H_r = Altura de ola reflejada

De acuerdo con lo anterior en las tablas 5.8 y 5.9, se desglosan los resultados de los coeficientes de reflexión del oleaje por cada deflector ensayado en modelo hidráulico.

5.5.4 Análisis e interpretación de los resultados del modelo hidráulico

Con los resultados de los ensayos en modelo hidráulico de medición de overtopping y run-up, se describe a continuación los resultados obtenidos.

a) Análisis e interpretación de los resultados de los ensayos de overtopping.

En las tablas 5.4 y 5.5a, 5.5b respectivamente, se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos en modelo hidráulico para un periodo de retorno de 50 años y 100 años, respectivamente.

- Para los ensayos de overtopping con periodo de retorno de 50 años se observó que ninguno de los deflectores presento rebase para las alturas de ola de 3.0 m y 4.0 m. tal como se muestra en la figura 5.15.

Tabla 5.4 Resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para un periodo de 7.57 s, asociado a un periodo de retorno de 50 años.

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Gasto en l/s [Q]	Gasto unitario en m ³ /seg/l (q)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	4527.10	46.04
				6.00	6791.13	69.07
				7.00	17656.75	179.58
			D2 (Naranja)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	4074.48	41.44
				6.00	6338.52	64.47
				7.00	14390.15	146.36
			D3 (Verde)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	3114.75	31.68
				6.00	10901.63	110.88
				7.00	26280.72	267.30
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D4 (Beige)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	6229.50	63.36

D5 (Rosa)	6.00	13237.70	134.64
	7.00	17131.14	174.24
	3.00	0.00	0.00
	4.00	0.00	0.00
	5.05	5840.16	59.40
	6.00	10901.63	110.88
	7.00	25112.69	255.42

- De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que el deflector de oleaje No. 3, deflector verde, presentó mayor overtopping que los demás, mientras que el deflector de oleaje No. 2, deflector naranja, fue el que presentó menor overtopping.

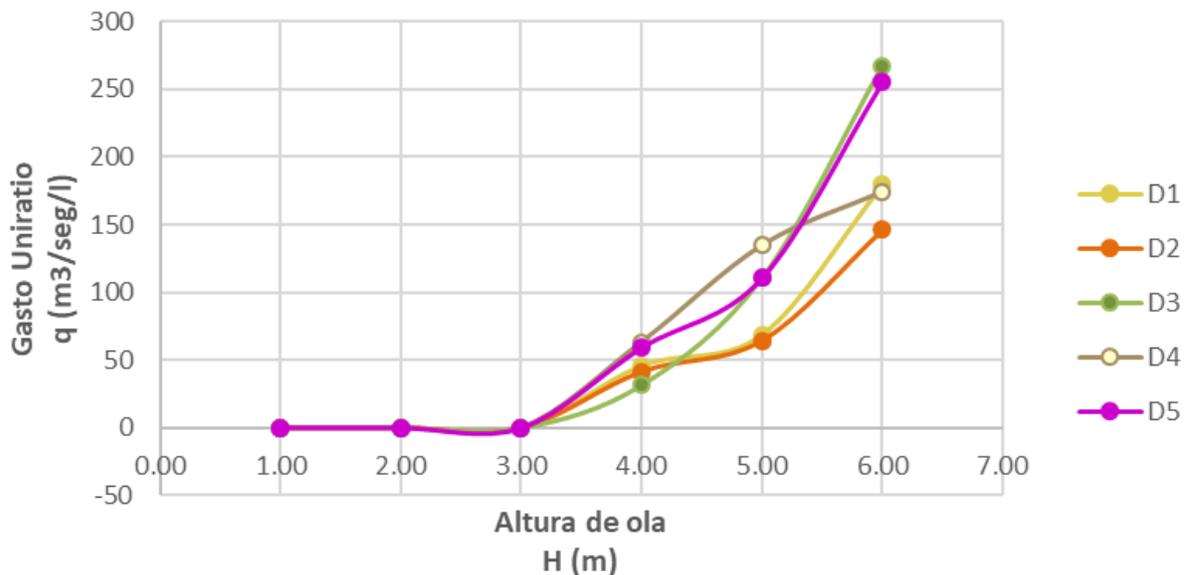


Figura 5.15 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un periodo de retorno de 50 años.

- Para los ensayos de overtopping con periodo de retorno de 100 años se observó que ninguno de los deflectores permitió el paso del agua para las alturas de ola de 3.0 m y 4.0 m. tal como se muestra en la tabla 5.5 y figura 5.16, respectivamente.

Tabla 5.5a Resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para periodo de 8.57 s, asociado a un periodo de retorno de 100 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Gasto en l/s [Q]	Gasto unitario en m ³ /s/l (q)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	1168.03	9.87
				6.00	9733.60	82.24
				7.00	36987.68	312.53
			D2 (Naranja)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	2336.06	19.74
				6.00	7786.88	65.80
				7.00	19467.20	164.49

Tabla 5.5b Continuación de resultados de overtopping obtenidos en modelo hidráulico para periodo de 8.57 s, asociado a un periodo de retorno de 100 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Gasto en l/s [Q]	Gasto unitario en m ³ /s/l (q)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D3 (Verde)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	2725.41	23.03
				6.00	13627.04	115.14
				7.00	54508.16	460.57
			D4 (Beige)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	2336.06	19.74
				6.00	7786.88	65.80
				7.00	9733.60	82.24
			D5 (Rosa)	3.00	0.00	0.00
				4.00	0.00	0.00
				5.05	1168.03	9.87
				6.00	10706.96	90.47
				7.00	33094.24	279.63

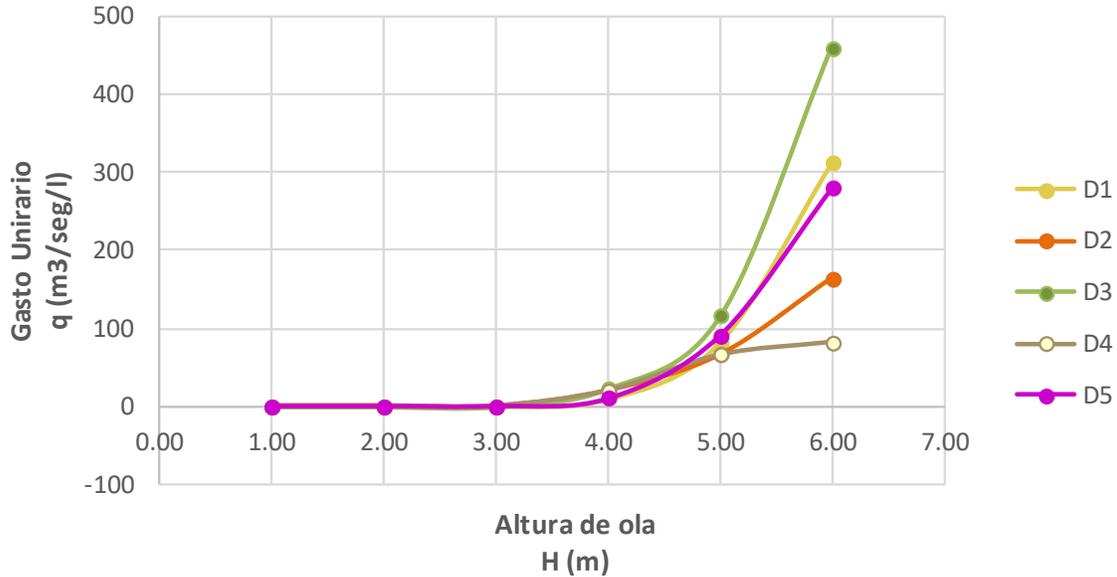


Figura 5.16 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un periodo de retorno de 100 años

- De los resultados obtenidos se observa que el deflector No. 3, presentó mayor overtopping.

b) Análisis e interpretación de los resultados de los ensayos de run-up.

En las tablas 5.6 y 5.7a y 5.7b, respectivamente, se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos en modelo hidráulico para un periodo de retorno de 50 años y 100 años, respectivamente.

Tabla 5.6 Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un periodo de 7.57 segundos para un periodo de retorno de 50 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Run-up en metros (Ru)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	5.57
				4.00	6.60
				5.05	8.04
				6.00	8.69
			D2 (Naranja)	7.00	9.46
				3.00	6.00
				4.00	7.15
				5.05	8.04
			6.00	8.54	

	D13 (Verde)	7.00	9.27
		3.00	5.54
		4.00	6.63
		5.05	7.97
		6.00	8.61
		7.00	9.19
	D4 (Beige)	3.00	5.45
		4.00	6.43
		5.05	7.84
		6.00	8.64
		7.00	9.22
	D5 (Rosa)	3.00	6.05
		4.00	6.90
		5.05	8.25
		6.00	8.68
		7.00	9.26

- De los ensayos de run-up con periodo de retorno de 50 años se observó que el deflector de oleaje No. 1, deflector amarillo, presentó el mayor ascenso vertical del agua sobre el talud de la estructura siendo éste de 9.46 m con respecto al NBMI (ver figura 5.17).

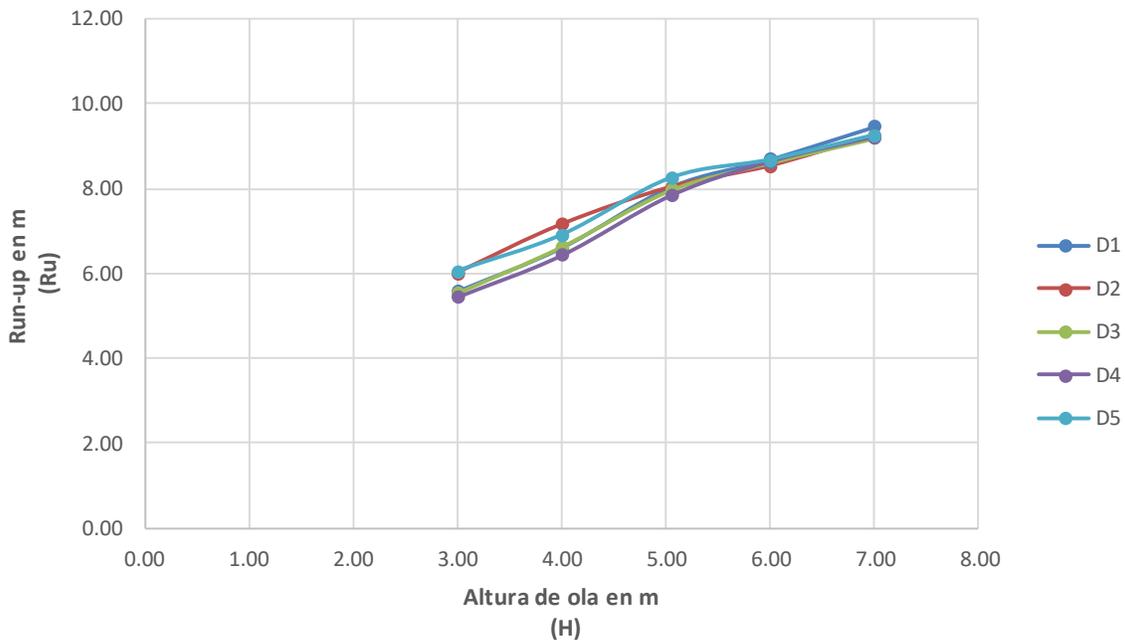


Figura 5.17 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un periodo de retorno de 50 años

- Para los ensayos de run-up con periodo de retorno de 100 años se observó que el deflector de oleaje No. 1, deflector amarillo, presentó el mayor ascenso vertical del agua sobre el talud de la estructura siendo de 9.80 m con respecto al el NBMI, ver tabla 5.7a y 5.7b, así como en la figura 5.18.

Tabla 5.7a Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un periodo de 8.57 s, para un periodo de retorno de 100 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Run-up en metros (Ru)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	5.94
				4.00	7.03
				5.05	8.03
				6.00	8.61
				7.00	9.80

Tabla 5.7b Resultados obtenidos de los ensayos de run-up con un periodo de 8.57 s, para un periodo de retorno de 100 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Run-up en metros (Ru)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D2 (Naranja)	3.00	5.83
				4.00	6.78
				5.05	8.10
				6.00	8.96
				7.00	9.15
			D13 (Verde)	3.00	6.05
				4.00	7.00
				5.05	8.12
				6.00	8.94
				7.00	9.42
			D4 (Beige)	3.00	6.21
				4.00	7.05
				5.05	7.91
				6.00	9.00
				7.00	9.39
			D5 (Rosa)	3.00	6.23
				4.00	6.93
				5.05	7.89
				6.00	8.88
				7.00	9.36

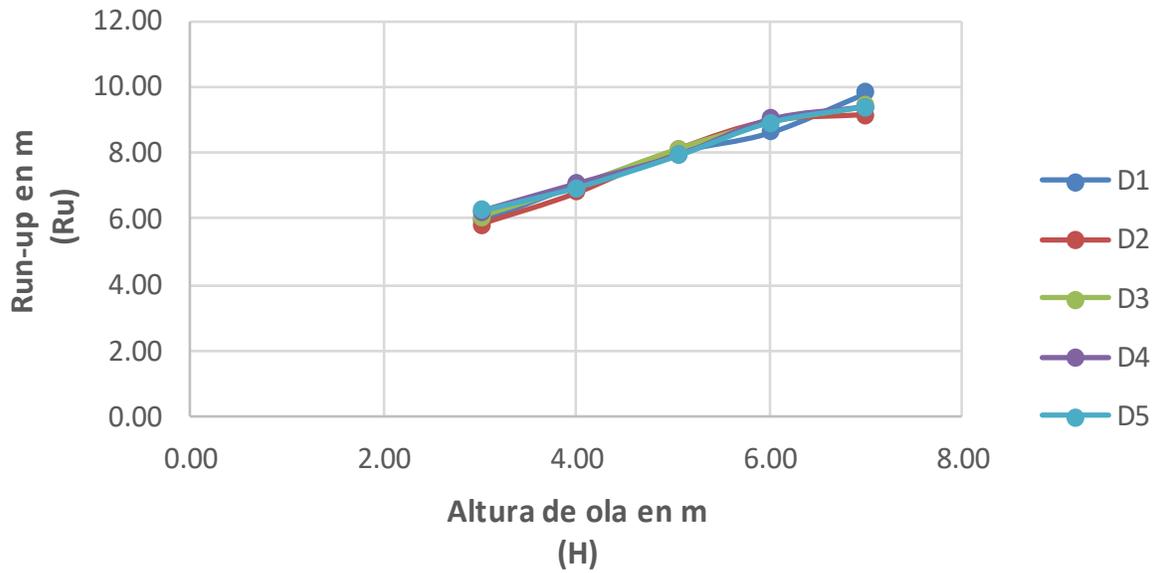


Figura 5.18 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para un periodo de retorno de 100 años

c) Análisis e interpretación de los resultados de los coeficientes de reflexión de oleaje

Del análisis de la reflexión del oleaje se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 5.8 y 5.9.

Tabla 5.8 Coeficientes de reflexión obtenidos de los ensayos con periodo de oleaje de 7.57 s, para un periodo de retorno de 50 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Coefficiente de reflexión (Kr)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	0.83
				4.00	0.75
				5.05	0.82
				6.00	0.86
				7.00	0.75
			D2 (Naranja)	3.00	0.80
				4.00	0.83
				5.05	0.77
				6.00	0.79
				7.00	0.87

			D3 (Verde)	4.00	0.80
				5.05	0.70
				6.00	0.83
				7.00	0.85
			D4 (Beige)	3.00	0.93
				4.00	0.82
				5.05	0.80
				6.00	0.82
				7.00	0.86
			D5 (Rosa)	3.00	0.81
				4.00	0.79
				5.05	0.80
				6.00	0.82
				7.00	0.89

Tabla 5.9 Coeficientes de reflexión obtenidos de los ensayos con periodo de oleaje de 8.57 s, para un periodo de retorno de 100 años

Sección	Nivel de referencia	Escala	Deflector	Altura de ola en m (H)	Coeficiente de reflexión (Kr)
Morro	N. T. (4.78 m)	46	D1 (amarillo)	3.00	0.79
				4.00	0.81
				5.05	0.84
				6.00	0.77
				7.00	0.92
			D2 (Naranja)	3.00	0.97
				4.00	0.92
				5.05	0.85
				6.00	0.93
				7.00	0.85
			D3 (Verde)	3.00	0.82
				4.00	0.77
				5.05	0.84
				6.00	0.86
				7.00	0.79
			D4 (Beige)	3.00	0.83
				4.00	0.76

D5 (Rosa)	5.05	0.85
	6.00	0.92
	7.00	0.86
	3.00	0.81
	4.00	0.77
	5.05	0.78
	6.00	0.80
	7.00	0.80

Las figuras 5.19 y 5.20, muestran la relación de los coeficientes de reflexión de oleaje que se generan para las diferentes geometrías de los deflectores de oleaje ensayados para los periodos de retorno de 50 y 100 años.

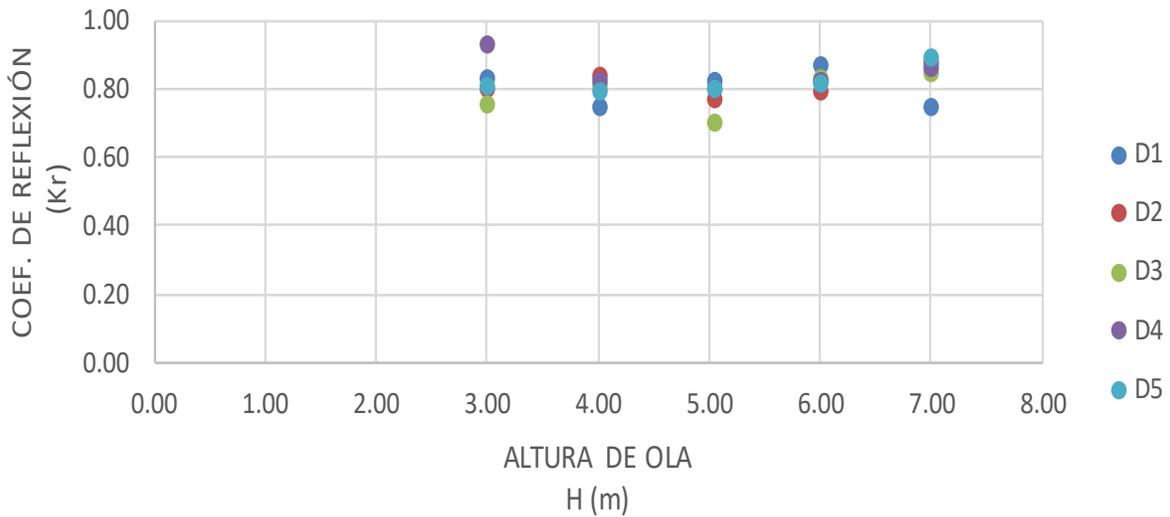


Figura 5.19 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los periodos de retorno de 50 y 100 años

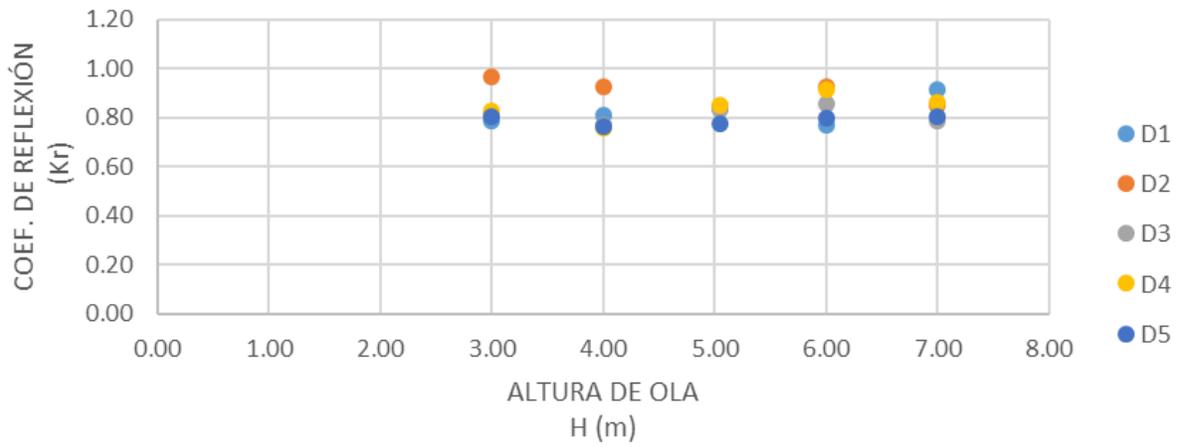


Figura 5.20 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los periodos de retorno de 50 y 100 años

6. Análisis e interpretación de resultados

En la presente publicación se realizó un análisis de las metodologías que con referencia a los deflectores de oleaje se han revisado con objeto de definir el comportamiento de dichas estructuras, sin embargo, las metodologías descritas en el estado del arte se fundamentan en la intervención de las fuerzas externas que actúan sobre el deflector y dado que el objetivo del presente estudio es definir una metodología, que nos permita fácilmente diseñar geoméricamente un deflector de oleaje.

Por ello se desarrolló una metodología que permite definir la geometría del deflector, largo (F_c) y ancho del monolito (F_{esp}), así como la curvatura que de acuerdo con la altura del deflector permita retornar la ola de la manera más horizontal posible, para contrarrestar su energía y proteger, las superficies de rodamiento y/o las zonas que se encuentren posteriores al monolito.

En cuanto a la revisión de la funcionalidad de la rutina computacional generada respecto a los resultados de la modelación hidráulica de los diferentes deflectores de oleaje, debemos considerar que el deflector No. 2, representa las características del deflector diseñado geoméricamente con la rutina computacional (ver figura 6.1), y el deflector No. 4 representa las características del proyecto representa las características del diseño del rompeolas existente (ver figura 6.2).



Figura 6.1 Deflector diseñado geoméricamente medinte la rutina computacional generada



Figura 6.2 Deflector diseñado con las características del proyecto de la prolongación del rompeolas de Ensenada, B. C

Por lo que, realizando una comparación de los resultados, podemos destacar que la geometría que emite como resultado es idónea para el diseño del proyecto, dado que de los registros de los resultados de los ensayos y del comportamiento de cada uno de los deflectores probados en los modelos hidráulicos se obtuvo lo siguiente

De los resultados de los ensayos de overtopping con periodo de retorno de 50 y 100 años se observó que ninguno de los deflectores 2 y 4 fueron los que menor rebase de oleaje presentaron, como se muestra en la figura 6.3 y tabla 6.1, con gastos entre 164.49 y 174.24 m³/s/l.

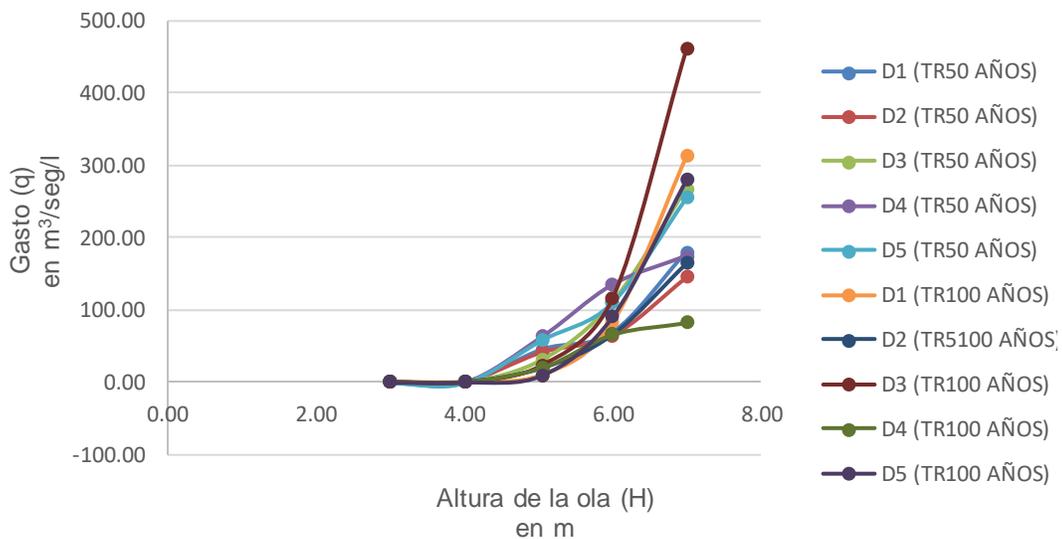


Figura 6.3 Resultados obtenidos de overtopping de las diferentes geometrías de deflectores ensayados para los periodos de retorno de 50 y 100 años

Tabla 6.1 Resultados de gasto que pasa por rebase de oleaje, obtenidos en modelo hidráulico para periodos de retorno de 50 y 100 años

Deflector	Período en s (T)	Altura de ola en m (H)	Gasto unitario en m ³ /s/l (Q)
D2 (Naranja)	7.57	5.05	41.44
	7.57	7.00	146.36
	8.57	5.05	19.74
	8.57	7.00	164.49
D4 (Beige)	7.57	5.05	19.74
	7.57	7.00	82.24
	8.57	5.05	63.36
	8.57	7.00	174.24

De los resultados de los ensayos de run-up, obtenidos de los ensayos en modelo hidráulico para un periodo de retorno de 50 años y 100 años, se obtuvo físicamente que ascenso del oleaje máximo que se presentó fue de 9.80 m, como se muestra en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Resultados obtenidos de los ensayos de ascenso del oleaje (run-up), para periodos de retorno de 50 y 100 años

Deflector	Periodo del oleaje en s (T)	Run-up en m (Ru)	Período del oleaje en s (T)	Run-up en m (Ru)
	Tr = 50 años		Tr = 100 años	
D1	7.57	9.46	8.57	9.80
D2	7.57	9.27	8.57	9.15
D3	7.57	9.19	8.57	9.42
D4	7.57	9.22	8.57	9.39
D5	7.57	9.26	8.57	9.36

De los resultados de los coeficientes de reflexión de oleaje, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 6.4, donde los coeficientes de reflexión del deflector No. 2 y No. 4, es representativo de los resultados del funcionamiento del deflector.

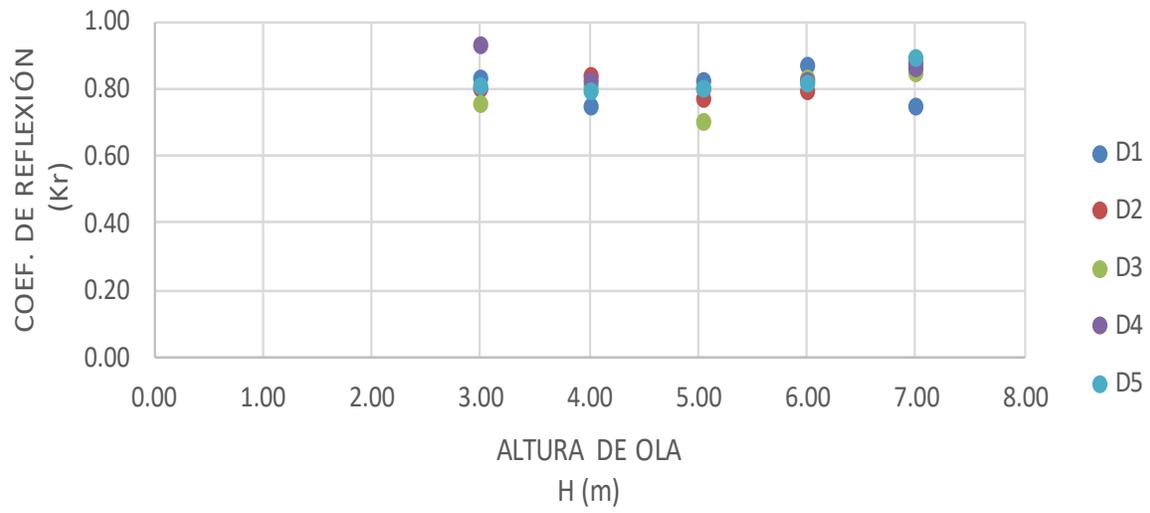


Figura 6.4 Relación de coeficientes de reflexión de los ensayos con los periodos de retorno de 50 y 100 años, para cada uno de los deflectores ensayados

Conclusiones

Con el análisis del comportamiento del deflector diseñado geoméricamente mediante la metodología y rutina computacional generada a través de la investigación para el presente estudio, podemos concluir, que la aproximación es muy cercana, ya que con los resultados de overtopping, el gasto que pasa a través del deflector es menor, y así mismo de las mediciones del ascenso del oleaje, run up, que asciende a 9.80 m, es un valor cercano al del proyecto realizado de 10.63, sin embargo dado el rebase que presenta, nos muestra que el resultado que obtuvimos de la rutina computacional, se mantiene en el margen de seguridad, de 12.00 m. Es decir que si construimos el deflector de oleaje con una elevación de la corona del deflector (R_c) de 12 m, no se estaría presentado rebase del oleaje posterior a la altura de la ola de diseño de 5.05 m.

En cuento al objetivo de realizar este estudio, se concluye que a partir de él, en este momento contamos con una herramienta que nos permite disminuir tiempo y costo en la realización de ensayos en modelo hidráulico, ya que dada la muy cercana aproximación a los deflectores con mejor funcionalidad y eficiencia, comprobada en modelo hidráulico, nos permitirá en lugar de realizar 5 modelos diferentes de deflectores y emplear tiempo en determinar cuál es o no funcional, éste tiempo se puede emplear en hacer más eficiente u optimizar las características del comportamiento estructural del deflector diseñado.

Dado que la estructura que se propone iría sobre la losa de coronamiento del rompeolas, se recomienda realizar un diseño estructural en conjunto con la corona del rompeolas y el monolito, para que las dimensiones geométricas particularmente del ancho del deflector y su empotramiento al rompeolas funcione satisfactoriamente y con seguridad.

Derivado de la realización de la presente publicación, se generan líneas de investigación para la optimización de la rutina computacional, ya que ésta se puede programar, para que genere el diseño de la sección con el montaje del deflector de oleaje, así mismo, en la parte del desplante del deflector, se puede optimizar realizando un estudio donde se analicen las fuerzas externas que actúan en el empotre del deflector de oleaje, y así proveer alguna falla de la estructura por socavación o volteo del monolito.

Bibliografía

Berenguer, J. M., y Baonza, A. (2006). *Diseño de espaldones de los diques rompeolas*. Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos.

Bowen A. J., Inman D. L., y Simmons V. P. (1968). *Wave set-down and set-up*. Journal of geophysical research Vol. 73, No. 8 abril 15 de 1968, p.p. 2569-2577.

Bradbury A. W., y Allsop N. W. (1988). *Hydraulic effects of breakwater crown walls*. Design of Breakwaters'. Proceeding of conference Breakwaters' 88 Thomas Telford

Burcharth H., Hawkins, S. J., Zanuttigh, B., y Lamberti, A. (2007). *Environmental design guidelines for low crested coastal structure*. DELOS' Elevier.

Bruun, P. (1953). *Breakwaters for coastal protection*. Proceedings of XVIII international navigation congress, Sección 2, Resumen 1, Roma Italia 1953, p.p. 25-35.

Camus, B. P., y Flores, G. J. (2004). *Wave force on crown walls*. Evaluation of existing empirical formulations'. Coastal Engineering.

Construction Industry Research and Information Association (1991). *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*. CIRIA Special Publication 83/ cur report 154.

Coperio, E., y García, M. A. (2008). *Dique de escollera*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid.

De WAAL, J. P., Tonjes, P., y Van der Meer, J. (1996). *Overtopping of sea defences*. Proceeding of the 25th international Conference on Coastal Engineering. ASCE.

Dirección General de Puertos y Costas (1988). *Diques de Abrigo en España, Fachadas Canarias, Suratlántica y Sur mediterránea*. Tomo 2 MOPU. 1988.

Flores, J. (2008). *Deflectores de oleaje en rompeolas a talud*. México.

Freeman J. C., y Le Méhauté B. (1964). *Wave breakers on a beach and surges on a dry bed*. Journal of of the hydraulics division, ASCE, Vol. 90, March 1964, pp. 187-216.

Goda, Y. (1985). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University of Tokio Press, Japan, World Scientific Press, Advanced Series On Ocean Engineering, 443pp.

Günbak, A. R., y Göcke, T. (1984). *Wave screen stability of rubble mound breakwaters*. International Symposium of Maritime Constructions in the Mediterranean Sea. Athens. Greece.

HERBICH, S., y John, B. (1990). *Wave phenomena and coastal structures*. Handbook of coastal and ocean engineering, McGraw Hill, Vol.1 1990.

Ho, D. V., y Mayer, R. E. (1962). *Clime of a bore on a beach*. Journal of fluid mechanics, Vol. 14, 1962, p.p. 305-318.

Hosoi, M., y Mitsui, H. (1964). *Wave run up on sea dikes located in the surf zone or on the shore*. Coastal engineering in Japan, Vol. 6 Japón 1964, p.p. 1-6, y Vol. 7 p.p. 95-99.

Hudson, R. Y. (1959). *Laboratory investigation of rubble mound breakwaters*. journal of the waterways and Harbor division (ASCE), Vol. 85 No. WW23, septiembre de 1959, p.p. 123-152.

Iribarren, R., y Nogales, C. (1954). *Obras marítimas: oleaje y diques*. Editorial Dossat Madrid.

Jensen, A. (1983). *Proceedings of Coastal Structures*. Breakwater Superstructures pag. 273-285. ASCE. New York.

Keller H. B., Levine D. A. y Whitham B. G. (1960). *Motion of a bore on a sloping beach*. Journal of fluid mechanics, Vol 7 1960, p.p. 302-316.

Losada, M. A., y Desiré, J. M. (1985). *Random response of mound breakwaters under wave attack*. Proceedings of the Iceland Coastal and River Symposium.

Martín, F. L., Vidal, C., Losada, M. A., y Medina R. (1995). *Un método para el cálculo de las acciones del oleaje sobre los espaldones de los diques rompeolas*. Ingeniería del Agua, Vol. 2. No.3.

Martín, F. L., Vidal, C., Losada, M. A. y Díaz, J. L. (1997). *Campaña de medidas en el dique Príncipe de Austria del Puerto de Gijón*. 4to Jornada Española de Ingeniería de Puertos y Costas, Cádiz, Vol. 1, pag. 351-363.

Martín, F. L., Losada, M. A., y Medina, R. (1999). *Wave loads on rubble mound breakwater crown walls*. Coastal Engineering, Vol. 37. Pag. 149-174.

Mayer, R. E., y Shen M. C. (1963). *Long surf*. Journal of marine research, Vol. 21 No. 3 1963, p.p. 219-223.

Negro, V., Varela, O., López J. S., y García, J. (2008). *Diseño de diques rompeolas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Pedersen, J., y Burcharth, H. F. (1992). *Wave Forces on Crown Walls*. International Conference on Coastal Engineering. Venice.

Savage, R. P. (1959). *Laboratory data on wave run-up on roughened and permeable slopes*. BEB technical memorandum no. 109, U. S. Army Corps of Engineers Beach Erosion Board, March 1959, pp. 1-28.

Saville, T. (1956). *Wave run up on shore protections*, Journal of the Waterways and Harbor division (ASCE), Vol. 82 No. WW22, Abril de 1956, p.p. 9251- 9254.

INGRAM, D. (2000). *Violent Overtopping of Waves at Seawalls (VOWS)*. The Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis (CMMFA). the United Kingdom.

Whitham J. B. (1958). *On the propagation of shock waves through regions of non-uniform area or flow*. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 4, 1958, pp. 337- 360.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>