

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

Juan Esteban Flores Álvarez Cindy Casas Valencia Dora Luz Ávila Arzani

> Publicación Técnica No. 700 Sanfandila, Qro. 2022

> > ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. en C. Juan Esteban Flores Álvarez, la Ing. Cindy Casas Valencia y por la M. en I. Dora Luz Ávila Arzani.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-03/22 Investigación experimental del porcentaje de vacíos permisible de elementos constituyentes de la capa coraza para garantizar el desempeño conveniente de los rompeolas.

Contenido

Índice de figuras	v
Índice de tablas	xi
Índice de gráficas	xiii
Índice de fotografías	xxix
Sinopsis	xlix
Abstract	li
Resumen Ejecutivo	liii
Introducción	1
1 Investigación bibliográfica del estado del arte	5
2 Marco analítico	51
3 Desarrollo experimental	61
4 Análisis de resultados experimentales	307
5.Conclusiones y recomendaciones	323

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

Índice de figuras

Página

INTRODUCCIÓN

Figura 1.11 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C
Figura 1.12 Sección morro para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B. C
Figura 1.13 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C
Figura 1.14 Sección morro para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B. C
Figura 1.15 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C25
Figura 1.16 Sección morro para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B. C
Figura 1.17 Imágenes comparativas del Puerto de Ensenada B. C. antes y después de la construcción de la prolongación del rompeolas
Figura 1.18 Prolongación del rompeolas del puerto de Ensenada B.C
Figura 1.19 Puerto de Mazatlán Sin., tomada en el año 2010 antes de la reconstrucción de los rompeolas del Crestón y de Chivos
Figura 1.20 Sección cuerpo para la reconstrucción del rompeolas de Crestón, del puerto de Mazatlán, Sin
Figura 1.21 Sección morro para la reconstrucción del rompeolas de Crestón, del puerto de Mazatlán, Sin
Figura 1.22 Sección cuerpo para la reconstrucción del rompeolas de Chivos, del puerto de Mazatlán, Sin
Figura 1.23 Sección morro para la reconstrucción del rompeolas de Chivos, del puerto de Mazatlán, Sin
Figura 1.24 Planta de la ubicación del Proyecto Ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020 con elementos Core loc para la coraza y la berma
Figura 1.25 Muelle de Transbordadores del puerto de Mazatlán Sin., tomada en el año 2010
Figura 1.26 Planta de la ubicación del Proyecto Ejecutivo de reconstrucción de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020

Figura 1.28 Planta de la ubicación del proyecto ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos, del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020 34

Figura 1.31 Planta de la ubicación del proyecto ejecutivo de la zona de muelles de pesca deportiva (zona 2), del puerto de Mazatlán, Sin. Elaborado en julio de 2020.

Figure 4.27 Viete en plante del provente signutive de protessión marginal del senal

Figura 1.39 Ubicación del rompeolas de PEMEX, en el puerto de Manzanillo, Col. 40

Figura 1.43 Ubicación de la zona del proyecto de redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas
Figura 1.44 Vista en planta de la ubicación de los rompeolas separados de la costa tipo T-I y T-2 (rompeolas del 1 al 6)43
Figura 1.45 Vista en planta de la ubicación de los rompeolas separados de la costa tipo T-I y T-2 (rompeolas del 7 al 10)
Figura 1.46 Vista en planta de la ubicación de los rompeolas separados de la costa tipo T-I y T-2 (rompeolas del 11 al 13) 44
Figura 1.47 Sección tipo morro para los rompeolas separados de la costa tipo T-I
Figura 1.48 Sección tipo cuerpo para los rompeolas separados de la costa tipo T-I. 45
Figura 1.49 Sección tipo morro para los rompeolas separados de la costa tipo T-II. 45
Figura 1.50 Sección tipo cuerpo para los rompeolas separados de la costa tipo T- II
Figura 1.51 Imágenes comparativas donde se puede observar el puerto de Veracruz antes y después de la construcción del Rompeolas Oriente
Figura 1.52 Rompeolas Oriente del puerto de Veracruz.
Figura 1.53 Vista en planta del rompeolas oriente de la ampliación del puerto de Veracruz
Figura 1.54 Diseño de la sección cuerpo 1 del rompeolas oriente
Figura 1.55 Diseño de la sección cuerpo 2 del rompeolas oriente
Figura 1.56 Diseño de la sección cuerpo 3 y 4 del rompeolas Oriente 48
Figura 1.57 Diseño de la sección morro 1 del rompeolas oriente
Figura 1.58 Diseño de la sección morro 2 del rompeolas oriente
Figura 1.59 Diseño de la sección morro 3 del rompeolas oriente
2. MARCO ANALÍTICO

Figura 2.2 Espectro de energía del oleaje......54

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Figura 3.6 Diseño de la sección transversal con Cubo ranurado en la coraza. 68

Figura 3.7 Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje. 85

Figura 3.11Sección transversal analizada con Cubo ranurado en la coraza. ... 234

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

1. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DEL ARTE

Tabla 1.1 Valores de coeficiente de estabilidad por elemento de coraza. 16

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Tabla 3.2 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversaldiseñada a base de elementos Core loc.70

Tabla 3.3 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversaldiseñada a base de elementos Xbloc o Bari.70

Tabla 3.4 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversaldiseñada a base de elementos Core loc.71

Tabla 3.5a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Core loc como elementos de coraza.75

Tabla 3.5b Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Core loc como elementos de coraza.76

Tabla 3.5c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Core loc como elementos de coraza.77

Tabla 3.5d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Core loc como elementos de coraza.78

Tabla 3.6a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Xbloc o Bari como elementos de coraza.78

Tabla 3.6b Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Xbloc o Bari como elementos de coraza.79

Tabla 3.6c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Xbloc o Bari como elementos de coraza.80

Tabla 3.6d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Xbloc o Bari como elementos de coraza.81

Tabla 3.7a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Cubo ranurado como elementos de coraza.81

Tabla 3.7bPrograma de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Cubo ranurado como elementos de coraza.82

Tabla 3.7c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Cubo ranurado como elementos de coraza.83

Tabla 3.7d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñadacon Cubo ranurado como elementos de coraza.84

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tabla 4.3 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección derompeolas con elementos Core loc colocados a una capa sobre la coraza conporcentajes de vacíos de 60%.312

Índice de Gráficas

Página

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.5.2 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con Cubo ranurado.

(1) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.
Gráfica 3.1 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.2 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.3 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.4 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.5 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.6 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.7 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.8 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.9 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.10 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.11 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg

(2) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.13 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg 101

Gráfica 3.14 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg 101

Gráfica 3.15 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg 102

Gráfica 3.16 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg 102

Gráfica 3.17 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg 105

Gráfica 3.19 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg 106

Gráfica 3.21 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg 109

Gráfica 3.22 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg 109

(3) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.25 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg 113

Gráfica 3.26 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg 113
Gráfica 3.27 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg 114
Gráfica 3.28 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg 114
Gráfica 3.29 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg 117
Gráfica 3.30 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg 117
Gráfica 3.31 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg 118
Gráfica 3.32 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg 118
Gráfica 3.33 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg 121
Gráfica 3.34 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg 121
Gráfica 3.35 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg 122
Gráfica 3.36 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg 122
(4) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.
Gráfica 3.37 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg 125
Gráfica 3.38 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg 125
Gráfica 3.39 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg 126
Gráfica 3.40 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg 126

Gráfica 3.41 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg 129 Gráfica 3.42 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg 129 Gráfica 3.43 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg 130 Gráfica 3.44 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg 130 Gráfica 3.45 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg 133 Gráfica 3.46 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg 133 Gráfica 3.47 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg 134 Gráfica 3.48 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg 134 (5) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP. Gráfica 3.49 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg 137 Gráfica 3.50 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg 137 Gráfica 3.51 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg 138 Gráfica 3.52 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg 138 Gráfica 3.53 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg 141 Gráfica 3.54 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg 141 Gráfica 3.55 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg 142

Gráfica 3.56 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.57 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.58 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.59 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.60 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg
(6) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.
Gráfica 3.61 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.62 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg 149
Gráfica 3.63 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg 150
Gráfica 3.64 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg 150
Gráfica 3.65 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg 153
Gráfica 3.66 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg 153
Gráfica 3.67 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg 154
Gráfica 3.68 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg 154
Gráfica 3.69 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg 157
Gráfica 3.70 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg 157

3.5.3 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con elementos Xbloc o Bari

 Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.82 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg 170

Gráfica 3.83 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg 171

Gráfica 3.84 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg 171

(2) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.90 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg 178

(3) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.104 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg 191

(4) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.

(5) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP.

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.

Gráfica 3.140 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg 227

3.5.4 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con Cubo ranurado

(1) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

(2) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

(3) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Gráfica 3.172 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.173 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.174 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.175 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.176 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.177 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.178 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.179 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg
Gráfica 3.180 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg
(4) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro JONSWAP.
Gráfica 3.181 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.182 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.183 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.184 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg
Gráfica 3.185 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg
Gráfica 3.186 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg

(5) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro JONSWAP.

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro JONSWAP.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Índice de Fotografías

Página

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Fotografía 3.6 Colocación de la coraza de la sección diseñada con elementos Xbloc o Bari a la escala seleccionada......74

3.5.2 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con elementos Core loc.

(1) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.21 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 100

Fotografía 3.22 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 100

(2) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.28 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg) 107

Fotografía 3.29 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 107

Fotografía 3.30 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 107

Fotografía 3.32 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 108

Fotografía 3.34 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 111

(3) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.46 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 120

(4) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.

Fotografía 3.55 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas. 127

(5) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP.

(6) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.
3.5.3 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con elementos Xbloc o Bari.

 Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.108 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg) 172

(2) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.113 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg) 176

Fotografía 3.117 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas. 177

Fotografía 3.118 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg) 180

Fotografía 3.123 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg) 184

(3) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.128 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg) 188

Fotografía 3.133 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg) 192

Fotografía 3.134 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 192

Fotografía 3.138 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg) 196

Fotografía 3.139 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 196

Fotografía 3.140 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 196

Fotografía 3.141 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 197

Fotografía 3.142 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas. 197

(4) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.

Fotografía 3.143 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg) 200

Fotografía 3.144 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas. 200

Fotografía 3.148 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg) 204

Fotografía 3.152 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas. 205

(5) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP.

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.

Fotografía 3.173 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg) 224

3.5.3 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con Cubo ranurado.

(1) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.

Fotografía 3.189 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas...... 237 Fotografía 3.190 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas...... 237 Fotografía 3.191 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.192 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas...... 238 Fotografía 3.193 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la Fotografía 3.194 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.195 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.196 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas...... 242 Fotografía 3.197 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.198 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la Fotografía 3.199 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.200 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas...... 245 Fotografía 3.201 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.202 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a (2) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu. Fotografía 3.203 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la

Fotografía 3.204 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.205 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.206 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.207 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.208 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg)
Fotografía 3.209 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.210 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.211 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.212 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.213 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg)
Fotografía 3.214 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.215 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.216 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.217 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas
(3) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.
Fotografía 3.218 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg)

Fotografía 3.219 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a

Fotografía 3.220 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.221 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.222 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.223 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la Fotografía 3.224 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.225 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.226 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.227 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.228 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la Fotografía 3.229 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.230 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.231 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a Fotografía 3.232 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas...... 270 (4) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro JONSWAP. Fotografía 3.233 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la

Fotografía 3.234 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.235 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.236 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.237 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.238 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg)
Fotografía 3.239 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.240 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.241 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.242 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.243 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg)
Fotografía 3.244 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.245 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.246 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.247 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas
(5) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro JONSWAP.
Fotografía 3.248 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 10 seg)

Fotografía 3.261 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas......294

Fotografía 3.262 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas......294

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro JONSWAP.

Fotografía 3.265 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.264 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.266 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas .298 Fotografía 3.267 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas .298 Fotografía 3.268 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg) .301 Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas .301 Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas .301 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas .302 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas .302 Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas .302 Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas .305 Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas .305 Fotografía 3.275 Est	Fotografía 3.265 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.267 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas. 298 Fotografía 3.268 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la 301 Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a 302 Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a <t< td=""><td>Fotografía 3.266 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas</td></t<>	Fotografía 3.266 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.268 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la 301 Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 301 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 302 Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a 305 Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.276 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a 305 Fotografía 3.276 Estructura a base de Cubo ranurado	Fotografía 3.267 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg) Sotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas. Sotografía 3.277 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.	Fotografía 3.268 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 14 seg)
Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg)	Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas 302
Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (H= 18 seg)
Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.276 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas
Fotografía 3.277 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas	Fotografía 3.276 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas
	Fotografía 3.277 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas

Sinopsis

En el presente estudio se analizó la estabilidad estructural de secciones de rompeolas constituidos con tres diferentes elementos con que se puede construir la capa coraza, bajo la perspectiva de la variación del porcentaje de vacíos (porosidad) en la colocación de estos elementos en la pendiente de la estructura (rompeolas), y el análisis del comportamiento de las estructuras bajo la acción de oleaje desarrollado con dos tipos de espectro de energía que se utilizan en el análisis de modelaciones de la Ingeniería Hidráulica Marítima.

Para este estudio se analizó el estado del arte referente al tema en cuestión, donde se mencionan los investigadores más importantes del tema relativo al diseño e implementación de elementos prefabricados de concreto, para brindar mayor seguridad y eficiencia a los rompeolas, sus hallazgos durante su investigación acerca del porcentaje de vacíos y la estabilidad del elemento en la forma y numero de colocación en el rompeolas.

Para concluir este estudio, se presentaron los resultados cuantitativos y cualitativos del porcentaje de daño que se registró en cada una de las secciones de rompeolas construidas con los elementos de protección de coraza con las varianzas en el porcentaje de vacíos.

Abstract

The structural stability of breakwater sections constituted with three different elements with which the cuirass layer can be constructed was analyzed In the present study, under the perspective of the variation of the percentage of voids (porosity) in placing these elements on the slope of the structure (breakwater), and the analysis of the behavior of structures under the action of waves developed with two types of energy spectrum that are used in the modeling analysis of Marine Hydraulic Engineering.

The state of the art regarding the topic in question was analyzed for this study, where the most important researchers of the topic related to the design and implementation of prefabricated concrete elements are mentioned, to provide greater safety and efficiency to breakwaters, its findings during its investigation about the percentage of voids and the stability of the element in the shape and number of placement in the breakwater.

To conclude this study, the quantitative and qualitative results of the percentage of damage that was registered in each of the sections of breakwaters built with the elements of protection of cuirass with the variances in the percentage of voids were presented.

Resumen ejecutivo

A lo largo de los siglos se han construido rompeolas en montículos hasta formar los rompeolas que actualmente conocemos con rocas de cantera de grandes dimensiones o elementos de concretos prefabricados.

En nuestro país, el desarrollo portuario se ha ido incrementando de manera considerable en los últimos años, de ahí surge la necesidad de crear estructuras que soporten las condiciones de oleaje para las que fueron creadas. Generalmente el daño que pueden sufrir estas estructuras suele relacionarse con su inestabilidad hidráulica, pero es importante señalar que las fallas de los rompeolas también están en función de un mal proceso constructivo.

El presente estudio se realizó con la finalidad de probar la importancia que tiene el llevar a cabo la construcción de las estructuras de protección costera respetando los porcentajes de vacíos establecidos para cada uno de los elementos que constituyen sus capas más expuestas. Al mismo tiempo se obtuvo el porcentaje de vacíos mínimo permisible para cada uno de los elementos de concreto analizados en el modelo hidráulico de estabilidad estructural.

Para la realización del presente estudio, en el capítulo 1 se muestra una pequeña introducción sobre la importancia del porcentaje de vacíos en los procesos constructivos de los rompeolas.

En el capítulo 2 se describen los espectros de energía con los cuales se calculó el oleaje para los ensayos de estabilidad estructural con secciones construidas con los tres elementos prefabricados en la capa de coraza del rompeolas.

En el capítulo 3 se describe el proceso constructivo de las secciones de rompeolas y los ensayos realizados para la obtención de los parámetros de daño para cada una de las secciones de rompeolas analizadas.

En el capítulo 4 se resumen los resultados obtenidos de las modelaciones, analizando los parámetros de daño obtenidos para cada elemento constitutivo de la capa de coraza del rompeolas.

en el capítulo 5 se establecieron las conclusiones y recomendaciones producto principal de este estudio.

Introducción

En la construcción de un rompeolas el porcentaje de vacíos en sus capas constituyentes es de suma importancia, ya que de este depende el correcto funcionamiento de la propia estructura en general, principalmente bajo la acción del oleaje extremo y sus fenómenos que presenta (difracción, reflexión y refracción principalmente) que se manifiestan a lo largo de su vida útil.

Cuando ocurre una falla en cualquier parte del cuerpo de un rompeolas, se piensa que una de las posibles causas, fue la inadecuada construcción del rompeolas, ya que en este proceso de la obra civil es de suma importancia cuidar varios aspectos para seleccionar, acarrear, construir y depositar los materiales que formarán el cuerpo del rompeolas. Dentro de estos trabajos uno de los más importantes es vigilar que el depósito y acomodo de los materiales (ya sea rocas o elementos prefabricados de concreto) sea de la manera como lo establecen manuales (en su forma teórica) principalmente cuidando el volumen de vacíos (pesos o número de piezas principalmente) por metro consecutivo o incluso por cadenamientos de los avances de la obra.



Fuente: NOTIMEX, 2018.



En los modelos hidráulicos de ingeniería portuaria y costera, el acomodo de los elementos de las capas constituyentes de las secciones de rompeolas que se estudian, también la colocación se realiza de manera similar a la de los rompeolas en la vida real (prototipo), con la diferencia de que en los laboratorios se tienen ventajas al momento de realizar los trabajos de construcción, tal es el caso de poder construir las secciones en seco, sin la presencia de agua como es el caso de la realización de la obra en mar abierto.

Estas diferencias de construcción hacen más apremiante el establecimiento de algunas normas o parámetros bajo los cuales poder tener un punto de referencia al momento de construir y constatar la correcta disposición o acomodo de las piezas de las capas constituyentes de los rompeolas en el prototipo, y que sean capaces de brindar una certeza de que tal obra sea duradera para el tiempo de vida útil proyectada desde su concepción en el proyecto de construcción.

Antecedentes

Para obtener resultados razonables de las modelaciones hidráulicas de análisis de estabilidad estructural, es necesario tomar en cuenta tres importantes factores: la exactitud de las condiciones iniciales, la selección adecuada de las ecuaciones que definen el proceso de diseño – construcción, y la definición de una apropiada selección de escala y de materiales de construcción.

La función esencial de una obra de protección o rompeolas de un puerto, es proteger los accesos, las zonas de maniobras y las obras interiores contra la acción de los oleajes procedentes de aguas profundas. Estructuralmente deberá ser capaz de resistir las diferentes acciones o fuerzas a las que estará sujeto, siendo la principal de ellas el oleaje. La función principal de un rompeolas es proveer un área de refugio de la acción del oleaje, principalmente la protección brindada es para los buques y las instalaciones de un puerto.

Losa rompeolas de tipo trapezoidal (figura 2.1) son grandes montículos de elementos sueltos, tales como grava, rocas de cantera o bloques de concreto. La estabilidad del talud expuesto del montículo depende de la relación entre la carga y la fuerza, es decir, la relación entre la altura de las olas (H), y el tamaño y la densidad relativa de los elementos (ΔD).



Fuente: Jiménez, 2010.

Figura I.2 Tipos de rompeolas de enrocamiento.

El diseño de un rompeolas requiere un análisis hidráulico, estructural y geotécnico. Esto debe abarcar todos los modos de falla identificados. La falla puede ser definida como la eliminación o rompimiento de piezas individuales, o el deslizamiento de la coraza en masa, esto se refiere al comportamiento de la estructura en condiciones normales. El estado límite último se refiere al comportamiento en condiciones extremas, generalmente se dice que una estructura ha fallado cuando su capa inmediata a la coraza (capa secundaria) está expuesta totalmente a la acción directa del oleaje. La excedencia del estado límite último conduce el daño, y a una falla potencial de la estructura.

En los rompeolas de enrocamiento, las fallas son generalmente causadas por la acción del oleaje, como una falla de talud, falla en la cimentación y erosión interna, que son influenciadas por el peso muerto, cargas de la subpresión del agua en él, debido al ascenso y descenso de la ola sobre el talud. Las causas principales de daños importantes son la erosión al pie, falla del talud, erosión interna, daño hidráulico y rebase del oleaje. En la figura 1.3, se representa gráficamente los modos de fallas en un rompeolas de enrocamiento estándar.



Fuente: Jiménez, 2010.



Las principales causas de daño debidas a falta de estabilidad hidrodinámica en un rompeolas son las siguientes:

- Extracción o remoción de las piezas de la coraza a causa del oleaje.
- Movimientos continuos de las piezas de coraza (movimientos oscilatorios sobre sus puntos de apoyo o desplazamientos de su posición original en un movimiento uniforme acompañado de otras piezas y que solo reposen sobre el talud reacomodado, o incluso la caída de una o varias piezas metros abajo del talud del rompeolas hasta tal vez alcanzar el fondo marino), capaces de deteriorar en el tiempo la conformación de la coraza. Este deterioro se puede considerar como una falla por fatiga de la estructura.

El daño en el rompeolas puede definirse como la pérdida parcial o total de su funcionalidad y suele estar relacionado con la inestabilidad hidráulica de la capa de coraza principalmente. Por lo que es de suma importancia establecer parámetros de construcción que garanticen el adecuado funcionamiento de las estructuras de protección en zonas marítimo portuarias del país.

Objetivos

El objetivo principal de este estudio es proporcionar, apoyado en el marco teórico y experimental, un porcentaje de vacíos permisible que se establezca como mínimo al momento de la construcción de las capas más expuestas a la acción del oleaje en los rompeolas, tal es el caso de la coraza y que, a su vez, sirva como punto de partida para las empresas supervisoras o contratistas al momento de evaluar una sección de rompeolas nueva construida o que presente daños por cualquiera que sea el origen.

Alcances

La presente investigación se realizó en el canal de olas ancho del Laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte, que tiene como dimensiones 35 m de longitud, 4.90 m de ancho y 1.20 m de profundidad.

Se realizaron pruebas en modelo hidráulico con señales iniciales de espectros de oleaje de Bretshneider-Mitsuyasy y JONSWAP. Con dichas señales se verificará las diferencias en las formas de los espectros, y se evaluó el daño causado a las estructuras representativas de rompeolas, construidas con tres diferentes elementos constituyentes de la capa coraza (Cubo ranurado, Core loc, y Xbloc o Bari, que ya se encuentren construidos a escala en el laboratorio) como representativos y más usualmente utilizados en la construcción de rompeolas en la actualidad, con talud de acomodo (1.5:1). Para cada una de las alternativas señaladas se realizaron pruebas en modelo hidráulico con diferentes alturas de ola y profundidades de desplante de estructura. En cada uno de los casos que se analizó se construyó a escala tomando como base las formas geométricas de los rompeolas representativos de los puertos mexicanos.

1. Investigación bibliográfica del estado del arte

Las unidades o piezas constituyentes de la capa principal del manto de un rompeolas denominada coraza, en un principio en la construcción de estas estructuras de protección costera y portuaria, han sido principalmente rocas con formas semiesféricas con aristas agudas, principalmente producto de la explotación de bancos de roca sana, para proporcionar pesos volumétricos que permitan tener la certeza de que las obras de protección sean lo suficientemente resistentes a los oleajes de los sitios donde fueron construidas.

Con el paso de los años, estas piezas o elementos constituyentes del manto principal de un rompeolas a talud, se han ido modificando, ya que las necesidades se han incrementado de acuerdo a los requerimientos de generar y construir más y mejores obras de protección a lo largo y ancho del planeta, para poder realizar eficientemente los intercambios de mercancías, bienes y servicios cualquiera que estos fueren y que puedan ser transportados por medios marítimos.

Esta necesidad de crear nuevas obras de protección día con día, ha generado la investigación a partir de aproximadamente el primer tercio del siglo XX hasta años recientes en este siglo XXI, esto ha generado distintas formas geométricas de elementos artificiales que puedan colocarse en la capa coraza de los rompeolas. Las formas principales van desde los primeros cubos que fueron diseñados semejante a las rocas nombradas escollera (ver figura 1.1), formas cubicas, bloques antifer o Cubo ranurado, tetrápodos, dolos, y distintas formas que varían de acuerdo a su geometría sus valores de trabazón (sujeción) entre ellas mismas al momento de ser colocadas sobre el talud del rompeolas.

Armour unit	Country	Year	Armour unit	Country	Year
Cube	-	_	Seabee	Australia	1978
Tetrapod	France	1950	Shed	UK	1982
Tribar	USA	1958	Accropode	France	1980
Modified Cube	USA	1959	Haro	Belgium	1984
Stabit	UK	1961	Hollow Cube	Germany	1991
Akmon	NL	1962	Core-Loc [®]	USA	1996
Tripod	NL	1962	A-Jack	USA	1998
Cob	UK	1969	Diahitis	Ireland	1998
Dolos	RSA	1963	Samoa Block	USA	2002
Antifer Cube	France	1973			

Fuente: Bakker et al., (2003).

Figura 1.1 Evolución de las formas geométricas de elementos constituyentes de la capa

coraza.

De acuerdo con la información recopilada de diferentes autores, el daño en las estructuras de protección costera se puede definir como la pérdida parcial o total de su funcionalidad y suele estar relacionado con la inestabilidad hidráulica de la capa exterior denominada Coraza. Las fuerzas de las olas pueden provocar movimientos en dicha capa como balanceo, desplazamientos o asentamiento debidos a una inadecuada compactación de las piezas cercanas al nivel del agua casi en reposo, por lo que tienden a moverse hacia el pie de la estructura. El embate de las olas causa alteraciones en la forma geométrica inicial, hasta el punto de hacer frente a la estructura de protección el fenómeno llamado erosión y formar volúmenes de acreción que pueden ser especialmente altos en el caso de los rompeolas de berma. Al dejar expuestas las capas inferiores, estas comienzan a eliminarse, la progresión de la reorganización geométrica es mucho más rápida y una vez que el material del centro es expuesto, la destrucción de la estructura es inminente.



Figura 1.2 Rompeolas dañado por la acción del oleaje con avance de daño hasta capa secundaria.

Históricamente la mayoría de las fórmulas de estabilidad hidráulica se establecieron para la estabilidad de la roca constituyente de los rompeolas en lugar de los elementos artificiales prefabricados a base de concreto. Según Allsop et al. (2009) los rompeolas con coraza a base de roca predominan en muchas áreas del mundo.

Desde las primeras investigaciones de Castro (1933) e Iribarren (1938), varios modelos de estabilidad se han propuesto y se han realizado diversos estudios sobre la estabilidad de la capa Coraza de los rompeolas. Esto da una idea de la relevancia

de este modo de falla; sin embargo, la consecución de una fórmula única parece ser bastante difícil, en parte debido a la amplia gama de tipologías y diseños.

Con respecto a ello, el presente estudio tiene como objeto proporcionar, apoyado en el marco teórico y experimental, un rango en el porcentaje de vacíos permisible que pueda tomarse como parámetro al momento de la construcción y/o revisión en el diseño y construcción de las capas más expuestas a la acción del oleaje (capa denominada coraza) en las obras de protección y que a su vez sirva como punto de partida para las empresas supervisoras o contratistas.

La primera fórmula publicada para el cálculo del diseño del peso de los elementos de la capa Coraza fue propuesta en 1933 por Castro (1933).

Las recomendaciones de Castro (1933) fueron mejoradas por Iribarren para desarrollar otro modelo en 1938, considerado por muchos autores como el trabajo pionero sobre estabilidad de la capa más expuesta del rompeolas.

En 1950, después de 12 años de analizar la fórmula presentada en 1938, Iribarren y Nogales (1950) la ratificaron introduciendo a la fórmula algunas modificaciones en el parámetro de altura de ola para tener en cuenta la profundidad del agua y el período de ola. Su modelo final fue publicado en 1965, resumiendo el trabajo previo y estudiando las limitaciones de la aplicación de la fórmula analizando diferentes pendientes y tipos de elementos de coraza y las condiciones de la ola.

La publicación de Iribarren fue publicada en inglés en 1949 y después varios modelos fueron propuestos alrededor del mundo.

En Francia, Larras desarrolló en 1952 un modelo considerando la profundidad del agua y la longitud de la ola y tres años más tarde, Beaudevin publicó una fórmula más simple. En Estados Unidos, Mathews (inédito reporte presentado en Bruun (1985) y Epstein y Tirrel (1949) propusieron formulaciones para la estabilidad hidráulica en 1948 y 1949 respectivamente. Hickson y Rodolfo (1950) propusieron un modelo establecido para embarcaderos en 1950 y Hudson y Jackson (1953) presentaron una fórmula en 1953 consistente de algunas modificaciones realizadas a la fórmula de Iribarren.

Sin embargo, la formulación empírica de modelos de estabilidad más ampliamente conocida corresponde a Hudson (1958 y 1959). Hudson notó que los coeficientes experimentales del modelo de Iribarren no pudieron determinarse con precisión a partir de pequeños experimentos a escala de estabilidad de rompeolas porque sufren variaciones de una prueba a otra para las mismas condiciones experimentales. Así, Hudson propuso en 1958 una fórmula más sencilla tras realizar nuevas pruebas de estabilidad con oleaje regular y utilizando rocas de cantera y tetrápodos (lo que más tarde fue analizado con tribares, tetraedro y otra forma especial de elementos prefabricados de concreto):

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D(S_r - 1)^3 \cot \alpha}$$
 (ecuación 1.1)

Donde:

 K_D es el coeficiente de estabilidad del elemento, contabilizado por cada pieza que esta una función de la relación $H/H_{D=0}$

 $H_{D=0}$ es la altura límite de ola (donde no se produce daño), considerado como menos del 1% del volumen de unidades erosionadas relativo a él volumen total de rocas en la capa de coraza.

 $\gamma_s = \rho_s * g$ es el peso específico de las unidades de la capa de coraza

H es la altura de ola significante

 $s_r = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ es la densidad relativa de los elementos de coraza sumergidos en agua

 α es la pendiente de la estructura del lado mar

Al mismo tiempo la relación $H/H_{D=0}$ se relacionó a un cierto porcentaje de daño, por lo que el modelo de Hudson fue probablemente uno de los primeros en proporcionar información cuantitativa sobre el nivel de daño. Esto último fue posible debido a un método estandarizado para el perfilado de daños, desarrollado por en los Estados unidos de Norteamérica.

Hudson recomendó, a pesar de que la Estación Experimental de Vías Navegables del cuerpo de Ingenieros dela Armada de los Estados Unidos (*Army EngineerWaterways Experiment Station* WES) no consideró la profundidad del agua o el periodo de la ola en sus estudios, su modelo como una aproximación inicial de las principales fuerzas de ambos oleajes (olas rompientes y no rompientes). Sin embargo, señaló que "existía cierta duda sobre cuál de las alturas de ola de los trenes de olas debería ser seleccionada como la ola de diseño". De hecho, en el Shore Proteccion Manual (SPM) se sugiere primero H1/3 (1977) y, después, H1/10 (1984) como una alternativa para determinar el parámetro de la altura de ola, ecuación (1), con respecto al oleaje irregular.

Probablemente esta aproximación proviene del primer estudio en laboratorio con pruebas de estabilidad con roca utilizando oleaje irregular que corresponde a Carsten et Alabama (1966). Los experimentos fueron llevados a cabo en 1966 en la Universidad Técnica de Noruega, usando una cinta magnética para enviar la señal eléctrica a la paleta del pistón, probando ampliamente diferentes espectros de oleaje.

También Font en 1968 abordó esta dificultad para seleccionar un apropiado diseño de ola para los modelos de estabilidad, junto con la evidencia empírica sobre la

influencia de la duración de la tormenta en los rompeolas formados por capas de enrocamiento para los ensayos de estabilidad.

En 1974, Battjes introdujo el número de Iribarren (ξ), también conocido como parámetro de similitud de rompiente, en el estudio de taludes suaves e impermeables. Este parámetro también resultó ser práctico para caracterizar el tipo de rompeolas, el ascenso (run-up) y descenso (run-down) del oleaje tanto en taludes suaves como permeables por Bruun y Gunbak en 1976.

En los años 70 se hizo un esfuerzo por recopilar las fórmulas disponibles hasta la fecha y proporcionar algunas recomendaciones de diseño. Bruun (1933) resumió las fórmulas de estabilidad más relevantes y presentó algunas sus primeras investigaciones para el diseño de rompeolas de enrocamiento, tal es el caso sobre cómo aumentar el tamaño de los elementos en las puntas de los rompeolas (denominadas más tarde como morros). Así lo afirmó también Iribarren en 1965. Adicionalmente, el primer manual de diseño en habla inglesa, el ya mencionado Shore Protection Manual (SPM), fue publicado en 1973 y reeditado en 1975, 1977 y 1984. Además, una lista completa de los modelos de estabilidad hidráulica disponibles (principalmente desarrollados usando olas) era previsto en el reporte final del Port International Navigation Association (PIANC) en 1976.

Al final de los años 70 y a comienzos de los años 80 (del siglo pasado), las investigaciones sobre grandes rompeolas de enrocamiento sufrió una serie de fracasos, como el caso de Oumeraci (1994). Estos resultados tuvieron dos efectos, el primero, tuvo consecuencias para la rehabilitación de un antiguo rompeolas dañado en la berma, donde este concepto como tal fue redescubierto; el segundo, fue que hubo un gran aumento en las actividades de investigación hacia mejorar el diseño y construcción de rompeolas de enrocamiento. Debido a la creciente demanda de hacer los rompeolas más grandes en dimensiones y la necesidad de construirlos en ambientes más hostiles, por lo que la comunidad de ingenieros costeros demandó en el diseño de fórmulas más confiables. Van Hijum estudió en 1976 el perfil de equilibrio de material grueso bajo el embate del oleaje, que fue la base para investigaciones posteriores en rompeolas de berma. Bruun analizó en 1978 las causas comunes de daño o avería en rompeolas de enrocamiento, que fueron ratificados desde el punto de vista práctico por los 25 años de experiencia por el ingeniero Kjelstrup en 1979. Además, se realizaron muchos trabajos experimentales sobre la estabilidad de los rompeolas. Los cuales se describen a continuación:

Ahrens y McCartney realizaron en 1975 varias pruebas a gran escala utilizando oleaje regular donde determinaron, entre otras variantes, la influencia del período de ola sobre la estabilidad de los rompeolas.

Thompson y Shuttler presentaron un estudio a detalle sobre la estabilidad de los rompeolas en 1975. En este estudio concluyeron que "el daño por la erosión causado por oleaje irregular sobre la pendiente de un rompeolas es en sí mismo una variable aleatoria" y que el método de colocación de las piezas influye mucho

en la evolución del daño. A largo plazo y a corto plazo se realizaron investigaciones con núcleo impermeable, no encontrando relación con profundidad ni periodo de oleaje, pero si con el número significativo de olas de cruce por cero (cero crossing), entre otros. Adicionalmente, esto sugirió que el daño tiende a alcanzar el equilibrio o, en otras palabras, la curva de daño tiende a ser asintótica.

Bruun y Günbak encontraron en 1976 que, en cuanto a la estabilidad del rompeolas que, "está claramente demostrado la importancia de período de ola". Por lo que empezaron a trabajar en un enfoque basado en riesgos en el diseño considerando la introducción del número de Iribarren en el cálculo de estructuras con pendiente.

Whillock y Price presumiblemente generaron el concepto de "fragilidad" en 1976 al indicar que elementos con alta relación de vacíos y diseñados para sujetarse entre ellos (trabazón), como dolos, se asociaba con un incremento en el margen de seguridad a medida que se acerca la falla en la estructura. También apoyaron la idea de que las rocas de cantera eran más estables bajo el embate de olas oblicuas en comparación de oleaje normal. Sin embargo, esta suposición no fue tomada en cuenta para piezas de coraza que fueran susceptibles a fuerzas de arrastre. De hecho, demostraron que la estabilidad general para una prueba particular con dolos disminuyó hasta un ángulo de incidencia de 60°. Acorde a este concepto de "fragilidad", Magoon y Baird subrayaron en 1977 la importancia del movimiento de balanceo de las rocas en desplazamiento de las piezas de coraza diseñadas para tener sujeción entre sí mismas.

Losada y Giménez-Curto propusieron en 1979 un modelo de estabilidad para verificar en un inicio el daño mediante curvas de diseño según el tipo de piezas de coraza y el número de Iribarren, para este propósito, usaron datos de Iribarren para correlacionar su modelo, y satisfactoriamente verificaron sus resultados al compararlos con los obtenidos por Hudson (1959), y los de Ahrens y McCartney (1975). Sin embargo, también encontraron dificultad de establecer una comparación entre los resultados experimentales realizados en diferentes laboratorios debido a las divergencias en ambos procesos experimentales y en cuanto a los criterios de daño. Por ello, se remarcó que "Para obtener criterios sobre el comportamiento de los rompeolas de enrocamiento bajo la acción del oleaje, los laboratorios deben establecer criterios y procedimientos experimentales uniformemente".

Losada y Giménez-Curto (1982), en concordancia con Whillock y Price (1976), estudiaron la influencia de incidencia oblicua del oleaje en 1982, donde llegaron a la conclusión de que, para las piezas de coraza que trabajan por gravedad, la estabilidad de las pendientes pronunciadas bajo el embate de oleaje oblicuo no es menor que para la incidencia de oleaje normal. Por el contrario, encontraron que para altos piezas de coraza entrelazadas (como dolos o tetrápodos) el embate del oleaje oblicuo es significativamente mayor de lo que es el oleaje normal.

Broderick y Ahrens presentaron en 1982 un documento técnico sobre los efectos de escala utilizando los resultados previos de las pruebas de Ahrens (1975). Estas pruebas, con alturas de ola de hasta 1.83 m y periodos de hasta 11.3 s. fueron

realizados en un modelo a escala 1:10 de Froude. Encontraron una reducción del 20% en el número de estabilidad de cero daño con respecto a las pruebas de escala larga mientras que el ascenso del oleaje aumentó cerca del 20%. Esta fue identificado debido a la inapropiada modelación del ascenso del oleaje dentro de la capa filtro. Las escalas fueron menos severas a altos niveles de daño y las formas de los perfiles dañados para pruebas con la misma profundidad relativa fueron muy similares. Además, en el nivel de daño cero, el período de ola tuvo menos influencia en a pequeña escala. En su estudio, se propuso en primer lugar el área de erosión adimensional (S) ampliamente utilizada.

Jensen publicó en 1984 resultados sobre rompeolas de enrocamiento. Sugirió el parámetro H_{13.6%} en lugar de H_s como un referente para la altura de ola en aguas profundas (donde la altura de ola generalmente se caracteriza por una distribución de Rayleigh) y aguas poco profundas (donde un cierto porcentaje de olas rompe). Además, para alcanzar un nivel de daño estable, se recomendaron tormentas a escala que representaran al menos de 8 a 10 horas en prototipo. Además, se propuso la primera fórmula sobre la estabilidad de la pendiente del lado puerto de los rompeolas.

Hedar desarrolló en 1986 un modelo de estabilidad completo que tomó en cuenta la profundidad del agua, la altura de olas rompientes, la pendiente del rompeolas de enrocamiento, el ángulo de fricción interno, una función de permeabilidad y dos coeficientes empíricos.

Esta investigación sobre la estabilidad del rompeolas evidenció muchas deficiencias de la fórmula simple y ampliamente utilizada de Hudson. En este contexto, Van der Meer (1985 a 1988) se refirió como VdM en esta publicación, desarrolló en 1985 un modelo revolucionario de estabilidad con una difusión similar a la de Hudson. Se consideró la influencia de la altura de ola (*H*), el período de ola (por medio del número de Iribarren, ξ_0), el número de ondas (*N*_w), el diámetro medio del cubo (*D*_{n50}), el peso específico relativo (Δ), la pendiente del rompeolas (*cot* α), y la permeabilidad de capa (*P*). Además, se introdujo el área de erosión adimensional (*S*) en las fórmulas de la siguiente manera:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 6.2 \zeta_0^{-0.5p0.18} \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2}$$
 (ecuación 1.2)

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = 1.0 \xi_0^p \sqrt{\cot \alpha} P^{-0.13} \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2}$$
 (ecuación 1.3)

Cumpliéndose la ecuación 1.2 para oleaje con rompiente tipo plunging, y para la ecuación 1.3 para rompiente de oleaje generado con el espectro de energía surging.

La formulación diferenció entre las ondas con rompiente de ola tipo plunging y las ondas con rompiente de ola de surging, e incluso incluyó la posibilidad de ser aplicado en un diseño probabilístico. Para este propósito, se puede suponer que el coeficiente 6.2 en la ecuación (1.2) se distribuye normalmente con una desviación estándar de 0.4. Del mismo modo, se puede suponer que el coeficiente 1.0 en la ecuación (1.3) se asume normalmente con una desviación estándar de 0.4. Del mismo modo, se puede suponer que el coeficiente 1.0 en la ecuación (1.3) se asume normalmente con una desviación estándar de 0.08. En la formula, la estabilidad mínima se alcanza cuando $\xi \approx 3$. Esta situación corresponde a las olas que se colapsan: mientras que las olas que rompen tipo plunging están destinadas a causar daño durante el ascenso y descenso del oleaje, las olas que colapsan (rompen) se supone que erosionan la capa expuesta durante el ascenso y descenso del oleaje.

Van der Meer realizó 262 pruebas y también consideró las 300 pruebas de Thompson y Shuttler (1975) encontrando, contrariamente a ellos, una relación de daño con el período de ola después de volver a analizar sus datos. Probó modelos de rompeolas de enrocamiento impermeables, convencionales y homogéneos, concluyendo que la estabilidad está directamente relacionada con la permeabilidad. A pesar de usar elementos y rocas naturales seleccionadas, no encontró influencia en el gradiente de estabilidad. Esta es la razón por la cual solo el parámetro D_{n50} fue considerado en la formula. Además, después de probar dos espectros diferentes Pierson-Moskowitz (banda ancha y banda estrecha), no se encontró ninguna relación entre el daño y la forma espectral o el grupo de ondas. Se señalaron notables diferencias entre las pruebas monocromáticas e irregulares, junto con una dependencia de los daños en el número de olas. De hecho, como han informado los autores actuales, estas fórmulas solo son válidas para el número de olas de entre 1,000 a 7,000 y tienden a sobrestimar el daño para las olas de más de 8,000. En 1998, Van der Meer relacionó los criterios de "no-daño" de Hudson y la exposición de las capas inferiores a la coraza (criterios de fallo) con los valores correspondientes de S en función de la pendiente del rompeolas. Además, se propuso una adaptación de sus fórmulas de tormenta única para calcular el daño causado por más de un evento de tormenta.

Van der Meer también desarrolló en 1988 la fórmula para cubos, tetrápodos y acrópodos, y por separado realizó el estudio para las pendientes más comunes para los rompeolas. En este utilizó un descriptor parámetro de daño, introducido por primera vez por Hedar en 1960, el cual fue: el número de unidades

desplazadas fuera de la capa de coraza (N₀) dentro de un ancho de capa de un cubo equivalente. Se asumió que esta magnitud equivalente a un cubo era igual al diámetro nominal D_{n50} para cubos (ecuación 1.4), 0.65h para los tetrápodos (ecuación 5) y 0.7h para acrópodos (ecuación 1.6).

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = \left(6.7 \frac{N_0^{0.4}}{N_W^{0.3}} + 1\right) \left(\frac{H_s}{L_0}\right)^{-0.1}$$
 (ecuación 1.4)

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = \left(3.75 \frac{N_0^{0.4}}{N_W^{0.25}} + 0.85\right) \left(\frac{H_s}{L_0}\right)^{-0.2}$$
(ecuación 1.5)

Falla si:

$$N_0 > 0.5 \rightarrow \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 4.1$$
 (ecuación 1.6)

1.1 Investigaciones sobre elementos de coraza prefabricados

Como se describió en el capítulo anterior, muchas han sido los investigadores que han realizado estudios para determinar en principio, el comportamiento de los elementos constitutivos de las capas de los rompeolas de enrocamiento, haciendo importantes avances en el diseño, comportamiento y determinación de las capas de los rompeolas. El principal análisis realizado en las investigaciones, se ha enfocado en la importancia de determinar el acomodo de las piezas constitutivas de la capa más expuesta al embate del oleaje sobre los rompeolas, es decir, la capa denominada coraza.

De acuerdo al estado del arte referente al tema de los elementos de coraza (figura 1.3), podemos identificar que de acuerdo al coeficiente de estabilidad de hay distintas formas geométricas, las cuales, en base a esta peculiaridad tienden a ser más o menos estables una con respecto de las otras, lo que a su vez nos plantea la necesidad de analizar en este estudio, algunas de estas piezas para determinar cuál es el parámetro de este coeficiente de estabilidad (trabazón) de entre las mismas piezas colocadas sobre los taludes de los rompeolas, que sirva como parámetro de estado en interacción con el oleaje.



Fuente: Introduction of the Xbloc® Breakwater Armour Unit (2003).



Tales elementos artificiales diferentes a la roca que han sido abordados en este estudio son: Cubo ranurado (tipo antifer), Core loc y Xbloc o Bari. A continuación, se describe el análisis previamente realizado de cada uno de estos elementos.

1.1.1 Cubo ranurado (tipo antifer)

Como se abordó en el capítulo 1 de este estudio, los primeros investigadores de las variantes en el tratado y concepción de los rompeolas constituidos por capas graduadas de material, desde el núcleo hasta la coraza, han sido diversos, de ellos los más sobresalientes en el tiempo son Robert Hudson y Van der Meer, los cuales de acuerdo a los resultados de sus análisis de modelaciones han determinado los coeficientes de estabilidad de los elementos de coraza de los rompeolas.

El Cubo ranurado fue uno de las primeras formas de elementos prefabricados en usarse como protección de un rompeolas. De acuerdo a la bibliografía analizada se tiene la evidencia que los primeros en utilizarlo fueron los Romanos en las obras de protección costera y portuaria de su época. En el análisis más reciente destacan investigaciones realizadas a partir del año 1943 del siglo pasado, y Hudson y Jackson en 1953 lo analizaron en los Estados Unidos de Norteamérica, y se desarrolló una fórmula para determinar la estabilidad diversas unidades constituyentes de los rompeolas. La fórmula de estabilidad, basada en los resultados de extensas pruebas de modelos a pequeña escala y algunas

verificaciones preliminares mediante pruebas de modelos a gran escala es la ecuación (1) de este estudio.

Hudson determino que el coeficiente de estabilidad para el cubo modificado (tipo antifer) es de 6.5 para condiciones de operatividad en rompeolas bajo embate de oleaje rompiente, mientras que adquiere el valor de 7.5 bajo embate de oleaje no rompiente, estos dos valores para la zona de un rompeolas denominada como cuerpo; mientras que para la punta del rompeolas (o morro) los valores son para oleaje rompiente y no rompiente de 5.0; estos valores fueron obtenidos con estructuras con taludes de reposo de material de 1.5:1 hasta 3:1 (ver figura 1.4).

			Struc	ture Trunk		Structure Head			
Armor Units	n ³	Placement		κ _D ²		Slope			
			Breaking Wave	Nonbreaking Wave	Breaking Wave	Nonbreaking Wave	Cot 0		
Quarrystone Smooth rounded Smooth rounded Rough angular	2 >3 1	Random Random Random 4	1.2 1.6 ₄	2.4 3.2 2.9	1.1 1.4 ₄	1.9 2.3 2.3	1.5 to 3.0		
Rough angular	2	Random	2.0	4.0	1.9 1.6 1.3	3.2 2.8 2.3	1.5 2.0 3.0		
Rough angular Rough angular Parallelepiped ⁷	>3 2 2	Random Special 6 Special 1	2.2 5.8 7.0 - 20.0	4.5 7.0 8.5 - 24.0	2.1 5.3 	4.2 6.4 	5		
Tetrapod and Quadripod	2	Random	7.0	8.0	5.0 4.5 3.5	6.0 5.5 4.0	1.5 2.0 3.0		
fribar	2	Random	9.0	10.0	8.3 7.8 6.0	9.0 8.5 6.5	1.5 2.0 3.0		
Dolos	2	Random	15.88	31.8 ⁸	8.0 7.0	16.0 14.0	2.0 ⁹ 3.0		
iodified cube	2	Random	6.5	7.5		5.0	5		
lexapod foskane fríbar	2 1	Random Uniform	11.0 12.0	22.0 15.0	 7.5	 9.5	5		
luarrystone (K _{RR}) Graded angular	-	Random	2.2	2.5					

Fuente: Shore Protection Manual Vol. 2 (1984).

Figura 1.4 Valores de coeficientes de estabilidad KD para diferentes tipos de elementos de coraza.

VALOR DE KD PARA PIEDRA Y ELEMENTOS ARTIFICIALES DE CONCRETO								
Nombre de los elementos artificiales de concreto	Número de capas de la coraza	Colocación	Valor de Kd (Cuerpo)			Valor de Kd (Morro)		
			Ola rompiente	Ola no rompiente	$\cot \alpha$	Ola rompiente	Ola no rompiente	$\cot \alpha$
Roca de cantera								
Lisa y redonda	2	azar	2.1	2.4		1.7	1.9	15.30
Lisa y redonda	3	azar	2.8	3.2		2.1	2.3	1.5-5.0
Rugosa y angular	1	azar		2.9			2.3	
		azar		4		2.9	3.2	1.5
Rugosa y angular	2		3.5			2.5	2.8	2.0
						2.0	2.3	3.0
Rugosa y angular	3	azar	3.9	4.5	1.5 a 5.0	3.7	4.2	1.5-3.0
i agood y angulai	2	especial	4.8	5.5		3.5	4.5	
	2	azar	7.2	8.3		5.9	6.6	1.5
Tetrápodos y Cuadripodo						5.5	6.1	2.0
						3.7	4.1	3.0
	2	azar	9	10.4		8.3	9.0	1.5
Tribar						7.8	8.5	2.0
						7.0	7.7	3.0
	1	uniforme	12.0	15.0		7.5	9.5	1.5-3.0
Dolos	2	azar	22	25	2.0	15.0	16.5	2.0
						13.5	15.0	3.0
Cubo modificado	2	azar	6.8	7.8	1.5 a 5.0		5.0	1.5-3.0
Hexápodo	2	azar	8.2	9.5		5.0	7.0	1.5-3.0
Core loc	1	azar	16			13		
Bari / X-Block	1	azar/GPS	16			13		

Tabla 1.1 Valores de coeficiente de estabilidad por elemento de coraza.

Cabe menciona que estos resultados fueron con análisis de capa coraza compuesta por dos líneas de cubo y la colocación en esta capa fue aleatoria.

En cuanto al porcentaje de vacíos de este elemento, Robert Hudson (1974) realizo publicaciones donde dio a conocer (figura 1.5) el coeficiente de capa (en este caso para este elemento es de dos unidades por capa) y el coeficiente de porosidad (o porcentaje de vacíos). Los anteriores valores de la figura 1.5 están resumidos en la Tabla 2. Los cuales tienen que ver directamente en el cálculo de los espesores de las capas coraza y secundaria constituyentes de un rompeolas de núcleo y capa secundaria de enrocamiento, de acuerdo a la formula (7).

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{W}{w_{\nu}}\right)^{l/3}$$
 (ecuación 1.7)

Donde:

r es el espesor promedio de la capa en metros (o pies),

n es el número de piezas de elemento de concreto o roca de cantera,

 K_{Δ} es el coeficiente de capa (de acuerdo al elemento de la coraza)

W es el peso de las piezas individuales en toneladas (Ton. /m³), (que se determina con la ecuación 1.1), y

 w_r es la densidad de masa en toneladas por metro cúbico (Ton. /m³).
Armor Unit	n	Placement	Layer Coefficient k_{Δ}	Porosity (P) %
Quarrystone (smooth) ¹	2	Random	1.02	38
Quarrystone (rough) ²	2	Random	1.00	37
Quarrystone (rough) ²	>3	Random	1.00	40
Quarrystone (parallepiped) ⁶	2	Special		27
Cube (modified) ¹	2	Random	1.10	47
Tetrapod ¹	2	Random	1.04	50
Quadr1pod ¹	2	Random	0.95	49
Hexipod ¹	2	Random	1.15	47
Tribar ¹	2	Random	1.02	54
Dolos ⁴	2	Random	0.94	56
Toskane ⁵	2	Random	1.03	52
Tribar ¹	1	Uniform	1.13	47
Quarrystone ⁷	Graded	Random		37

¹ Hudson (1974).

² Carver (1983).

³ Hudson, (1961a).

⁴ Carver and Davidson (1977).

⁵ Carver (1978).

⁶ Layer thickness is twice the average long dimension of the parallelepiped stones. Porosity is estimated from tests on one layer of uniformly placed modified cubes (Hudson, 1974).

⁷ The minimum layer thickness should be twice the cubic dimension of the W_{50} riprap. Check to determine that the graded layer thickness is ≥ 1.25 the cubic dimension of the W_{max} riprap (see eqs. 7-123 and 7-124 below).

Fuente: Shore Protection Manual Vol. 2 (1984).

Figura 1.5 Valores de coeficientes de estabilidad KD para diferentes tipos de elementos de coraza.

COEFICIENTE DE C	COEFICIENTE DE CAPA Y POROSIDAD PROMEDIO DE LA CORAZA										
Elemente de la coraza	Número de	Colocación	Coeficiente	Porosidad							
	capas	COlocacion	de capa	en %							
Roca de cantera (lisa)	2	volteo	1.02	38							
Roca de cantera (rugosa)	2	volteo	1.15	37							
Roca de cantera (rugosa)	3	volteo	1.10	40							
Cubo modificado	2	volteo	1.10	47							
Tetrápodo	2	volteo	1.10	50							
Cuadripodo	2	volteo	0.95	49							
Hexápodo	2	volteo	1.15	47							
Tribar	2	volteo	1.02	54							
Dolos	2	volteo	1.00	63							
Tribar	1	uniforme	1.13	47							
Core loc	1	uniforme	1.51	60							
Bari (X-Block)	1	uniforme	1.51	60							

Tabla 1.2 Coeficientes de capa y porosidad por elemento de coraza.

1.1.2 Core loc

De acuerdo con el estado del arte, El Core loc fue desarrollado en la Estación Experimental de Vías Navegables (Waterways Experiment Station WES) en el Laboratorio Costero e Hidráulico (Coastal and Hydraulics Laboratory CHL) en 1992 y patentado en 1995 (Melby y Turk 1995). Durante las etapas iniciales del diseño del rompeolas para el Puerto de San Francis en 1995, las ventajas del Core loc, de acuerdo a los resultados de análisis de estabilidad de los elementos, fueron notablemente evidentes, sobre la unidad hasta entonces la forma geométrica de elemento prefabricado de concreto más estable (con mayor coeficiente de estabilidad) eran los dolos.

Melby y Turk (1995), en el artículo denominado "CORE-LOC: Optimized concrete armor units" como parte del PIANC, determinaron el coeficiente de estabilidad (K_D) para este tipo de elemento, el cual es de 16 para condiciones de operatividad en la sección del cuerpo del rompeolas, mientras que adquiere el valor de 13 en la sección de la punta del rompeolas (comúnmente denominada morro), ambas, bajo embate de oleaje rompiente; estos valores fueron obtenidos con estructuras con taludes de reposo de material de 1.5:1 y 2:1 (ver figura 1.6).

			Breakin	g Waves						
Armor Unit	Structure Slope cotα	Packing Density φ	K _{DH} , Head	K _{ot} , Trunk						
Core-Loc	1.5	0.580'	13 °	16 ^d						
Core-Loc	2	0.580'	13 ^{c,e}	16 ^{d,e}						
Tribar-u ^b	2	0.599	7 ^e	12 ^e						
Tribar-u ^b	5	0.599	7.5 ^e	12						
Tribar	1.5	0.938	8.3 ^e	9 ^e						
Tribar	2	0.938	7.8 ^e	9e						
Tribar	3	0.938	6	9 ^e						
Dolos	1.5 ^{e,f}	0.827	7 ^{e,f}	16 ^{e,f}						
Dolos	2	0.827	8 ^e	15.8						
Dolos	3	0.827	7 ^e	16 ^e						
Accropode	1.5	0.650	10 ⁹	10 ^g						
Accropode	2	0.650	10 ^g	10 ⁹						
Tetrapod	1.5	1.040	5 ^e	7						
Tetrapod	2	1.040	4.5 ^e	7						
Tetrapod	3	1.040	3.5 ^e	7 ^e						
Stone ^h	2	1.260	1.6 [°]	2						
Stone ^h	3	1.260	1.3	2 ^e						
COMMENTS: a) Values are based on no-damage criteria (<5% displacement) and minor overtopping (SPM 1984). b) <i>U</i> designates uniform, laid-up placement. All other units are random placement. c) These values were exceeded in the site-specific Noyo, CA, model study. d) Conservatively based on over 500 2-D tests where K _p ranged from 200 to 400 (<1% displacement, no rocking). e) Unsupported by model tests and are only provided for preliminary design purposes (SPM 1984). f) Stability of dolosse on slopes steeper that 1V:2H should be substantiated by site-specific model tests (SPM 1984). g) These values are from Sogreah informational brochure but no delineation is provided for various slope angles. h) Rough angular stone										

Fuente: Melby, J., Turk, G., (1997).

Figura 1.6 Coeficientes de estabilidad (KD) por elementos de coraza determinados por Melby y Turk (1995).

Para el porcentaje de vacíos de este elemento, estos investigadores determinaron, después de varios ensayos en laboratorio, que fueron desde modelos sin conexión entre los Core loc (Unchamfered Model Core-Loc), con modelos con los Core loc mas conjuntamente colocados entre sí (Chamfered Model Core-Loc), ver figura 6, donde también indican que tomaron en cuenta resultados de Sogreah (1997) donde demuestra que el porcentaje de vacíos debe reducirse a medida que aumenta el tamaño de la unidad (Example: 5 t Prototype Core-Loc) en la figura 1.7.

Table 1 Engineering Characteristics of Core-Loc										
	Nondimen- sional Volume	Typical Number of Layers	Nondimen- sional Layer Thickness	Layer Coeffi- cient	Porosity	Packing Density Coef- ficient	Typical Slope			
Unit	V/C3	n	r/C	k₀	P as %	φ	cot a			
Uncham- fered Model Core-Loc	0.2240	1	1.00	1.60	66	0.54	1.33-2.0			
Chamfered Model Core-Loc	0.2234	1	0.85-1.10	1.39-1.77	54-67	0.58-0.64	1.33-2.0			
Example: 5 t Prototype Core-Loc	0.2234	1	0.92	1.51	60	0.60	1.33-2.0			
Dolos	0.1561	2	1.02	0.94	56	0.83	2.0			

Fuente: Melby, J., Turk, G., (1997).

Cabe mencionar que de acuerdo a la figura 6, se tomó desde entonces el porcentaje de vacíos para el Core loc de 60%.

1.1.3 Xbloc o Bari

Dentro del estado del arete, este tipo de elemento es el más reciente en su diseño y fabricación, ya que alrededor del año 2003 Redijk et al., realizaron el diseño en Delta Marine Consultants (DMC), donde llevaron a cabo varias pruebas de estabilidad y comportamiento de este tipo de elementos, determinando sus variantes de cálculo bajo condiciones de alturas de ola en un rango de 3.02 m. a 10.01 m., con distintas condiciones de anchos de capa (Thickness of Armour layer), grado de acomodo (Packing density) entre otras (figuras 1.8 y 1.9), donde encontraron que el porcentaje de vacíos está muy cerca del 60%.

Figura 1.7 Porcentajes de vacíos (porosidad) por elementos de coraza determinados por Melby y Turk (1995) y Sogreah (1997).

Unit volume V [m²]	Design wave height H _. [m]	Unit height D [m]	Unit weight W [t]	Thickness of armour layer h [m]	Packing density N [1/100m²]	Concrete volume [m²/m²]	Placement distance horizontal D ₂ [m]	Placement distance up-slope D, [m]	Porosity of armour layer [%]	Rock grading for under layer [t]	Thickness under layer f [m]
0.75	3.35	1.31	1.8	1.3	70.0	0.53	1.73	0.83	58.7	0.06-0.3	0.8
1	3.69	1.44	2.4	1.4	57.8	0.58	1.90	0.91	58.7	0.06-0.3	0.8
1.5	4.22	1.65	3.6	1.6	44.1	0.66	2.18	1.04	58.7	0.3-1.0	1.3
2	4.65	1.82	4.8	1.8	36.4	0.73	2.40	1.14	58.7	0.3-1.0	1.3
2.5	5.01	1.96	6.0	1.9	31.4	0.78	2.58	1.23	58.7	0.3-1.0	1.3
3	5.32	2.08	7.2	2.0	27.8	0.83	2.75	1.31	58.7	0.3-1.0	1.3
4	5.86	2.29	9.6	2.2	22.9	0.92	3.02	1.44	58.7	0.3-1.0	1.3
5	6.31	2.47	12.0	2.4	19.8	0.99	3.26	1.55	58.7	1.0-3.0	1.8
6	6.70	2.62	14.4	2.5	17.5	1.05	3.46	1.65	58.7	1.0-3.0	1.8
7	7.06	2.76	16.8	2.7	15.8	1.11	3.64	1.74	58.7	1.0-3.0	1.8
8	7.38	2.88	19.2	2.8	14.5	1.16	3.81	1.82	58.7	1.0-3.0	1.8
9	7.67	3.00	21.6	2.9	13.4	1.20	3.96	1.89	58.7	1.0-3.0	1.8
10	7.95	3.11	24.0	3.0	12.5	1.25	4.10	1.96	58.7	1.0-3.0	1.8
12	8.44	3.30	28.8	3.2	11.0	1.32	4.36	2.08	58.7	1.0-3.0	1.8
14	8.89	3.48	33.6	3.4	10.0	1.39	4.59	2.19	58.7	3.0-6.0	2.4
16	9.29	3.63	38.4	3.5	9.1	1.46	4.80	2.29	58.7	3.0-6.0	2.4
18	9.67	3.78	43.2	3.7	8.4	1.52	4.99	2.38	58.7	3.0-6.0	2.4
20	10.01	3.91	48.0	3.8	7.9	1.57	5.17	2.47	58.7	3.0-6.0	2.4

Fuente: Bakker, P. et al. (2003).

Figura 1.8 Porcentajes de vacíos (porosidad) por ensayo determinados por Redijk et al.
(2003).

Unit volume V	Design wave height H,	Unit height	Unit width L2	Unit length	Unit weight W	Thickness of Armour layer h	Packing density H	Concrete volume	Placement Distance horizontal D,	Placement distance up-slope D,	Porosity of armour layer	Rock grading for underlayer	Thickness under layer f
[m²]	[m]	[m]	[m]	[m]	(t)	[m]	[1/100m ²]	[m³/m²]	[m]	[m]	[%]	[1]	[m]
0.75	3.02	0.75	1.51	1.91	1.8	1.2	63.7	0.48	1.66	0.95	60.3	0.06 - 0.3	0.8
1	3.33	0.83	1.66	2.10	2.4	1.3	52.6	0.53	1.82	1.04	60.3	0.06 - 0.3	0.8
1.5	3.81	0.95	1.90	2.41	3.6	1.5	40.1	0.60	2.09	1.19	60.3	0.06 - 0.3	0.8
2	4.19	1.04	e0.5	2.65	4.8	1.7	33.1	0.66	2.30	1.32	60.3	0.3 - 1.0	1.3
2.5	4.51	1.12	2.25	2.85	6.0	1.8	28.5	0.71	2.47	1.42	60.3	0.3 - 1.0	1.3
3	4.80	1.19	2.39	3.03	7.2	1.9	25.3	0.76	2.63	1.51	60.3	0.3 - 1.0	1.3
4	5.28	1.31	2.63	3.34	9.6	2.1	20.9	0.83	2.89	1.66	60.3	0.3 - 1.0	1.3
5	5.69	1.42	2.83	3.59	12.0	2.3	18.0	0.90	3.12	1.78	60.3	0.3 - 1.0	1.3
6	6.04	1.50	3.01	3.82	14.4	2.4	15.9	0.96	3.31	1.90	60.3	1.0 - 3.0	1.8
7	6.36	1.58	3.17	4.02	16.8	2.5	14.4	1.01	3.49	2.00	60.3	1.0 - 3.0	1.8
8	6.65	1.66	3.31	4.20	19.2	2.7	13.2	1.05	3.64	2.09	60.3	1.0 - 3.0	1.8
9	6.92	1.72	3.45	4.37	21.6	8.5	12.2	1.09	3.79	2.17	60.3	1.0 - 3.0	1.8
10	7.16	1.78	3.57	4.53	24.0	2.9	11.3	1.13	3.93	2.25	60.3	1.0 - 3.0	1.8
12	7.61	1.89	3.79	4.81	28.8	3.0	10.0	1.20	4.17	2.39	60.3	1.0 - 3.0	1.8
14	8.01	1.99	3.99	5.06	33.6	3.2	9.1	1.27	4.39	2.51	60.3	1.0 - 3.0	1.8
16	8.38	2.09	4.17	5.29	38.4	3.3	8.3	1.33	4.59	2.63	60.3	1.0 - 3.0	1.8
18	8.71	2.17	4.34	5.50	43.2	3.5	7.7	1.38	4.77	2.73	60.3	3.0 - 6.0	2.4
20	9.03	2.25	4.50	5.70	48.0	3.6	7.1	1.43	4.95	2.83	60.3	3.0 - 6.0	2.4

Fuente: Bakker, P. et al. (2003).

Figura 1.9 Porcentajes de vacíos (porosidad) por ensayo determinados por Redijk et al. (2003).

A partir de estos experimentos, se tomó como valor estándar de porosidad el 60% para Xbloc o Bari. De igual forma bajo esta investigación, determinaron que el coeficiente de estabilidad es de Kd=16, como se muestra de igual forma en la tabla 1.

Por lo que respecta a la determinación del coeficiente de capa (coefficient of layer) se estableció que fue de 1.51.

Es importante aclarar que estos valores de porcentajes de porosidad (o vacíos) en el acomodo de estos tres tipos de elementos (Cubo tipo Antifer, Core loc y Xbloc o Bari citados para este estudio) constituyentes de la capa coraza de un rompeolas, son los establecidos en los estándares y manuales recomendados mundialmente, que se deben de seguir en las construcciones de tanto en modelos hidráulicos como en los prototipos construidos o por construir en las obras de protección, y que fueron tomados como punto de partida en este estudio, e incrementados como se describe en el capítulo 4 de este tratado, para obtener un rango de comparación que sea permisible y aceptable al momento de verificar principalmente el comportamiento estructural de una obra de protección que esté compuesta por estos tres tipos de elementos en su capa coraza.

1.2 Antecedentes de los puertos mexicanos donde se han construido estructuras de protección costera con los elementos Cubo (tipo antifer), Core loc y Xbloc o Bari.

El IMT ha realizado diversos estudios en modelos hidráulicos para la construcción y/o prolongación de las escolleras o rompeolas que integran los diferentes puertos de la República Mexicana. En el presente documento se hace una recopilación histórica de algunos de los puertos del Océano Pacífico y del Golfo de México en los cuales se han analizado diferentes alternativas contemplando diferentes elementos de coraza antes de su construcción.

> Océano Pacífico

• Puerto de Ensenada

Para el caso del puerto de Ensenada Baja California, el IMT realizó diversos estudios para la prolongación del rompeolas con diferentes elementos de coraza.



Fuente: Imagen tomada del Google Earth (año 2016).



En febrero de 2012 se realizó el proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas, empleando Cubo ranurado como elementos de coraza de 12.4 ton para la sección cuerpo y Cubo ranurado de 19.4 ton para la sección morro tal como se muestra en las figuras 1.11 y 1.12 respectivamente.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-01-2012, "proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas" con fecha de febrero de 2012.

Figura 1.11 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-01-2012, "proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas" con fecha de febrero de 2012.



En marzo de 2012 se realizó el proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas, empleando Core loc como elementos de coraza de 6 ton para la sección cuerpo y Core loc de 7.4 ton para la sección morro tal como se muestra en las figuras 1.13 y 1.14 respectivamente.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-02-2012, "proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas" con fecha de marzo de 2012.

Figura 1.13 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-02-2012, "proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas" con fecha de marzo de 2012



En julio de 2012 se realizó el proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas, empleando Xbloc como elementos de coraza de 9.6 ton para la sección cuerpo y Xbloc de 12 ton para la sección morro tal como se muestra en las figuras 1.15 y 1.16 respectivamente.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-03-2016, "Proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas primera etapa" con fecha de julio de 2016.

Figura 1.15 Sección cuerpo para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B.C.



Fuente: Plano D.I.P.C. – ENSENADA-03-2016, "Proyecto ejecutivo de la prolongación del rompeolas primera etapa" con fecha de julio de 2016.

Figura 1.16 Sección morro para la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B. C.

Finalmente, para llevar a cabo la construcción de la prolongación del rompeolas del Puerto de Ensenada B. C. se empleó la alternativa con los Xbloc como elementos de coraza para las secciones cuerpo y morro tal como se puede observar en las imágenes comparativas de la figura 1.17.



Fuente: Google Earth 2017 y 2020 respectivamente.

Figura 1.17 Imágenes comparativas del Puerto de Ensenada B. C. antes y después de la construcción de la prolongación del rompeolas.



Fuente: Google Earth 2020.



• Puerto de Mazatlán, Sinaloa

Para el caso del puerto de Mazatlán, Sin., el IMT realizó diversos estudios para la reconstrucción de los rompeolas denominados Crestón y Chivos empleando como elementos de coraza diferentes materiales.



Fuente: Google Earth 2010.

Figura 1.19 Puerto de Mazatlán Sin., tomada en el año 2010 antes de la reconstrucción de los rompeolas del Crestón y de Chivos.

En enero de 2012, el IMT realizó diversos ensayos en modelos hidráulicos y numéricos para la propuesta de reconstrucción de los rompeolas de Crestón y de Chivos proporcionados por la API MAZATLÁN en los cuales se propuso realizar dicha reconstrucción empleando Core loc como elementos de coraza.

Para ambos rompeolas (del Crestón y de Chivos) se emplearon elementos Core loc de 4.2 ton para el lado puerto y 6.1 ton para el lado mar en la sección cuerpo del rompeolas y Core loc de 12.9 ton para la sección morro tal como se muestra en las figuras 1.20 - 1.23.



Fuente: Plano "Proyecto de reconstrucción de los rompeolas del puerto de Mazatlán, secciones transversales, Rompeolas del Crestón", con fecha de enero de 2012.

Figura 1.20 Sección cuerpo para la reconstrucción del rompeolas de Crestón, del puerto de Mazatlán, Sin.



Fuente: Plano "Proyecto de reconstrucción de los rompeolas del puerto de Mazatlán, secciones transversales, Rompeolas del Crestón", con fecha de enero de 2012.

Figura 1.21 Sección morro para la reconstrucción del rompeolas de Crestón, del puerto de Mazatlán, Sin.



Fuente: Plano "Proyecto de reconstrucción de los rompeolas del puerto de Mazatlán, secciones transversales, Rompeolas de Chivos" con fecha de enero de 2012.





Fuente: Plano "Proyecto de reconstrucción de los rompeolas del puerto de Mazatlán, secciones transversales, Rompeolas de Chivos" con fecha de enero de 2012.

Figura 1.23 Sección morro para la reconstrucción del rompeolas de Chivos, del puerto de Mazatlán, Sin.

En el año 2020, en base a los modelos hidráulicos realizados en el Laboratorio de Hidráulica, el IMT realizó diversos proyectos ejecutivos para la reconstrucción de las obras de protección en diferentes zonas del puerto de Mazatlán, Sin. tales como la zona exterior del muelle de transbordadores, la protección marginal en la Isla de Chivos y la reconstrucción de la zona de muelles de pesca deportiva.

En las siguientes figuras se muestran los diferentes proyectos ejecutivos realizados para el puerto de Mazatlán, Sinaloa empleando como elemento de coraza y berma, los elementos Core loc de 1 ton.



Figura 1.24 Planta de la ubicación del Proyecto Ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020 con elementos Core loc para la coraza y la berma.







En las siguientes figuras se muestran las secciones propuestas para el proyecto ejecutivo de reconstrucción de la zona de muelles de pesca deportiva, empleando elementos Core loc de 1 ton. para la coraza y para la berma.







Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo: de la zona de muelles de pesca deportiva (zona 2) del cadenamiento 0+000 al 0+380" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.27 Sección Tipo para la reconstrucción de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores del puerto de Mazatlán, Sin.

En las siguientes figuras se muestran los diferentes proyectos ejecutivos realizados para el puerto de Mazatlán, Sinaloa empleando como elemento de coraza y berma, los elementos Xbloc o Bari de 1 ton.



Figura 1.28 Planta de la ubicación del proyecto ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos, del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos del cadenamiento 0+340 al 1+200 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.29 Sección Tipo cuerpo 1 para la reconstrucción de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores del puerto de Mazatlán.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo de protección marginal en la Isla de Chivos del cadenamiento 0+340 al 1+200 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.30 Sección Tipo cuerpo 2 para la reconstrucción de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores del puerto de Mazatlán, Sin.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo: de la zona de muelles de pesca deportiva (zona 2) del cadenamiento 0+000 al 0+380 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.





Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo: de la zona de muelles de pesca deportiva (zona 2) del cadenamiento 0+000 al 0+380 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.32 Sección Tipo de la zona de muelles de pesca deportiva (zona 2) del puerto de Mazatlán, Sin.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo: de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores cadenamiento 0+000 al 0+180 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.33 Planta de la ubicación del proyecto ejecutivo de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores, del puerto de Mazatlán, Sin. elaborado en julio de 2020.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo: de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores cadenamiento 0+000 al 0+180 con elemento Xbloc o Bari" con fecha de julio de 2020.

Figura 1.34 Sección Tipo de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores del puerto de Mazatlán, Sin.

En la siguiente figura se muestran las secciones propuestas para el proyecto ejecutivo de reconstrucción de la zona exterior del espigón del muelle de transbordadores, empleando elementos Core loc de 1 ton. para la coraza y para la berma.



Fuente: Google Earth (año 2021).



• Puerto de Manzanillo y Laguna de Cuyutlán, Col.

En marzo de 2010, el IMT realizó un estudio para la Laguna de Cuyutlán, Col., donde se integró un proyecto ejecutivo de protección marginal de los taludes del canal de acceso a la Laguna de Cuyutlán, considerando como elementos de coraza, Cubo ranurado de 9.5 toneladas.





Figura 1.36 Ubicación de la Laguna de Cuyutlán, en el puerto de Manzanillo, Col.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo de la protección marginal en los taludes del canal de acceso" con fecha de marzo de 2020.

Figura 1.37 Vista en planta del proyecto ejecutivo de protección marginal del canal de acceso a la Laguna de Cuyutlán, Colima.



Fuente: Plano "Proyecto Ejecutivo de la protección marginal en los taludes del canal de acceso" con fecha de marzo de 2020.

Figura 1.38 Sección tipo de la protección marginal del canal de acceso a la Laguna de Cuyutlán, Colima.

En febrero de 2020, el IMT realizó un estudio de investigación de iniciativa interna donde se realizaron pruebas experimentales mediante la propagación de la onda solitaria y la N-waves del tsunami ocurrido en 1995 entre las costas de Jalisco y Colima. Dichas pruebas experimentales se realizaron para las secciones cuerpo y morro de la sección del rompeolas de PEMEX, que se encuentra ubicado en el puerto de Manzanillo, Colima. Para la sección cuerpo y para el semicono del morro del rompeolas antes mencionado se emplearon Cubo ranurado como elementos de coraza.



Fuente: Google Earth.





Fuente: Proyecto "Investigación experimental con onda solitaria y N-wave, de la forma del perfil inicial de la onda del tsunami ocurrido en 1995 entre las costas de Jalisco y Colima" con fecha de enero de 2021.





Fuente: Proyecto "Investigación experimental con onda solitaria y N-wave, de la forma del perfil inicial de la onda del tsunami ocurrido en 1995 entre las costas de Jalisco y Colima" con fecha de enero de 2021.

Figura 1.41 Sección tipo morro del rompeolas de PEMEX que se encuentra ubicado en el puerto de Manzanillo, Col.



Fuente: Proyecto "Investigación experimental con onda solitaria y N-wave, de la forma del perfil inicial de la onda del tsunami ocurrido en 1995 entre las costas de Jalisco y Colima" con fecha de enero de 2021.

Figura 1.42 Sección tipo del semicono del morro del rompeolas de PEMEX que se encuentra ubicado en el puerto de Manzanillo, Col.

> Golfo de México

• Puerto de Altamira

El IMT ha realizado diversos estudios, contemplando diferentes alternativas de obras de protección costera para el puerto de Altamira, Tamps. En el año 2012 el IMT realizó un estudio para definir el proyecto ejecutivo de obras de protección para la playa sur del puerto de Altamira, dicho proyecto contempló la construcción de 13 rompeolas separados de la costa, utilizando como elementos de coraza Cubo ranurado de 5.60 ton y 7.25 ton.

En agosto de 2018, el IMT realizó un estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira (de los 13 rompeolas separados de la costa).



Fuente: Google Earth.





Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.

Figura 1.44 Vista en planta de la ubicación de los rompeolas separados de la costa tipo T-I y T-2 (rompeolas del 1 al 6).



Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.





Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.

Figura 1.46 Vista en planta de la ubicación de los rompeolas separados de la costa tipo T-I y T-2 (rompeolas del 11 al 13).



Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.





Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.

Figura 1.48 Sección tipo cuerpo para los rompeolas separados de la costa tipo T-I.



Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.

Figura 1.49 Sección tipo morro para los rompeolas separados de la costa tipo T-II.

Profundidad variable



Fuente: Proyecto "Estudio para el redimensionamiento de las estructuras de protección contra la erosión de la playa sur del puerto de Altamira, Tamaulipas" con fecha de agosto de 2018.

Figura 1.50 Sección tipo cuerpo para los rompeolas separados de la costa tipo T-II.

• Puerto de Veracruz

El IMT ha realizado diversos estudios previos a la ampliación del puerto de Veracruz. En el año 2013 se inició el proyecto "Estudios en modelos hidráulicos para la optimización del proyecto de ampliación del puerto de Veracruz" concluyendo dicho proyecto en marzo de 2015. Dicho proyecto contempla la construcción del rompeolas oriente utilizando como elementos de coraza Core loc que van desde 1.20 ton hasta 24.7 ton. En la figura 1.51 se muestran 2 imágenes, la primera fotografía se obtuvo del google earth del año 2014, antes de la construcción del rompeolas oriente, y la segunda imagen fue tomada del google earth este año, donde se puede observar el rompeolas oriente ya construido.



Fuente: Google Earth (imagen del año 2014 y 2020, respectivamente).

Figura 1.51 Imágenes comparativas donde se puede observar el puerto de Veracruz antes y después de la construcción del Rompeolas Oriente.



Figura 1.52 Rompeolas Oriente del puerto de Veracruz.

Fuente: Google Earth.



Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.

Figura 1.53 Vista en planta del rompeolas oriente de la ampliación del puerto de Veracruz.



Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.



Figura 1.54 Diseño de la sección cuerpo 1 del rompeolas oriente.

Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.





Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.

Figura 1.56 Diseño de la sección cuerpo 3 y 4 del rompeolas Oriente.



Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.





Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.





Fuente: Plano "Proyecto ejecutivo del rompeolas oriente" con fecha marzo de 2015.

Figura 1.59 Diseño de la sección morro 3 del rompeolas oriente.

Del análisis de los rompeolas en los últimos años (1950 a 2015) se puede establecer que las primeras estructuras fueron construidas, en la mayoría de los casos, con taludes de reposo de material de 2:1, y las obras de protección más recientes, en los últimos años, han sido con taludes 1.5:1, lo que, de acuerdo al estado del arte, reduce costos en materiales y agiliza los tiempos de construcción, lo que ha sido verificado en las investigaciones recientes respecto al tema de estabilidad estructural de estas obras de protección, por lo que para el presente estudio se definió el talud 1.5:1 para ser implementado en el análisis de estabilidad estructural de las secciones de rompeolas.

2. Marco Analítico

El diseño de cualquier obra marítima, así como su proceso constructivo, requiere la correcta caracterización de las acciones hidrodinámicas actuantes a menudo expresadas en términos de altura de ola, periodo y dirección. Por ello, el resultado final del diseño y ejecución depende en gran medida de lo precisas que sean nuestras mediciones del oleaje.

De forma general, la caracterización del oleaje es entendida como una descripción a largo término, en el que se incluye por un lado el régimen medio del oleaje y el régimen extremal o bien, una descripción a corto término entendida también como estudio del oleaje irregular. En la descripción del oleaje a corto término se asume que el proceso es estacionario, aleatorio y gaussiano mientras que la descripción a largo término refleja las características climatológicas existentes.

Para definir las condiciones de oleaje, existen varias investigaciones realizadas, tal es una de ellas la verificada por Munk (1944) quien definió la altura de ola significativa, como la altura promedio de las olas más altas de un tercio, y declaró que era aproximadamente igual a la altura promedio de las olas estimada por un observador experimentado. De tal forma que la altura de ola significativa se escribe como H_{1/3} o simplemente Hs.

El período de ola signifícate obtenido por las observaciones visuales de las olas es probable que sea el período medio de 10 a 15 olas prominentes sucesivas. Cuando se determina a partir de los registros calibrados, el período significante puede ser el período promedio de todas las olas cuyos valles están por debajo y cuyas crestas están por encima del nivel medio del agua (método de aumento cero). La mayoría de los análisis de registros de calibración modernos proporcionan un período de ola correspondiente al pico más alto del espectro, que tiene mayor importancia dinámica que el período signifícate, aunque los dos parámetros son generalmente comparables.

2.1 Variabilidad de la altura de las olas

Cuando las alturas de las olas individuales en un registro de olas de aguas profundas se clasifican de la más alta a la más baja, la frecuencia de ocurrencia de olas por encima de cualquier valor dado se da a una aproximación cercana por la forma acumulativa de la distribución de Rayleigh (ver figura 2.1). Este hecho se puede utilizar para estimar la altura media de las olas más altas de un tercio a partir de mediciones de unas pocas de las olas más altas, o para estimar la altura de una ola de cualquier frecuencia arbitraria a partir de un conocimiento de la altura significativa de la ola. De acuerdo con la función de distribución de Rayleigh, la probabilidad de que la altura de ola H es más que algún valor arbitrario de la altura media \widehat{H} , que se da por

$$P(H > \widehat{H}) = e^{-\left(\frac{\widehat{H}}{H_{rms}}\right)^2}$$
 (ecuación 2.1)

donde H_{rms} es un parámetro de la distribución, y P(H > \hat{H}) es el número n de olas más grande que \hat{H} dividida entre el número total N de olas en el registro. Así P tiene la forma n/N . El valor H_{rms} se llama entonces como la raíz media cuadrática y se define por





Figura 2.1 Distribución en forma gaussiana de la acumulación de energía del oleaje generado con el espectro de energía Rayleigh.

Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril resulta más conveniente hablar en términos de probabilidad de excedencia (porcentaje de olas que tienen uno altura de ola mayor que un cierto valor H) es decir:

$$q=1-P(H)=e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}$$

(ecuación 2.3)
O bien:

$$\frac{H}{H_{rms}} = ln \left(\frac{l}{q}\right)^{\frac{l}{2}} = ln n^{\frac{1}{2}}$$
 (ecuación 2.4)

Siendo H el valor de la altura de ola con una probabilidad de excedencia q (parte sombreada de la figura 2.1).

En este caso los valores de H_q representan valores a partir de los cuales la altura de ola es excedida con una cierta probabilidad q, y no valores promedio como podría ser el caso de H_{1/3}. Así, la altura de ola media de cualquier probabilidad queda expresada por la relación:

$$H_{\frac{1}{n}} = \frac{\int_{H_{q}}^{\infty} P(H) dH}{\int_{H_{q}}^{\infty} P(H) dH}$$
 (ecuación 2.5)

obteniéndose que para la altura de ola significante:

$$H_{\frac{1}{3}} = \sqrt{2}H_{rms} = 1.41H_{rms} \qquad (ecuación 2.6)$$

Una de las grandes ventajas de esta aproximación al problema de determinar la altura de ola representativa de un tren de olas, es obtener cualquier valor H_q a partir de un valor conocido de H_{ms} .

Longuet-Higgins obtuvo además la siguiente expresión para la altura de ola máxima (H_{max}) de un registro de N olas:

$$H_{max} = 0.707 H_{33} \sqrt{ln(N)}$$
 (ecuación 2.7)

Siendo H_{33} la altura de ola significante.

2.2 Descripción espectral de las olas

Hasta ahora, la descripción del oleaje ha sido realizada en el dominio del tiempo utilizando para ello una aproximación estadística al problema. El registro de las variaciones de la superficie libre del mar puede ser tratada de una forma espectral, es decir, la señal observada (oleaje irregular) puede ser descompuesta en un número de ondas sinusoidales (regulares o de frecuencia conocida) la suma de las cuales dan la señal original (figura 2.2). Esta descomposición de frecuencias es realizada mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Tronsform, FFT).

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas



Fuente: Tema2: Caracterización del oleaje.

Figura 2.2 Espectro de energía del oleaje.

Un espectro de energía $S(\omega)$ ($\omega = 2\pi/T$) representa pues la energía asociada o cada una de las frecuencias del oleaje (irregular) estudiado, pudiéndose distinguir 2 extremos:

- 1) espectros de oleaje de banda ancha y
- 2) espectros de oleaje de banda estrecha.

Un espectro de banda estrecha se caracteriza por presentar un rango de frecuencias con contenido energético limitado y es característico de estados de mar desarrollados (fuera de lo zona de generación del oleaje). Por el contrario, el espectro de bando ancha presenta una gran variedad de frecuencias y se corresponde con estados de mar más irregulares (dentro de la zona de generación del oleaje). De formo general el espectro de energía será indicativo del estados de mar observado pudiéndose obtener espectros bimodales indicativos de estados de mar de tipo dentro o fuera de la zona de generación del oleaje existentes de formo simultánea.

Uno forma de calcular el ancho espectral es mediante lo ecuación:

$$\epsilon = \sqrt{l - \left(2\frac{N_{olas}}{N_{max}}\right)^2}$$

(ecuación 2.8)

donde $N_{\textit{olas}}$ representa el número total de olas evaluado en el espectro y N_{max} el número de máximos.

Puesto que la función de densidad espectral $(S(\omega))$ indica el reparto de energías paro distintas frecuencias, su integral en todo el dominio (momento de orden 0) determina lo energía total del oleaje observado

$$E_{total} = \int_0^\infty S(\omega) d\omega = m_0$$
 (ecuación 2.9)

Para el caso de un oleaje fuera de la zona de generación puro (espectro de bando estrecha) y, asumiendo una función de densidad de tipo Rayleigh para la distribución de probabilidades de altura de ola, se obtiene que la altura de ola significante (H_s) viene dada por la expresión:

$$H_s \simeq \sqrt{2}H_{rms} \simeq \sqrt{2}\sqrt{8m_0} = 4\sqrt{m_0} = H_{m0}$$
 (ecuación 2.10)

definiendo así una altura de ola significante espectral, solo válida para los estados de mar descritos, aunque ampliamente utilizada en cualquier tipo de espectro (a mayor ancho espectral la relación dejo de ser válida).

Por otro lado, el espectro muestra un pico en las frecuencias $(f = \frac{1}{T})$ en el que la energía es mayor (figura 2.2) denominado periodo pico (T_p) que indica el periodo de los distintos oleajes asociado con mayor contenido energético.

Durante los últimos años los métodos de medida de la superficie libre han sido mejorados pudiéndose obtener además la componente de direccionalidad (boyas de oleaje direccionales). Esta nueva variable, la dirección (Θ) pude incorporarse en el análisis espectral obteniéndose un espectro completo (S(ω , Θ)).

2.3 Descripción de los espectros de energía

Los cálculos espectrales se pueden utilizar para determinar el espectro de energía de movimiento y, a partir de él, las cantidades estadísticas o atributos tales como valores RMS de movimientos que exceden un valor dado. Durante muchos años se ha creado una base de datos de estadísticas del oleaje del océano, que se encuentran en diferentes formas y las condiciones del mar se encuentran representadas por los espectros de energía del oleaje. Entre todos los espectros de mar utilizados en los laboratorios, el de Pierson-Moskowitz y el de JONSWAP (Joint North Sea Wave Observation Project) son los más conocidos (figura 2.2) y son

comúnmente considerados como una buena representación de mar abierto y mares con oleaje de cresta corta o con condición de búsqueda limitada, respectivamente. El espectro JONSWAP es el más utilizado en Oceanografía, Ingeniería Marina y en los laboratorios de Europa, por lo que estas olas se utilizan normalmente cuando la investigación se centra en el control de naves rápidas.

Una ola está representada entonces por la siguiente ecuación:

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^{N} A_j * \cos\left(\omega_j t - k_j x + \zeta_j\right)$$
 (ecuación 2.11)

donde ζ (t) es la elevación irregular de la ola, A_j, ω_j y k_j son las amplitudes de ola, frecuencias y números de ola respectivamente, y ϵ_j es normalmente el ángulo de fase aleatoria distribuidos uniformemente, x y t representan la abscisa de la posición considerada a lo largo del eje X y la variable de tiempo, respectivamente, y N es el número total de olas componentes de la muestra, por lo que un número infinito de olas componentes de la muestra está dado por:

$$\zeta(t) = \int_0^\infty \cos(\omega t - k(\omega) x + \zeta(\omega))^* \sqrt{2 S(\omega) d\omega} \qquad (\text{ecuación 2.12})$$

En el que $S(\omega)$ es un espectro de olas dado por:

$$N = \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})}{\Delta \omega} / \Delta \omega y \text{ entonces } T_{rep} = \frac{2\pi}{\Delta \omega}$$
 (ecuación 2.13)

Donde T_{rep} es el período de repetición, $\Delta \omega$ es el intervalo de frecuencia circular y ω_{max} y ω_{min} son los límites de la gama de frecuencias tomadas en consideración.

El espectro P-M viene dado por la expresión:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right)$$
 (ecuación 2.14)

Donde A = $8.1*10^{-3}*g^2$ y B = $0.74-(g/V)^4$ y V_{19.5} es la velocidad del viento a 19.5 m. por encima del nivel del agua en reposo en m/s. Las expresiones para la altura significativa (H_s) de las olas y el período medio (T_z) de cruce por cero son:

$$H_s = 4\sigma = 4\sqrt{m_0} = 4\sqrt{\int_0^\infty S(\omega)d\omega} = 4\sqrt{\frac{\alpha g^2}{5\omega_0^4}} \cong \frac{1.58}{\omega_0^2}$$
(ecuación 2.15)

$$T_{z} = \sqrt{\frac{m_{0}}{m_{2}}} = \sqrt{\frac{\int_{0}^{\infty} S(\omega) d\omega}{\int_{0}^{\infty} \omega^{2} S(\omega) d\omega}} = \sqrt{\frac{\frac{\frac{a g^{2}}{5\omega_{0}^{4}}}{\left(\frac{4}{5}\pi^{5}\right)^{\frac{1}{2}} * \frac{a g^{2}}{(2\pi\omega_{0})^{2}}}} = \frac{1}{\omega_{0}} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{5\pi}}} \cong \frac{0.71}{\omega_{0}}$$
(ecuación 2.16)

Donde para finalmente para obtener el espectro JONSWAP tenemos:

$$S(\omega) = \alpha * \frac{g^2}{\omega^5} * exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right] * \gamma^{exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\tau^{2*}\omega_0^2}\right]}$$
(ecuación 2.17)

En el que γ es el parámetro de picos, supuesto igual a 3.3 para el espectro JONSWAP medio, aunque puede variar de 1.0 a 7.0 aproximadamente, γ se define como la relación entre la altura del pico espectral y la del espectro de ondas Pierson-Moskowitz correspondiente. Es una función de la duración del viento y la etapa del crecimiento o decadencia de la tormenta. El parámetro de forma, τ , es la relación entre el área bajo el espectro a ambos lados de ω_0 y el espectral máximo ordinado.

Se necesitan dos cantidades para especificar un espectro JONSWAP, asumiendo que todos los demás coeficientes se pueden encontrar a través de los dos primeros. Esta es la razón por la que a este espectro se le conoce como un espectro de dos parámetros. En las fórmulas anteriores, γ , α y ω_0 se pueden encontrar si se conocen tanto la velocidad del viento en la zona de generación del oleaje, o a través de H_s y T_z. Pero debido a la altura de ola significante y el período de cruce por cero se relacionan entre sí a través de registros estadísticos, por lo que los valores medios para un estado de mar dado son comúnmente aceptados. Esto prácticamente reduce los parámetros necesarios para describir un espectro JONSWAP.

Por otra parte, comúnmente el espectro Bretschneider se asume como el espectro de energía de ola estándar para representar las condiciones en mar abierto y para mares de periodos largos, representado por la siguiente ecuación:

$$S(\omega) = \frac{4 \pi^{3} * H_{1/3}^{2}}{\omega^{5} * T^{4}} * exp\left(\frac{16\pi^{3}}{\omega^{4} T^{4}}\right) \qquad \left(\frac{m^{2}}{rad/s}\right) \qquad (\text{ecuación 2.18})$$

Donde $H_{1/3}$ es la altura de ola significante (El valor medio del tercio más alto de muchas mediciones de la altura media de olas); T es el período de ola dominante (que puede ser asumido como $T_{1/3}$), relacionado con el período pico $T = T_p / 1.408$.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

2.4 Espectros de mar de costa

Como se ha definido hasta aquí, los espectros mencionados tanto Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Bretschneider son relacionados para eventos de oleaje en mar abierto y en zonas de generación donde los eventos meteorológicos están bien definidos. En aguas poco profundas o someras con límites de generación de oleaje se utiliza una variación de los espectros anteriores. En este caso la energía está más concentrada alrededor de la frecuencia pico. El espectro del Join North Sea Wave Project, JONSWAP, representa esta situación (26).

$$S_J(\omega) = 0.658 * 3 * 3^J * S_B(\omega) \qquad (ecuación 2.19)$$

Donde:

$$J = e^{-\frac{\left(\frac{\omega T_0}{2\pi}-1\right)^2}{2\gamma^2}} \quad y \quad \gamma = \begin{cases} 0.07 \text{ para } \omega < \frac{2\pi}{T_p} & \text{ ó} & 0.09 \text{ para } \omega > \frac{2\pi}{T_p} \end{cases}$$

El Número de Estado del Mar (Sea State Number SSN) representa condiciones de estado del mar definidas por varios parámetros, por ejemplo, la altura de ola significante y el período pico, estos parámetros definen completamente el estado de mar y por consecuencia el espectro. En la Figura 2.3 se comparan los espectros Bretschneider y JONSWAP para un estado de mar.



Fuente: Aranda et al., (2004).



Estos dos espectros Bretschneider y JONSWAP son los comúnmente utilizados con más frecuencia en los estudios de modelaciones de hidráulica costera y portuaria en el laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte. En la figura 2.3, se puede resaltar la evidente diferencia del tamaño de los espectros de oleaje, donde le espectro JONSWAP contiene más cantidad de energía acumulada, por lo que se le considera como un espectro más agresivo (en términos de cantidad y fuerza de oleaje) que el de Bretschneider (que por sus características de definición de variables de altura de ola significante H_{1/3} y periodo significante T_{1/3}, resulta en el más representativo para caracterizar el oleaje en costas mexicanas.

Por ende, es por esta situación que en las computadoras que controlan los sistemas de generación de oleaje en el laboratorio de Hidráulica Marítima, se encuentra instalado el software que contiene estos dos espectros de energía (Bretschneider y JONSWAP) (figura 2.4 y 2.5) y resulta de interés relevante, verificar y caracterizar el desgaste que pueden causar con condiciones de oleaje (definidos por sus parámetros que dan forma al espectro) de tormenta a estructuras de protección construidos con distintos elementos de protección en la coraza de la estructura.



Figura 2.4 Espectro de energía Bretschneider y parámetros a definir en generación de oleaje para pruebas de laboratorio.



Figura 2.5 Espectro de energía JONSWAP y parámetros a definir en generación de oleaje para pruebas de laboratorio.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

3. Desarrollo experimental

Con la finalidad de revisar el porcentaje de vacíos permisible en la construcción de las capas más expuestas que componen a las estructuras de protección costera, principalmente la capa de coraza, el IMT realizó un estudio en modelo hidráulico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima, en el cual se probaron diferentes elementos de coraza sometidos a las mismas condiciones de oleaje cambiando los porcentajes de vacíos de manera gradual de cada uno de ellos durante su proceso constructivo. La selección de los elementos de Coraza para el presente estudio se basó en la información presentada en el estado del arte, donde se mencionaron algunos de los puertos más importantes de nuestro país, los cuales cuentan con obras de protección construidas a base de elementos Core loc, Xbloc o Bari y Cubo ranurado.

Para poder llevar a cabo los ensayos en modelo hidráulico se tomó en consideración la pendiente que actualmente se encuentra construida en el del canal de olas del laboratorio de Hidráulica Marítima (S= 0.031) y se realizó el diseño de la sección transversal para cada uno de los elementos de coraza seleccionados.

3.1 Diseño de la sección transversal

Para realizar el diseño de las secciones transversales se llevó a cabo la siguiente metodología:

(1) Oleaje de diseño

Para el presente estudio se consideró una altura de ola diseño de 5.94 m para la sección constituida con elementos Core loc y con elementos Xbloc o Bari. Para la sección diseñada a base de Cubo ranurado, la altura de ola de diseño empleada fue de 4.36 m.

(2) Cálculo del peso de los elementos de la coraza y del núcleo

El peso de los elementos de la coraza se determinó mediante el criterio propuesto por Hudson, el cual se basa en la aplicación de la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha}$$

(ecuación 3.1)

donde:

Wc	Peso de los elementos
Η	Altura de ola característica (Hs)
K_Δ	Coeficiente de estabilidad
γs	Peso específico del material del elemento

- γ_{W} Peso específico del agua de mar
- α Ángulo de inclinación del talud de la estructura

Por recomendaciones del Shore Protection Manual, se puede considerar un rango de pesos de entre el 75 % - 125% del peso teórico calculado de los elementos.

Para el cálculo de los elementos del núcleo se consideró la siguiente relación:

$$10kg \le W_N \le \frac{W_C}{15}$$
 (ecuación 3.2)

(3) Cálculo del espesor de la coraza

Para el cálculo de los espesores de las capas se tomó en cuenta las recomendaciones Shore Protection Manual (citadas en el capítulo 1) para cada elemento de coraza planteado en este estudio y calculado con la siguiente formula:

$$e = nk_{\alpha} \left(\frac{W}{\gamma_{\alpha}}\right)^{1/3}$$
 (ecuación 3.3)

donde:

- e Espesor de la capa
- n Número de capas
- k_{α} Coeficiente de capa.
- W Peso de los elementos

(4) Consideraciones para el diseño (elementos Core loc)

- Para el diseño de las secciones transversales se consideró una capa de elementos Core loc para la coraza, dos capas de roca para la capa secundaria y roca para el núcleo de la sección.
- El peso específico (γ_s) de la roca considerado para el cálculo del peso de los elementos fue de 2.6 ton/m³, el del concreto fue de 2.2 ton/m³ y el del agua de mar (γ_w) fue de 1.03 ton/m³.
- El coeficiente de estabilidad (K_∆) considerado en la coraza a base de elementos Core loc fue de 13.
- El talud considerado fue de 1.5:1 para el lado mar y para el lado puerto.
- La elevación considerada para el núcleo fue de +4.20 m. respecto al nivel de referencia 0.00 utilizado.

• El ancho de la corona del núcleo considerado para el diseño fue de 9.5 m.

(5) Consideraciones para el diseño (elementos Xbloc o Bari)

- Para el diseño de las secciones transversales se consideró una capa de elementos Xbloc o Bari para la coraza, dos capas de roca para la capa secundaria y roca para el núcleo de la sección.
- El peso específico (γ_s) de la roca considerado para el cálculo del peso de los elementos fue de 2.6 ton/m³, el del concreto fue de 2.2 ton/m³ y el del agua de mar (γ_w) fue de 1.03 ton/m³.
- El coeficiente de estabilidad (K_∆) considerado en la coraza a base de elementos Xbloc o Bari fue de 13.
- El talud considerado fue de 1.5:1 para el lado mar y para el lado puerto.
- La elevación considerada para el núcleo fue de +4.20 m. respecto al nivel de referencia 0.00 utilizado.
- El ancho de la corona del núcleo considerado para el diseño fue de 9.50 m.

(6) Consideraciones para el diseño (Cubo ranurado)

- Para el diseño de las secciones transversales se consideraron dos capas de Cubo ranurado para la coraza, dos capas de roca para la capa secundaria y roca para el núcleo de la sección.
- El peso específico (γ_s) de la roca considerado para el cálculo del peso de los elementos fue de 2.6 ton/m³, el del concreto fue de 2.2 ton/m³ y el del agua de mar (γ_w) fue de 1.03 ton/m³.
- El coeficiente de estabilidad (K_{Δ}) considerado en la coraza a base de Cubo ranurado fue de 5.
- El talud considerado fue de 1.5:1 para el lado mar y para el lado puerto.
- La elevación considerada para el núcleo fue de +4.20 m. respecto al nivel de referencia 0.00 utilizado.
- El ancho de la corona del núcleo considerado para el diseño fue de 9.50 m.

De acuerdo con los puntos anteriores, a continuación, se presenta el diseño de las 3 secciones transversales propuestas para la realización del presente estudio:

DISEÑO DE LA SECCIÓN TIPO C	ON ELEMENTO COR	ELOC
*** DATOS ***		
Altura de ola de diseño:	5.94 m	
Peso específico de elemento(γ _r):	2.20 ton/m ³	
Peso específico de la roca(γr):	2.60 ton/m ³	
Peso específico de agua (γ_w):	1.03 ton/m ³	
Talud:	1.5 :1	
Coeficiente de estabilidad (K_{Δ}):	13.00	
Coeficiente del talud (Fi)	0.30	
Elevación de la corona del núcleo	4.20 m	
Ancho de la corona del núcleo	9.50 m	
DISEÑO CORAZA		
Peso de los elementos de la coraza		
Densidad de sólidos de los elemento	^S 2.14	
sumergidos(Sr)	40.00 tr	40.00 /
Peso de los elementos (W)	19.00 ton	19.00 ton
14. Espesor de la coraza	25 IUII a 23.75 IUII	
Numero de capas (n) :	4	
Confiniente de capas (V_r) :	1 51	
Coeliciente de capa (K_D) .	1.51 2.10 m	2.10 m
Espesor de la coraza (e)	3.10 m	3.10 11
DISEÑO CAPA SECUNDARIA		
Peso de los elementos de la capa sec	undaria	
Peso de los elementos ($W_{C.S.}$) 0.	93 ton a 0.62 ton	
	0.77 ton	
Numero de capas (η _r):	2	
Coeficiente de capa (K_D) :	1.15	
Espesor de la capa secundaria		
Espesor de la c. secundaria (e _{C.S.})	1.65 m	1.65 m
DISEÑO NÚCLEO		
Peso de los elementos del núcleo		
W NÚCLEO	10 kg a 0.62 ton	
DISEÑO GEOMETRÍA DE LA SEC	CCIÓN	
Ancho de la corona de la capa secuno	laria	
Corona _{C.S.} 10).5 m	10.50 m
Ancho de la corona de la coraza		
Corona _{C.} 12.3	71 m	12.37 m
Elevacion de la corona de la capa sec	undaria	
Elevación _{C.S.} 5.	85 M	5.85 m
Elevación de la corona de la coraza	0.5	4.00
Elevacion _{C.} 8.	9 5 m	4.92 m

Figura 3.1 Cálculo del peso de los elementos y de los espesores de las capas que componen la sección transversal diseñada con elementos Core loc.

DISENO DE LA SECCION T	IPO CON ELEMENTO BA	RI
*** DATOS ***		
DATOS		
Altura de ola de diseño:	5.94 m	
Peso específico de elemento(γ_r):	2.20 ton/m ³	
Peso específico de la roca (v_r)	2.60 ton/m ³	
Peso específico de aqua (γ) :	1.03 ton/m^3	
	1.05 (01)/11	
Coeficiente de estabilidad (K.):	13.00	
Coeficiente del talud (Fi)	0.30	
Elevación de la corona del núcleo	4.20 m	
Ancho de la corona del núcleo	9.50 m	
~		
DISENO CORAZA		
Peso de los elementos de la coraza		
Densidad de solidos de los elemen	10S 2.14	
Peso de los elementos (W)	19.00 ton	19.00 ton
1	14.25 ton a 23.75 ton	
Espesor de la coraza		
Numero de capas (η _r):	1	
Coeficiente de capa (K_D) :	1.51	
Espesor de la coraza (e)	3.10 m	3.10 m
~		
***DISENO CAPA SECUNDARIA*	**	
Peso de los elementos de la capa s	secundaria	
Peso de los elementos (W _{C.S.})	0.93 ton a 0.62 ton	
	0.77 ton	
Numero de capas (η_r) :	2	
Coefficiente de capa (K_D) :	1.15	
Espesor de la capa secundaria) 165 m	1.65 m
) 1.05 m	1.05 11
DISEÑO NÚCLEO		
Peso de los elementos del núcleo		
W NÚCLEO	10 kg a 0.62 ton	•
DISEÑO GEOMETRÍA DE LA S	SECCIÓN	
Ancho de la corona de la capa secu	undaria	
Corona _{C.S.}	10.5 m	10.50 m
Ancho de la corona de la coraza	074	40.07
$Corona _{C.}$ 12	2.3/1 M	12.37 m
Elevación		5 95 m
Elevación de la corona de la coroz	0.00 III	0.00 M
Elevación c	8.95 m	4.92 m
Lievación C.	0.00 111	7.52 11

Figura 3.2 Cálculo del peso de los elementos y de los espesores de las capas que componen la sección transversal diseñada con elementos Xbloc o Bari.

DISEÑO DE LA SECCIÓN TIPO CO	ON CUE	BO RANU	RADO	
	100			
Altura de ola de diseno:	4.36	m hana /ma ³		
Peso específico de elemento(γ_r):	2.20	ion/m		
Peso específico de la roca(γ _r):	2.60 t	ton/m [°]		
Peso específico de agua (γ _w):	1.03 t	ton/m³		
Talud:	1.50:	:1		
Coeficiente de estabilidad (K_{Δ}): Elem C	5.00			
Coeficiente de estabilidad (K_{Δ}): Roca	2.30			
Coeficiente del talud (Fi)	0.347			
Elevación de la corona del núcleo	4.20 r	m		
Ancho de la corona del núcleo	9.50 r	m		
DISEÑO CORAZA				
Peso de los elementos de la coraza	conci	reto	roca	
Densidad de sólidos de los elementos	245	tan /n- 3	254	to n / 3
sumergidos(Sr)	2.15	ion/m ⁻	2.54	ion/m [°]
Peso de los elementos (W)	19.00 t	ton	19.00	ton
Espesor de la coraza				
Numero de capas (η _r):	2			
Coeficiente de capa (K_{P}) :	1.1			
Espesor de la coraza (e)	451	m 📕	4 51	m
	4.01		4.01	
DISEÑO CAPA SECUNDARIA				
Peso de los elementos de la capa secuno	laria			
Peso de los elementos ($W_{C.S.}$)	1.27 t	ton 1.	9	
		1.58		
Numero de capas (η _r):	2			
Coeficiente de capa (K_D) :	1.1			
Espesor de la capa secundaria				
Espesor de la c. secundaria (e _{c.s.})	1.86 r	m 📕	1.86	m
DISEÑO NÚCLEO				
Peso de los elementos del núcleo				
W NÚCLEO 10 H	kg a	1.27 to	n	
***DISEÑO GEOMETRÍA DE LA SECCIÓ	ÓN* <u>**</u>	<u></u>		
Talud interno de reposo de elementos:	1.00	:1		
Coeficiente del talud de reposo interno	0.72			
Ancho de la corona de la capa secundaria	a			
Corona _{C.S.} 10.79 r	n		10.79	m
Ancho de la corona de la coraza		_		
Corona 12 022 r			12.02	
Corona _{C.} 13.322 1	n		13.92	m
Elevación de la corona de la capa secund	n laria	_	13.92	m
Corona C_c 13.922Elevación de la corona de la capa secundElevación $C.S.$ 6.06 m	m laria m	•	6.06	m m
Elevación de la corona de la capa secund Elevación c.s. 6.06 m Elevación de la corona de la coraza	n laria n	•	6.06	m m

Figura 3.3 Cálculo del peso de los elementos y de las capas que componen la sección transversal diseñada con Cubo ranurado.



Figura 3.4 Diseño de la sección transversal con elementos Core loc en la coraza.



Figura 3.5 Diseño de la sección transversal con elementos Xbloc o Bari en la coraza.



Figura 3.6 Diseño de la sección transversal con Cubo ranurado en la coraza.

3.2 Selección de la escala de líneas

Para realizar la construcción del modelo hidráulico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima es necesario garantizar la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo, por lo que se procedió a realizar la selección de la escala de líneas.

De acuerdo con el diseño geométrico de las tres secciones transversales, y considerando los elementos que integran cada una de las capas de dichas secciones se realizó la selección de la escala de líneas en base a la siguiente metodología establecida por la Ley de Similitud de Froude:

Esta Ley de Similitud establece que los números de Froude en prototipo y modelo deberán ser iguales. El número de Froude F2 se define como:

$$F^2 = \frac{V^2}{gL}$$
 (ecuación 3.4)

dónde:

- V: Es la velocidad,
- g: La aceleración de la gravedad.
- L: La longitud característica,

La condición que deberá cumplirse es:

$$F_m^2 = F_p^2$$
 (ecuación 3.5)

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

Sustituyendo (3.4) en (3.5) se obtiene:

$$\frac{Vm^2}{gm^*Lm} = \frac{Vp^2}{gp^*Lp}$$
 (ecuación 3.6)

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

$$g_p = g_m$$
 (ecuación 3.7)

Por lo que la ecuación 3.6 cambia a:

$$\frac{Vm^2}{Lm} = \frac{Vp^2}{Lp}$$
 (ecuación 3.8)

Para la realización del presente estudio se seleccionaron diferentes escalas de líneas tal como se indica en la tabla 2.1.

Cabe mencionar que la selección de las escalas de líneas con las que se construyó el modelo hidráulico en el canal de olas, se realizó considerando las dimensiones y pesos de los elementos de coraza que se van a analizar (Core loc, Xbloc o Bari y Cubo ranurado) disponibles en el Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, de las condiciones de oleaje a estudiar en el modelo hidráulico y de la capacidad de generación del oleaje de los equipos.

Tabla 3.1 Escalas de líneas seleccionadas para llevar a cabo la construcción del modelohidráulico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima.

Elementos de coraza de la sección tipo	Escala de líneas (EL)
Core loc	1:47.4
Xbloc o Bari	1:65.4
Cubo ranurado	1:56

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

3.2.1 Selección del material

Para llevar a cabo los ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural de las secciones trasversales diseñadas, se procedió a realizar la selección de los materiales que integran cada una de sus capas a la escala previamente seleccionada.

En las siguientes tablas se muestran las escalas de las diferentes capas que componen las secciones cuerpo y morro seleccionadas con anterioridad y se muestran algunas fotografías tomadas durante el proceso de selección de los materiales.

Tabla 3.2 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversal diseñada a basede elementos Core loc.

Сара	Descripción del material	Peso en prototipo (ton)	Peso en modelo hidráulico a la escala 1:47.4 (gr)
Coraza	Core loc	19	178.41
Capa Secundaria	Roca	0.93 a 0.62	8.73 a 5.82
Núcleo	Roca	0.02 a 0.01	0.19 a 0.09
Tapete	Roca	0.02 a 0.01	0.19 a 0.09

Tabla 3.3 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversal diseñada a basede elementos Xbloc o Bari.

Capa	Descripción del material	Peso en prototipo (ton)	Peso en modelo hidráulico a la escala 1:65.4 (gr)
Coraza	Xbloc o Bari	19	67.92
Capa Secundaria	Roca	0.92 a 0.62	3.32 a 2.22
Núcleo	Roca	0.02 a 0.01	0.07 a 0.04
Berma	Roca	0.02 a 0.01	0.07 a 0.04

Tabla 3.4 Pesos de los materiales seleccionados para la sección transversal diseñada a basede elementos Core loc.

Capa	Descripción del material	Peso en prototipo (ton)	Peso en modelo hidráulico a la escala 1:56 (gr)
Coraza	Cubo ranurado	19	108.19
Capa Secundaria	Roca	1.27 a 1.90	10.82 a 7.23
Núcleo	Roca	0.02 a 0.01	0.11 a 0.06
Berma	Roca	0.02 a 0.01	0.11 a 0.06



Fotografía 3.1 Selección de los materiales que componen la capa de coraza de las secciones diseñadas (elementos Core loc, Xbloc o Bari y Cubo ranurado) a las escalas seleccionadas.



Fotografía 3.2 Selección de la roca que compone las capas secundarias de las secciones diseñadas a las escalas seleccionadas.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

3.3 Adecuación del canal de olas

Para la realización del presente estudio se llevó a cabo la construcción del modelo hidráulico de estabilidad estructural para la verificación del porcentaje de vacíos permisible, en el Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT. Dicha construcción consistió en la adecuación del canal de olas de 35 m de largo, 4.90 m de ancho y 1.20 m de profundidad (canal de olas ancho).

La adecuación del canal de olas ancho consistió en la construcción de la configuración batimétrica del perfil longitudinal de las secciones diseñadas con anterioridad y se consideró el trazo de la pendiente de la losa de fondo existente en dicho canal de olas (S=0.031).

El procedimiento para la construcción del modelo hidráulico en el canal de olas fue el siguiente:

- a) Se realizó el trazo en las ventanas de observación del canal de olas de la configuración batimétrica de las secciones transversales a ensayar.
- b) Sobre las caras interiores de los muros del canal de olas se verificó el trazo y la nivelación de la pendiente del fondo marino existente.
- c) Una vez verificado el trazo de la pendiente del fondo marino, se realizó el relleno a base de grava hasta los niveles indicados.
- d) Para el caso en particular de este estudio, la pendiente del fondo marino fue colocada a base de grava y de dos placas de acero de 3 mm de espesor.



Fotografía 3.3 Trazo de las secciones en las ventanas de observación del canal de olas.



Fotografía 3.4 Colocación de gravilla y grava (a la escala seleccionada) para la formación del núcleo y de la capa secundaria, respectivamente, de las secciones diseñadas.



Fotografía 3.5 Colocación de la coraza de la sección diseñada con elementos Core loc a la escala seleccionada.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas



Fotografía 3.6 Colocación de la coraza de la sección diseñada con elementos Xbloc o Bari a la escala seleccionada.



Fotografía 3.7 Colocación de la coraza de la sección diseñada con Cubo ranurado a la escala seleccionada.

3.4 Definición del programa de ensayos

La programación de los ensayos en el modelo hidráulico de estabilidad estructural basados en diferentes porcentajes de vacíos, se realizó considerando la altura y periodo de diseño de las secciones transversales previamente diseñadas.

Los programas de ensayo fueron establecidos para cada una de las secciones transversales establecidas con anterioridad, considerando diferentes porcentajes de vacíos durante su proceso constructivo, bajo las mismas condiciones de oleaje que fueron definidas en base a las alturas de ola de diseño para cada elemento de coraza (de acuerdo a las figuras 3.1 a 3.3), por lo que los valores para este estudio (alturas de ola de 4 a 7 m.) representan e incluyen eficientemente las alturas de ola de diseño para cada elemento. En cuanto a los periodos de ola planteados fueron determinados de acuerdo a el estado del arte planteado en el capítulo 2, los cuales son valores promedio (de 10 a 15 seg.) y que por parte del sistema de generación

de oleaje del laboratorio de Hidráulica Marítima puede manejar dentro de sus límites de generación de oleaje irregular con los espectros de energía Bretschneider-Mitsuyasu y JONSWAP.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo	
			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_01	
		10	5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_02	
		10	6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_03	
	0.00 B.M.			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_04
Core loc			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_05	
		0.00 B M		5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_06
			6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_07	
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_08	
			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_09	
			40	5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_10
		18	6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_11	
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_12	

Tabla 3.5a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Coreloc como elementos de coraza.

Tabla 3.5b Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Coreloc como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	60%	JONSWAP	Ensayo_13
		40	5	60%	JONSWAP	Ensayo_14
		10	6	60%	JONSWAP	Ensayo_15
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_16
			4	60%	JONSWAP	Ensayo_17
		1.1	5	60%	JONSWAP	Ensayo_18
		14	6	60%	JONSWAP	Ensayo_19
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_20
			4	60%	JONSWAP	Ensayo_21
		10	5	60%	JONSWAP	Ensayo_22
	0.00 B.M.	18	6	60%	JONSWAP	Ensayo_23
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_24
		0.00 B.M. 10	4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_25
Core loc			5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_26
			6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_27
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_28
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_29
			5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_30
			6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_31
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_32
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_33
		18	5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_34
			6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_35
			7	65%	Bretschneider- Mitsuvasu	Ensayo_36

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	65%	JONSWAP	Ensayo_37
		4.0	5	65%	JONSWAP	Ensayo_38
		10	6	65%	JONSWAP	Ensayo_39
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_40
			4	65%	JONSWAP	Ensayo_41
		1.1	5	65%	JONSWAP	Ensayo_42
		14	6	65%	JONSWAP	Ensayo_43
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_44
			4	65%	JONSWAP	Ensayo_45
		10	5	65%	JONSWAP	Ensayo_46
	0.00 B.M.	18	6	65%	JONSWAP	Ensayo_47
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_48
		10	4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_49
Core loc			5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_50
Core loc			6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_51
			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_52
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_53
		14	5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_54
		14	6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_55
			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_56
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_57
			5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_58
		10	6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_59
			7	68%	Bretschneider- Mitsuvasu	Ensayo_60

Tabla 3.5c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Coreloc como elementos de coraza.

Tabla 3.5d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Coreloc como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	68%	JONSWAP	Ensayo_61
		10	5	68%	JONSWAP	Ensayo_62
		10	6	68%	JONSWAP	Ensayo_63
	0.00 B.M.		7	68%	JONSWAP	Ensayo_64
Core loc		. 14	4	68%	JONSWAP	Ensayo_65
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_66
			6	68%	JONSWAP	Ensayo_67
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_68
		10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_69
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_70
		10	6	68%	JONSWAP	Ensayo_71
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_72

Tabla 3.6a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Xbloco Bari como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
	0.00 B.M.	10	4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_73
			5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_74
			6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_75
Xbloc o			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_76
Bari		D.M. 14	4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_77
			5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_78
			6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_79
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_80

Tabla 3.6b Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Xblo
o Bari como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_81
		10	5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_82
		10	6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_83
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_84
			4	60%	JONSWAP	Ensayo_85
		10	5	60%	JONSWAP	Ensayo_86
		10	6	60%	JONSWAP	Ensayo_87
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_88
	0.00 B.M.		4	60%	JONSWAP	Ensayo_89
		14	5	60%	JONSWAP	Ensayo_90
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_91
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_92
Xbloc o		18	4	60%	JONSWAP	Ensayo_93
Bari			5	60%	JONSWAP	Ensayo_94
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_95
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_96
		10	4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_97
			5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_98
			6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_99
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_100
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_101
			5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_102
		14	6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_103
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_104

Tabla 3.6c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Xbloco Bari como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_105
		10	5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_106
		10	6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_107
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_108
			4	65%	JONSWAP	Ensayo_109
		40	5	65%	JONSWAP	Ensayo_110
		10	6	65%	JONSWAP	Ensayo_111
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_112
	0.00 B.M.		4	65%	JONSWAP	Ensayo_113
		1.1	5	65%	JONSWAP	Ensayo_114
		14	6	65%	JONSWAP	Ensayo_115
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_116
Xbloc o		18	4	65%	JONSWAP	Ensayo_117
Bari			5	65%	JONSWAP	Ensayo_118
			6	65%	JONSWAP	Ensayo_119
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_120
		10	4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_121
			5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_122
			6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_123
			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_124
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_125
		14	5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_126
		14	6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_127
			7	68%	Bretschneider- Mitsuvasu	Ensayo_128

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_129
		10	5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_130
		18	6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_131
	0.00 B.M.		7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_132
		10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_133
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_134
Xbloc o			6	68%	JONSWAP	Ensayo_135
Bari			7	68%	JONSWAP	Ensayo_136
		14	4	68%	JONSWAP	Ensayo_137
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_138
			6	68%	JONSWAP	Ensayo_139
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_140
		10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_141
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_142
		18	6	68%	JONSWAP	Ensayo_143
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_144

Tabla 3.6d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Xbloco Bari como elementos de coraza.

Tabla 3.7a Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Cuboranurado como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
Cubo ranurado	0.00 B.M.	10	4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_145
			5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_146
			6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_147
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_148

Tabla 3.7b Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Cuboranurado como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_149
			5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_150
		14	6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_151
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_152
			4	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_153
		10	5	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_154
	0.00 B.M.	18	6	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_155
			7	60%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_156
		10	4	60%	JONSWAP	Ensayo_157
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_158
Cuba			6	60%	JONSWAP	Ensayo_159
ranurado			7	60%	JONSWAP	Ensayo_160
		14	4	60%	JONSWAP	Ensayo_161
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_162
			6	60%	JONSWAP	Ensayo_163
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_164
		10	4	60%	JONSWAP	Ensayo_165
			5	60%	JONSWAP	Ensayo_166
		18	6	60%	JONSWAP	Ensayo_167
			7	60%	JONSWAP	Ensayo_168
		10	4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_169
			5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_170
		10	6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_171
			7	65%	Bretschneider- Mitsuvasu	Ensayo_172

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_173
		14	5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_174
		14	6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_175
			7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_176
			4	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_177
		10	5	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_178
		10	6	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_179
	0.00 B.M.		7	65%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_180
		10	4	65%	JONSWAP	Ensayo_181
			5	65%	JONSWAP	Ensayo_182
Cubo			6	65%	JONSWAP	Ensayo_183
ranurado			7	65%	JONSWAP	Ensayo_184
		14	4	65%	JONSWAP	Ensayo_185
			5	65%	JONSWAP	Ensayo_186
			6	65%	JONSWAP	Ensayo_187
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_188
		18	4	65%	JONSWAP	Ensayo_189
			5	65%	JONSWAP	Ensayo_190
			6	65%	JONSWAP	Ensayo_191
			7	65%	JONSWAP	Ensayo_192
		10	4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_193
			5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_194
			6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_195
			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_196

Tabla 3.7c Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Cuboranurado como elementos de coraza.

Tabla 3.7d Programa de ensayos de estabilidad estructural de la sección diseñada con Cuboranurado como elementos de coraza.

Elemento de Coraza	Nivel de referencia	Período en seg. (T)	Altura de ola en m (H)	Porcentaje de vacíos	Tipo de espectro	No. de ensayo
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_197
		11	5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_198
		14	6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_199
			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_200
			4	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_201
	0.00 B.M.	18	5	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_202
			6	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_203
Cubo			7	68%	Bretschneider- Mitsuyasu	Ensayo_204
ranurado		10	4	68%	JONSWAP	Ensayo_205
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_206
			6	68%	JONSWAP	Ensayo_207
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_208
		14	4	68%	JONSWAP	Ensayo_209
			5	68%	JONSWAP	Ensayo_210
			6	68%	JONSWAP	Ensayo_211
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_212
			4	68%	JONSWAP	Ensayo_213
		10	5	68%	JONSWAP	Ensayo_214
		18	6	68%	JONSWAP	Ensayo_215
			7	68%	JONSWAP	Ensayo_216

Cabe mencionar que las alturas y periodos de ola se definieron en base al análisis de parámetros máximos y mínimos permisibles por el equipo generador de oleaje del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, y de igual forma teniendo en cuenta los espectros de energía del oleaje descritos en el capítulo 2 de este estudio, para garantizar una correcta ejecución en tiempo y forma del análisis de las estructuras representativas de rompeolas de enrocamiento (en el núcleo) permeables a talud, objeto de este estudio.

3.5 Desarrollo experimental

Se realizaron los ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de las secciones analizadas, con la finalidad de definir el porcentaje de vacíos mínimo requerido para la construcción de las estructuras de protección costera empleando como elementos de coraza Core loc, Cubo ranurado y Xbloc o Bari, de acuerdo a los programas de ensayos establecidos con anterioridad.

Los ensayos de estabilidad estructural se realizaron en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT a las escalas previamente seleccionadas. Dichos ensayos se realizaron con oleaje irregular con elevación del nivel del mar de +0.00 m. 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 irregular basadas en dos espectros (uno de tipo Bretschneider-Mitsuyasu y el otro de tipo JONSWAP), estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje generado con el espectro de energía pistón, como se indica en la figura 3.7.



Figura 3.7 Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje.

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico en el canal de olas se utilizaron sensores de oleaje generado con el espectro de energía resistivo de ± 5 volts de resolución, colocados uno a una distancia de 1.5 veces la longitud de la ola frente a la estructura y el segundo a 50 cm del primero, esto con objeto de medir la altura de ola incidente tal como se muestra en la figura 3.8.



Figura 3.8 Colocación de los sensores de medición de oleaje para los ensayos en modelo hidráulico en el canal de olas.

3.5.1 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural

Con objeto de determinar la estabilidad de la sección sujeta al oleaje, en el modelo hidráulico se determinaron los daños ocurridos con la siguiente metodología:

- (1) Se representaron en el modelo hidráulico las secciones transversales a ensayar, con las dimensiones, pesos de los elementos y niveles, a la escala de líneas previamente seleccionada para cada una de las secciones analizadas.
- (2) Cada sección transversal es sometida a la acción del oleaje, con alturas de olas que se van incrementando. Posteriormente se va cambiando los porcentajes de vacíos para la construcción de la capa expuesta (Coraza). Cuando la altura de la ola es de un valor determinado, tal que en la estructura se presenta desplazamiento de las piezas de la coraza, entonces decimos que la estructura presenta daño.
- (3) La sección transversal no se reconstruye, entre el cambio de una altura de ola a otra, de tal manera que los daños en la misma se determinan por el número de elementos de la coraza movidos por los oleajes precedentes, tomando en cuenta los nuevos daños ocurridos por la acción

del oleaje del ensayo en cuestión, por un lapso equivalente a 4 horas de prototipo por cada una de las alturas de ola seleccionada.

- (4) El procedimiento descrito anteriormente se repite para diferentes tipos de trenes de oleaje y para cada uno de los porcentajes de vacíos que se van incrementando de manera gradual.
- (5) Para calcular el porcentaje de daños en la sección transversal de la estructura de protección en estudio, el número de bloques dañados únicamente se contabiliza en la región de inspección. El porcentaje de daños de (%) se define mediante la siguiente ecuación:

D = (n/N) * 100 (ecuación 3.9)

Donde, N es el número total de elementos de coraza colocados en la región de inspección, y n es el número de elementos de coraza dañados. Es importante señalar que le porcentaje de daño presentado en las diferentes capas que componen la estructura debe ser menor al permitido (menor al 5%).

A continuación, se describen las diferentes secciones ensayadas, así como los resultados obtenidos de los ensayos de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos con los que fueron diseñadas las secciones previamente seleccionadas, que se llevaron a cabo en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT.

3.5.2 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con elementos Core loc.

En el canal de olas ancho del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT se realizaron los ensayos de estabilidad estructural de la sección transversal diseñada a base de elementos Core loc en la capa expuesta (coraza). Dichos ensayos consistieron en someter la estructura a las mismas condiciones de oleaje, pero aumentando de forma gradual el porcentaje de vacíos de los elementos de coraza que la constituyen durante su proceso constructivo. La escala de líneas empleada para la sección construida a base de elementos Core loc fue de **1:47.4**; las alturas de ola generadas con ambos tipos de espectro (Bretschneider-Mitsuyasu y JONSWAP) fueron de 4 m, 5 m, 6 m y 7 m para cada uno de los periodos establecidos de 10 seg, 14 seg y 18 seg.

Los porcentajes de vacíos analizados fueron 60%, 65% y 68% para cada una de las alturas de ola y periodos indicados. Para realizar el cambio de manera gradual de

los porcentajes de vacíos antes mencionados, durante el proceso constructivo de la sección se le fue quitando una pieza por línea. Para la construcción de la capa coraza de dicha sección se emplearon elementos Core loc de 19 ton. y para las otras capas que la componen se empleó roca de 0.62 ton a 0.93 ton y 0.01 a 0.02 para la capa secundaria y para el núcleo respectivamente.



Figura 3.9 Sección transversal analizada con elementos Core loc en la coraza.

(1) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.






Gráfica 3.2 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.3 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.4 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.8 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.9 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.10 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.11 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.12 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.5 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.6 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.7 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.8 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.13 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.14 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.15 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.16 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.17 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.9 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.10 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.11 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.12 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.18 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.19 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.20 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.21 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.22 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(2) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.13 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.14 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.15 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.16 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.23 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.24 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.25 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.26 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.27 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.17 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.18 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.19 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.20 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.28 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.29 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.30 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.31 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.32 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.21 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.22 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.23 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.24 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.33 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.34 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.35 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.36 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.37 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(3) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.25 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.26 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.27 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.28 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.38 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.39 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.40 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.41 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.42 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.29 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.30 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.31 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.32 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.43 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.44 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.45 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.46 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.47 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.33 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.34 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.35 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.36 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.48 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.49 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.50 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.51 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.52 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.
(4) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.37 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.38 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.39 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.40 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.53 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.54 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.55 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.56 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.57 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.41 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.42 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.43 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.44 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.58 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.59 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.60 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.61 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.62 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.45 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.46 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.47 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.48 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.63 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.64 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.65 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.66 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.67 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(5) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.49 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.50 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.51 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.52 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.68 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.69 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.70 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas



Fotografía 3.71 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.72 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.53 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.54 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.55 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.56 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.73 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.74 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.75 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.76 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.77 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.57 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.58 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.59 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.60 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.78 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.79 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.80 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.81 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.82 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(6) Resultados obtenidos de la sección construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.61 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.62 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.63 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.64 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.83 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.84 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.85 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.86 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.87 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.65 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.66 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.67 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.68 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.88 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.89 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.90 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.91 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.92 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.69 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.70 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.71 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg



Gráfica 3.72 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Core loc con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg



Fotografía 3.93 Estructura a base de elementos Core loc antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.94 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.95 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.96 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.97 Estructura a base de elementos Core loc después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.
3.5.3 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con elementos Xbloc o Bari.

En el canal de olas ancho del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT se realizaron los ensayos de estabilidad estructural de la sección transversal diseñada a base de elementos Xbloc o Bari en la capa expuesta (coraza). Dichos ensayos consistieron en someter la estructura a las mismas condiciones de oleaje, pero aumentando de forma gradual el porcentaje de vacíos de los elementos de coraza que la constituyen durante su proceso constructivo. La escala de líneas empleada para la sección construida a base de elementos Xbloc o Bari fue de 1:65.4; las alturas de ola generadas con ambos tipos de espectro (Bretschneider-Mitsuyasu y JONSWAP) fueron de 4 m, 5 m, 6 m y 7 m para cada uno de los periodos establecidos de 10 seg, 14 seg y 18 seg.

Los porcentajes de vacíos analizados fueron 60%, 65% y 68% para cada una de las alturas de ola y periodos indicados. Para realizar el cambio de manera gradual de los porcentajes de vacíos antes mencionados, durante el proceso constructivo de la sección se le fue quitando una pieza por línea. Para la construcción de la capa coraza de dicha sección se emplearon elementos Xbloc o Bari de 19 ton. y para las otras capas que la componen se empleó roca de 0.62 ton a 0.93 ton y 0.01 a 0.02 para la capa secundaria y para el núcleo respectivamente.



Figura 3.10 Sección transversal analizada con elementos Xbloc o Bari en la coraza.

(1) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.73 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.74 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.75 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.76 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.98 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.99 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.100 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.101 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.102 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.77 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.78 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.79 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.80 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.103 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.104 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.105 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.106 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.107 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.81 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.82 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.83 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.84 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.108 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.109 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.110 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.111 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.112 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(2) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.85 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.







Gráfica 3.87 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.88 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.113 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.114 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.115 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.116 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.117 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.89 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.90 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.91 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.92 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.118 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.119 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.120 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.121 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.122 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.93 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.94 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.95 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.96 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.123 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.124 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.125 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.126 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.127 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(3) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.97 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.







Gráfica 3.99 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.100 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.128 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.129 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.130 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.131 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.132 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.101 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.102 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.103 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.104 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.133 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.134 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.135 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.136 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.137 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.105 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.106 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.107 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.108 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.138 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.139 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.140 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.


Fotografía 3.141 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.142 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(4) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 60% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.109 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.







Gráfica 3.111 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.112 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.143 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.144 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.145 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.146 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.147 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.113 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.114 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.115 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.116 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.148 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.149 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.150 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.151 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.152 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.117 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.118 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.119 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.120 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.153 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.154 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.155 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.156 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.157 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(5) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 65% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.121 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.







Gráfica 3.123 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.124 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.158 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.159 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.160 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.161 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.162 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.125 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.126 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.127 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.128 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.163 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.164 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.165 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.166 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.167 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.129 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.130 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.131 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.132 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.168 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.169 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.170 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.171 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.172 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de elementos Xbloc o Bari construida con un porcentaje de vacíos del 68% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.133 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.







Gráfica 3.135 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.136 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.173 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.174 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.175 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.176 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.177 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.137 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.138 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.139 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.140 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.178 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.179 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.180 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.181 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.182 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.141 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.142 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.143 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.144 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de elementos Xbloc o Bari con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.183 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.184 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.185 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.


Fotografía 3.186 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.187 Estructura a base de elementos Xbloc o Bari después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

3.5.4 Ensayos en modelo hidráulico de estabilidad estructural cambiando de manera gradual los porcentajes de vacíos de la sección construida con Cubo ranurado.

En el canal de olas ancho del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT se realizaron los ensayos de estabilidad estructural de la sección transversal diseñada a base de Cubo ranurado en la capa expuesta (coraza). Dichos ensayos consistieron en someter la estructura a las mismas condiciones de oleaje, pero aumentando de forma gradual el porcentaje de vacíos de los elementos de coraza que la constituyen durante su proceso constructivo. La escala de líneas empleada para la sección construida a base de Cubo ranurado fue de 1:56; las alturas de ola generadas con ambos tipos de espectro (Bretschneider-Mitsuyasu y JONSWAP) fueron de 4 m, 5 m, 6 m y 7 m para cada uno de los periodos establecidos de 10 seg, 14 seg y 18 seg.

Los porcentajes de vacíos analizados fueron 47%, 52% y 57% para cada una de las alturas de ola y periodos indicados. Para realizar el cambio de manera gradual de los porcentajes de vacíos antes mencionados, durante el proceso constructivo de la sección se le fue quitando una pieza por línea. Para la construcción de la capa coraza de dicha sección se emplearon Cubo ranurado de 19 ton. y para las otras capas que la componen se empleó roca de 1.27 ton a 1.90 ton y 0.01 a 0.02 para la capa secundaria y para el núcleo respectivamente.



Figura 3.11 Sección transversal analizada con Cubo ranurado en la coraza.

(1) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.145 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.146 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.147 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.148 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.188 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.189 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.190 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.191 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.192 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.149 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.150 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.151 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.152 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.193 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.194 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.195 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.196 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.197 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.153 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.154 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.155 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.156 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.198 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.199 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.200 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.201 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.202 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(2) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.157 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.158 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.159 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.160 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.203 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.204 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.205 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.206 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.207 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.161 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.162 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.163 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.164 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.208 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.209 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.210 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.211 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.212 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.165 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.166 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.167 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.168 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.213 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.214 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.215 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.216 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.217 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(3) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro Bretschneider-Mitsuyasu.



Gráfica 3.169 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.170 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.171 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.172 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.218 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.219 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.220 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.221 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.222 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.173 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.174 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.175 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.176 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.223 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.224 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.225 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.226 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.227 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.177 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.178 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.179 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.180 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.


Fotografía 3.228 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.229 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.230 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.231 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.232 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(4) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 47% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.181 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.182 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.183 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.184 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.233 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.234 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.235 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.236 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.237 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.185 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.186 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.187 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.188 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.238 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.239 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.240 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.241 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.242 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.189 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.190 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.191 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.192 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.243 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.244 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.245 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.246 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.247 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(5) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 52% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.193 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.194 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.195 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.196 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.248 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.249 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.250 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.251 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.252 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.197 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.198 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.199 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.200 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.253 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.254 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.255 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.256 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.257 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.201 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg



Gráfica 3.202 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg



Gráfica 3.203 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.204 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.



Fotografía 3.258 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.259 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.260 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.261 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.262 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

(6) Resultados obtenidos de la sección a base de Cubo ranurado construida con un porcentaje de vacíos del 57% con espectro JONSWAP.



Gráfica 3.205 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.206 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.207 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 10 seg.



Gráfica 3.208 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 10 seg.



Fotografía 3.263 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 10 seg).



Fotografía 3.264 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.265 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.266 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.267 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 10 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.209 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.210 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.211 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 14 seg.



Gráfica 3.212 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 14 seg.



Fotografía 3.268 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 14 seg).



Fotografía 3.269 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.270 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.271 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.272 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 14 seg) durante 4 horas.



Gráfica 3.213 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 4 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.214 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 5 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.215 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 6 m y periodo de 18 seg.



Gráfica 3.216 Porcentaje de daño obtenido para la coraza a base de Cubo ranurado con una altura de ola de 7 m y periodo de 18 seg.


Fotografía 3.273 Estructura a base de Cubo ranurado antes de ser sometida a la acción del oleaje (T= 18 seg).



Fotografía 3.274 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 4 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.275 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 5 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas



Fotografía 3.276 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 6 m y T= 18 seg) durante 4 horas.



Fotografía 3.277 Estructura a base de Cubo ranurado después de ser sometida a la acción del oleaje (H= 7 m y T= 18 seg) durante 4 horas.

4. Análisis de resultados experimentales

Terminados los 216 ensayos realizados en el canal de olas ancho del laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se agrupan por elemento constituyente de la capa coraza, de los tres analizados en este estudio: Cubo ranurado, Core loc y Xbloc o Bari.

Cubo ranurado

Como se explicó ampliamente en el capítulo anterior, se realizaron 72 ensayos para este elemento (Cubo ranurado tipo Antifer), con alturas de ola de 4 a 7 m. de altura, periodos de 10, 14 y 18 seg., y un nivel de referencia de estado de mar (N. R. 0.00 m.), donde la principal variante en estos ensayos versó en el porcentaje de vacíos (47%, 52% y 57%) que fue calculado y colocado sobre la cara expuesta al mar en la sección de estudio (talud 1.5:1), estos ensayos se realizaron bajo la incidencia de oleaje generado con los espectros de energía Bretschneider y JONSWAP, los resultados se resumen en las siguientes tablas (tabla 4.1 y tabla 4.2)

Tabla 4.1 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas con elementos Cubo ranurado colocados a dos capas sobre la coraza con porcentajes de vacíos de 47%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño		
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP	
		 Periodo [T] (seg) 10 14 18 	4	0	0	
			5	0	0	
			6	0	0	
			7	0	0	
			4	0	0	
Cubo ranurado	47%	14	5	0	0	
		Porosidad ó porcentaje de vacíos Periodo [T] (seg) Altura [H] (m) Altura [H] 10 6 7 6 7 6 7 6 7 4 5 6 7 4 5 6 7 4 5 6 7 4 5 6 7 4 5 6 7 18 6 7	6	0	0.36	
			7	0	0.55	
			0	0		
			5	0	Espectro JONSWAP 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.36 0.55 0 0 0.91 1.09	
			10	6	0	0.91
			7	0	1.09	

Tabla 4.2 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas con elementos Cubo ranurado colocados a dos capas sobre la coraza con porcentajes de vacíos de 52% y 57%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño	
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP
			4	0	0
		10	5 0 6 0 7 0 4 0 5 0 6 0 7 0	0	
		10	6	0	0.19
			7	0	0.77
			4	0	0
	F20/	1.4	5	0	0
	52%	14	6	0	0.57
			7	0	0.96
		4 0	0		
		10	5	0	0
		10	6	0	0.96
Cubo			7	0.57	1.72
ranurado			4	0	0
		10	5	0	0.21
			6	0.41	0.41
			7	1.04	1.24
			4	0	0
	57%	$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	0.41		
	57%		6	0.62	0.62
			7	1.24	1.86
			4	0	0
		19	5	0.83	0.83
		10	6	1.24	1.24
			7	1.66	2.69



Estos resultados se graficaron por variación de porcentaje de vacíos como se muestran a continuación.

Gráfica 4.1 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 47%.

Como se observa en la gráfica 4.1, el daño registrado en la capa de elementos fue incrementado, ya que, con oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider no se presentó daño, bajo ninguna altura ni periodo de ola, mientras que para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se registró daño para alturas de ola de 6 y 7 m. y periodos de 14 y 18 seg.



Gráfica 4.2 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 52%.

En la gráfica 4.2, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider fue de 0.57% registrado bajo la altura de ola de 7 m. y periodo de 18 seg., mientras que, para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño en la capa de elementos fue gradual para alturas de ola de 6 y 7 m. y periodos de 10, 14 y 18 seg.



Gráfica 4.3 Resultados de daño presentado a estructura construida con Cubos ranurados en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 57%.

En la gráfica 4.3, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider fue gradual con altura de ola de 6 y 7 m. con periodo de 10 seg., y para alturas de ola desde los 5 m. para los periodos de 14 y 18 seg.; mientras que, para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño en la capa de elementos ya se presentó para las alturas de ola de 5 a 7 m. y periodos de 10, 14 y 18 seg.

Cabe mencionar que estos daños registrados en la capa de coraza son relativamente bajos, debido a que la cantidad de elementos colocados en total es elevada al ser un arreglo a una capa de coraza a dos elementos sobre el talud, lo

que hubiesen sido mayormente si se hubiera tratado de una sola capa de elementos dando como resultado un mayor porcentaje de daño en la capa de coraza.

Core loc

La sección de rompeolas construida con elementos Core loc, en el canal ancho del Laboratorio de hidráulica Marítima, se analizó bajo una serie de 72 ensayos, con alturas de ola de 4 a 7 m. de altura, periodos de 10, 14 y 18 seg., y un nivel de referencia de estado de mar (N. R. 0.00 m.), donde la principal variante en estos ensayos versó en el porcentaje de vacíos (60%, 65% y 68%) que fue calculado y colocado a una sola capa sobre la cara expuesta al mar en la sección de estudio (talud 1.5:1), estos ensayos se realizaron bajo la incidencia de oleaje generado con los espectros de energía Bretschneider y JONSWAP, los resultados se resumen en las siguientes tablas (ver tabla 4.3 y tabla 4.4).

Tabla 4.3 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas con elementos Core loc colocados a una capa sobre la coraza con porcentajes de vacíos de 60%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño		
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP	
		10	4	0	0	
			5	0	0	
			6	0	0	
			7	0	0	
		10 14 18	4	0	0	
Coroloo	60%		5	0	0	
Core loc			6	0	0	
			7	0	0	
			4	0	0	
			5	0	0	
			10	6	0.74	1.47
			7	2.21	2.21	

Tabla 4.4 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas
con elementos Core loc colocados a una capa sobre la coraza con
porcentajes de vacíos de 65% y 68%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño	
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP
		40	4	0	0
			5	0	0
		10	6	0	0 0 0 0.84 0 0 0.84 1.68 0 0 0.84 5.04 7.56 0 2.78
			7	0	0.84
			4	0	0
	659/	1.4	5	0	0
	65%	14	6	0	0.84
			7	0	1.68
			4	0	0
		10	5	0	0.84
		10	6	3.46	5.04
Coroloo			7	4.2	7.56
			4	0	0
		10	5	0	2.78
		10	6	0	3.7
			7	4.63	6.48
		14	4	0	0
	690/		5	3.7	Espectro JONSWAP 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.84 1.68 0 0.84 5.04 7.56 0 2.78 3.7 6.48 0 5.56 8.33 10.19 0 9.26 11.11 15.94
	68%		6	5.56	8.33
			7	9.26	10.19
			4	0	0
		19	5	7.41	9.26
		10	6	11.11	11.11
			7	12.96	15.94

Estos resultados se graficaron por variación de porcentaje de vacíos como se muestran a continuación.



Gráfica 4.4 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 60%.

En relación a la gráfica 4.4, el daño registrado en la capa de elementos se registró para las alturas de ola de 6 y 7 m., para los periodos de 18 seg., en ambos casos para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider y JONSWAP, teniendo un comportamiento similar en los casos de máximo daño, para un porcentaje de vacíos del 60% en el acomodo de elementos en la coraza.



Gráfica 4.5 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 65%.

En la gráfica 4.5, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider se registró con las alturas de ola de 6 y 7 m. y periodo de 18 seg., mientras que, para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño en la capa de elementos fue gradual para el periodo menor de la serie de 10 seg. y altura de ola máxima de 7m., y para los periodos de 14 y 18 seg. con alturas de 6 y 7.

Gráfica 4.6 Resultados de daño presentado a estructura construida con Core loc en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 68%.

En la gráfica 4.6, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider fue para el periodo menor de la serie el cual es de 10 seg. con una altura de ola máxima de 7 m., y para los dos periodos más altos de 14 y 18 seg. se registró desde la altura de ola de 5 m. hasta legar a 7 m.; por lo que respecta al oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño se fue incrementando gradualmente para los tres periodos de 10, 14 y 18 seg. con las alturas de ola de 5 a 7 m.

• Xbloc o Bari

La sección de rompeolas construida en el canal ancho del Laboratorio de hidráulica Marítima con elementos Xbloc o bari, al igual que las dos secciones previamente analizadas, también se analizó bajo una serie de 72 ensayos, con alturas de ola de 4 a 7 m. de altura, periodos de 10, 14 y 18 seg., y un nivel de referencia de estado de mar (N. R. 0.00 m.), y que, al igual que la sección analizada con el elementos de coraza Core loc, también en esta el porcentaje de vacíos fue de (60%, 65% y 68%) a una sola capa sobre la cara expuesta al mar (talud 1.5:1) debido a la similitud de comportamiento de estos dos elementos bajo la acción del oleaje; estos ensayos se realizaron bajo la incidencia de oleaje generado con los espectros de energía Bretschneider y JONSWAP, los resultados se resumen en las siguientes tablas (ver tabla 4.5 y tabla 4.6).

Tabla 4.5 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas
con elementos Xbloc o Bari colocados a una capa sobre la coraza con
porcentajes de vacíos de 60%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño		
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP	
		 Periodo [T] (seg) 10 14 18 	4	0	0	
			5	0	0	
			6	0	0	
			7	0	0	
			4	0	0	
Xbloc o	60%	14	5	0	0	
Bari		⁵ Periodo [T] (seg) 10 14 18	6	0	0	
			7	0.78	0	
			4	0	0	
			5	0	0	
			10	6	0	0
			7	1.17	3.13	

Tabla 4.6 Tabla de resultados de análisis de estabilidad estructural a sección de rompeolas con elementos Xbloc o Bari colocados a una capa sobre la coraza con porcentajes de vacíos de 65% y 68%.

Elemento	Porosidad ó porcentaje de vacíos	Periodo [T] (seg)	Altura [H] (m)	% de daño	
				Espectro Bretschneider- Mitsuyasu	Espectro JONSWAP
			4	0	0
		10	5	0	año Espectro JONSWAP 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
		10	6	0	0
			7	1.34	0.89
			4	0	0
	659/		5	0	0
	00%	14	6	0.89	0
			7	1.34	0.89
			4	0	0
		10	5	0	0
		10	6	1.34	1.34
Xbloc o		7	7	1.79	3.57
Bari			4	0	0
		10	5	0	0
		10	6	1.92	2.88
			7	2.88	3.85
			4	0	0
	699/	$ \begin{array}{c cccc} (seg) & (m) & Bretschm \\ \hline ho & 10 \\ \hline 10 \\ 10 \\ \hline 10 \\ \hline 5 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 11 \\ \hline 10 \\ \hline 12 \\ \hline 11 \\ \hline 11 \\ \hline 12 \\ \hline 12 \\ \hline 12 \\ \hline 13 \\ \hline 14 \\ \hline 14 \\ \hline 14 \\ \hline 14 \\ \hline 10 \\ \hline 11 \\$	0.96	0.96	
	00%		6	2.4	daño Espectro JONSWAP 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
			7	3.37	4.81
			4	0	0 0 0.89 0 0 1.34 3.57 0 0 2.88 3.85 0 0 2.88 3.85 0 0 0.96 3.37 4.81 0 2.88 4.33 10.58
		18	5	0.96	
		10	6	3.37	4.33
			7	9.13	10.58

Estos resultados se graficaron por variación de porcentaje de vacíos como se muestran a continuación.

Gráfica 4.7 Resultados de daño presentado a estructura construida con Xbloc o Bari en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 60%.

En relación a la gráfica 4.7, el daño registrado en la capa de elementos se registró para las alturas de ola de 7 m., y periodos de 14 y 18 seg., para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider y para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP, solo se registró daño con el periodo de 18 seg. y altura de ola de 7 m., lo anterior descrito para un porcentaje de vacíos del 60% en el acomodo de elementos en la coraza.

Gráfica 4.8 Resultados de daño presentado a estructura construida con Xbloc o Bari en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 65%.

En la gráfica 4.8, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider se registró, en un inicio, para la altura de ola de 7 m. y periodo de 10 seg., y con los periodos de 14 y 18 seg. desde la altura de ola de 6 m. al igual que de 7 m.; para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño en la capa de elementos fue muy similar que el primer tipo de oleaje descrito, salvo en la magnitud de daño máximo, el cual se duplicó para este espectro.

Gráfica 4.9 Resultados de daño presentado a estructura construida con Xbloc o Bari en la capa coraza con un porcentaje de vacíos del 68%.

En la gráfica 4.9, se observa que el daño registrado en la capa de elementos bajo oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider fue para el periodo menor de la serie el cual es de 10 seg. con las dos alturas de ola de mayor valor de 6 y 7 m., y para los dos periodos restantes de 14 y 18 seg. se registró desde la altura de ola de 5 m. hasta legar a 7 m.; por lo que respecta al oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observa que el daño en la capa de elementos fue muy similar que el primer tipo de oleaje descrito, en cuanto a la presencia de daño por alturas de ola y periodos, no así en la estima del daño como tal, ya que los valores en porcentaje de daño son mayores para este espectro de oleaje en comparación con el primer descrito en este mismo párrafo.

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

5. Conclusiones y Recomendaciones

Como resultado del presente estudio, y en base a los resultados obtenidos de las modelaciones resumidas y descritas en el capítulo anterior, se emiten las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES:

- I. Sección de rompeolas con elementos de coraza Cubo ranurado
- Sección construida con porcentaje de vacíos del 47% en la capa de coraza.

Para esta condición inicial en el acomodo de las piezas de coraza, se observó que la estructura fue totalmente estable para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider con las alturas de ola de 4 a 7 m. y periodos de 10, 14 y 18 seg.; lo que no resultó de la misma manera para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP, en el cual si se presentó un daño máximo de 1.09% para el periodo de ola de 18 seg. y altura de ola de 7 m., tal resultado es admisible dentro de los parámetros de daño a una estructura (5% de daño como máximo).

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 52% en la capa de coraza.

Para el incremento en la porosidad de la capa coraza, al quitar una pieza de elemento por fila hasta alcanzar un porcentaje de vacíos del 52% en la capa coraza, se observó que para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider solo se presentó daño de 0.57% para el periodo de 18 seg. y altura de ola de 7m.; y para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se observó que el daño se presentó desde el menor de los tres periodos de oleaje analizados, en este caso el de 10 seg. con una altura de ola de 7 m. con un valor de 0.57%, incrementándose para los periodos de 14 y 18 seg. con alturas de ola de 6 y 7 m. con un valor máximo de daño del 1.72% lo que aún sigue siendo permisible en cuanto al parámetro de daño que es del 5%.

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 57% en la capa de coraza.

Del comportamiento de los ensayos de estabilidad estructural para la sección construida con elementos de coraza Cubos ranurados con un 57% de vacíos, se determinó que fue la más inestable de las tres condiciones de secciones verificadas con variación de porosidad en la coraza, lo que para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider, se observó que el daño se presentó desde el ensayo con altura de ola de 6 m. y periodo de 10 seg. con un valor de 0.41%, presentándose para los ensayos con periodo 14 y 18 seg. y altura de ola de 5 m., hasta llegar a la altura máxima verificada de 7 m. con un valor de 1.66%; en cambio, para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP, el daño se presentó a partir de la altura de 5 m. para los tres periodos de 10, 14 y 18 seg. con un valor máximo para la altura de ola de 7 m. y periodo de 18 seg. de 2.69%.

• Conclusiones del análisis de las tres secciones construidas con Cubo ranurado

De acuerdo a los tres resultados de la sección de rompeolas construidas con enrocamiento en las capas inferiores a la coraza (núcleo y secundaria), y con elementos Cubo ranurado en la capa de revestimiento exterior, como se describió en el capítulo 3 de este estudio, al partir de la forma de construir la primer estructura representativa con los estándares determinados en el estado del arte (descritos en el capítulo 1 de este estudio), con el porcentaje de vacíos del 47%, se verificó el adecuado comportamiento de la estructura, lo que fue en decremento con el aumento de los vacíos en la capa de revestimiento (coraza), para en segunda instancia con el 52% de porosidad y en tercera con un 57%. No obstante que la última sección fue la más desfavorable en cuanto a los resultados de estabilidad estructural con un daño de 2.69% lo que no sobrepasa el máximo establecido del 5%, se considera estable (estructuralmente).

II. Sección de rompeolas con elementos de coraza Core loc

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 60% en la capa de coraza.

La primera sección construida con elementos Core loc en la coraza con un porcentaje de vacíos del 60% (de acuerdo a las recomendaciones del Shore Protection Manual), se observó que para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider el daño presentado en la capa coraza no fue mayor del 2.21%, este resultado se obtuvo con la altura de ola de 7 m. y periodo de 18 seg., caso similar para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP. No observando daño en la mayoría de las condiciones de ensayos para esta sección de rompeolas (alturas de ola de 4, 5 m. y periodos de 10 y 14 seg.).

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 65% en la capa de coraza.

Con la disminución de elementos en la capa de coraza (una pieza menos por línea) para obtener un 5% más en el porcentaje de vacíos, en comparación de la anterior sección de rompeolas analizada, se observó que para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider el daño presentado fue para alturas de ola de 6 y 7 m. con el periodo de 18 seg. con un valor de 3.46 y 4.2%; y para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP se presentaron daños a partir del periodo de 10 seg. con altura de ola de 7 m. con un valor de 0.84%, para el periodo de 14 seg. y alturas de ola de 6 y 7m. con valores de 0.84 y 1.68% respectivamente, y para el periodo de 18 seg. con alturas de ola de 5, 6 y 7 m. con valores de 0.84, 5.04 y 7.56%; lo que define que, esta estructura con este porcentaje de vacíos en la coraza (65%) se considera estable para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider para los tres periodos y cuatro alturas de ola analizados en este estudio (va que no sobrepasa el valor máximo aceptado del 5% de daño), lo que no sucede para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP a partir del periodo de oleaje de 18 seg. y alturas de ola de 6 y 7 m. que sobrepasan el parámetro permisible de estabilidad establecido en el estado del arte.

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 68% en la capa de coraza.

De acuerdo al cálculo del porcentaje de vacíos para esta sección y su construcción substrayendo un elemento más por línea de los elementos colocados sobre el talud de la sección de rompeolas, hasta alcanzar la porosidad de 68%, se observó que para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider, el daño presentado como mínimo fue de 4.63% para el periodo de 10 seg. y altura de ola de 7 m. (único valor obtenido menor al parámetro permisible de 5%), ya que para los periodos de 14 y 18 seg. y las alturas de ola de 5 a 7 m. sobrepasan el parámetro permisible de daño, teniendo como máximo daño 12.62% para el periodo y altura de mayor valor ensayados en este estudio; estos resultados son similares para los resultados con el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP, ya que salvo los valores de 2.78 y 3.7% de daño observados con el periodo de 10 seg. y alturas de ola de 5 y 6 m. respectivamente, que no sobrepasan el parámetro de daño máximo aceptable en una estructura (5%), los restantes valores si sobrepasan este parámetro, para los periodos de 14 y 18 seg. y alturas de 5 a 7 m. con un valor de daño máximo registrado de 15.94%; lo anterior define prácticamente esta estructura como inestable al presentarse periodos de ola de 10 a 18 seg. con alturas de 5 a 7 m.

• Conclusiones del análisis de las tres secciones construidas con Core loc

Al comparar los resultados obtenidos con los tres análisis de estabilidad estructural (con variación en el porcentaje de vacíos de 60, 65 y 68%) se concluye que solo la primera parte de este análisis (estructura con porcentaje de vacíos del 60% en la coraza) es estable, tal y como lo establece el estado del arte referente a la construcción de rompeolas con Core loc; lo que en la segunda sección analizada en este estudio (estructura con porcentaje de vacíos del 65% en la coraza) no sucede en su totalidad del análisis de los periodos y alturas de ola, ya que como se definió en su momento, solo para el oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider se considera estable, al ser este tipo de oleaje reproducido por un espectro (ver capítulo 2 de este estudio) que no contiene una sobreacumulación de energía de oleaje, y para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP solo se considera estable para periodos de 10 y 14 seg con alturas de ola de 4 a 7 m., lo que no sucede con el periodo de 18 seg. y alturas de ola de 6 y 7 m. Para la tercera estructura analizada con un incremento del 3% de vacíos (68% de vacíos en total), en comparación con la segunda de este análisis, es prácticamente inestable para los tres periodos y tres de las cuatro alturas de ola ensayadas en este estudio con un daño máximo registrado del 15.94%.

III. Sección de rompeolas con elementos de coraza Xbloc

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 60% en la capa de coraza.

Con la primera sección de rompeolas construida con elementos Xbloc en la coraza con porcentaje de vacíos de acuerdo a lo recomendado en el estado del arte (60%) y establecida como punto de partida, se verificó que es totalmente estable, ya que de acuerdo a lo descrito en el capítulo 4, se observó para ambo tipos de oleaje generados con los espectros de energía (Bretschneider y JONSWAP) analizados en este estudio, el daño no fue mayor al 3.13% para oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP y de 1.17% para oleaje generado con el espectro de energía Bretschneider, ambos resultados para el periodo de 18 seg. con altura de ola de 7 m.

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 65% en la capa de coraza.

Al aumentar el porcentaje de vacíos en esta segunda sección analizada con la construcción de la coraza con Xbloc, se comportó estable bajo las dos condiciones de oleaje de análisis (generados con el espectro de energía Bretschneider y JONSWAP) ya que para el primer tipo de oleaje se obtuvo un daño máximo de

1.17%, y para el oleaje generado con el espectro de energía JONSWAP un daño de 3.13% como máximo, ambos para el periodo de 18 seg. y altura de ola de 7 m., lo que hace a esta estructura como estable para condiciones de oleaje con periodos de 10, 14 y 18 seg. y alturas de 4 a 7 m. de altura.

• Sección construida con porcentaje de vacíos del 68% en la capa de coraza.

Con el incremento en los vacíos al momento de construir esta sección en su capa coraza y tener una porosidad del 68%, esta sección de rompeolas resulta estable con el oleaje analizado (generado con los espectros de energía Bretschneider y JONSWAP) con periodos de ola de 10, 14 y 18 seg. y alturas de ola de 4 a 6 m., no así para el periodo de 18 seg. y altura de 7 m. (mayor analizada en la serie de ensayos de este estudio) donde se presentó daño para el primer tipo de oleaje de 9.13% y para el segundo de 10.58%. Lo que puede definir que esta estructura representativa de rompeolas construidos con este elemento de protección de la coraza (Xbloc), resulta lo suficiente estable para soportar oleajes donde el periodo de ola no sobrepase los 18 seg.

• Conclusiones del análisis de las tres secciones construidas con Xbloc

Con base en los resultados de los tres análisis de las estructuras construidas con elemento Xbloc en la coraza con una pendiente de 1.5:1, las dos primeras secciones representativas de rompeolas resultan estables y con daño máximo registrado que no sobrepasa el valor permisible del 5% estructuralmente hablando, y como se definió en el punto anterior, la tercera estructura analizada con porcentaje de vacíos de 68% en la capa de coraza, también resulta en la mayoría de ensayos estable, salvo para la altura de ola de 7 m. con periodo de 18 seg. donde para ambos tipos de oleaje presenta daño mayor al permisible de 10.58%.

IV. Comparación de los resultados de estabilidad estructural con las Tres Secciones de rompeolas con elementos de coraza Cubo ranurado, Core loc y Xbloc

Del análisis realizado a cada una de las tres secciones de rompeolas construidos en el canal angosto del laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT, se observó que la sección construida con un porcentaje de vacíos de 68% con elementos de coraza Core loc y Xbloc es la menos estable.

Para la sección construida con elementos Cubo ranurado en la capa de coraza del rómpelas, resultó la más estable del análisis de estabilidad estructural.

Cabe señalar que las modelaciones fueron realizadas a secciones de rompeolas en condiciones de oleaje incidente en forma perpendicular a la sección, con una pendiente de fondo de 0.031 y talud de 1.5:1.

Los resultados obtenidos en este estudio sirven como un marco comparativo para los casos de análisis de estructuras de protección portuaria y costera que contengan similitud con los establecidos en este estudio, sin que sean limitantes para realizar nuevos estudios de la misma índole y verificar comportamientos estructurales en particular que se presenten en un futuro.

RECOMENDACIONES:

Con los resultados de los análisis de estabilidad estructural realizado a las secciones propuestas para este estudio, que fueron a una sola pendiente (1.5:1), debido a que dos (Core loc y Xbloc) de los tres elementos considerados en este análisis, y al margen de disponibilidad de tiempo para concluir este proyecto, se recomienda, en caso de ser necesario, realizar dentro de cualquier otro estudio, un análisis con pendiente distinta en la sección de rompeolas, de acuerdo al proyecto que lo requiera en turno, que permita verificar en tiempo y forma el comportamiento que pueda tener la estructura en cuestión.

Se recomienda de igual forma, que para cada caso en particular, verificar el comportamiento de cada estructura con sus variables particulares distintas a las abordadas en este estudio (pendiente de fondo, pendiente de la estructura, variantes oceanográficas: altura, periodo y dirección del oleaje), además del análisis aquí planteado (bidimensional), realizar de forma complementaria el proyecto de estabilidad tridimensional, donde el oleaje, que es la principal variante en este tipo de estudios, incida de forma oblicua a la estructura para verificar en un rango más amplio el comportamiento de estabilidad de la obra de protección.

Debido a que los rompeolas son de relevante importancia en el funcionamiento de un sistema portuario, y derivado de esta premisa, los elementos que constituyen su capa coraza tienen un papel preponderante en el comportamiento de la estructura, se recomienda ampliamente que en la construcción del rompeolas la supervisión verifique la colocación y el porcentaje de vacíos del elemento integrante de la última capa de acuerdo a lo establecido en el estado del arte, ya que esta relación es importante para el correcto y adecuado funcionamiento y durabilidad de la obra de protección.

Bibliografía

Aranda, J. (2004). *Automation for the Maritime Industries*. Madrid, España: Departamento de Informática y Automática UNED. pp 105-107. Consultado en <u>https://digital.csic.es/bitstream/10261/2906/1/Maritime_Industries.pdf</u>

Bakker, P. (2003). *Development of concrete breakwater armour units*. The Netherlands: Delta Marine Consultants b.v. Gouda. P. 3. Consultado en <u>https://www.researchgate.net/publication/268399601_Development_of_concrete_b</u> <u>reakwater_armour_units</u>

Bakker, P. (2003). *GUIDELINES FOR XBLOC CONCEPT DESIGN*. The Netherlands: Delta Marine Consultants b.v. Gouda. pp. 16, 17. Consultado en <u>https://www.dmc.nl/sites/default/files/domain-701/xbloc-guidelines_2018-671-1532949730287638300-701-153537962374766937.pdf</u>

Bakker, P. (2004). *Introduction of the Xbloc Breakwater Armour Unit*. The Netherlands Delta Marine Consultants b.v. Gouda. pp. 2-7. Consultado en <u>https://www.researchgate.net/publication/275960538_Introduction_of_the_Xbloc_B</u> <u>reakwater_Armour_Unit</u>

Campos, A. (2020). *Damage in Rubble Mound Breakwaters. Part I: Historical Review of Damage Models.* Universidad Politécnica de Madrid (UPM): Marine Science and Engineering. pp. 1-6. Consultado en <u>https://www.mdpi.com > pdf</u>

CORPS OF ENGINEERS, U.S. ARMY (1953). *Stability of rubble-mound breakwaters*. Vicksburg, Mississippi, U.S.: hydraulic model investigation. pp. 10 Consultado en

https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/1703/

D'Angremond, K. (2004). *Breakwaters and Closure Dams.* London, UK.: Spon Press. pp. 16-37. Consultado en <u>https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9fdac7ea-bd42-49a7-8078-</u> <u>cbc9af9e35e6</u>

Gracia, V. (s.f.). *Caracterización del Oleaje. Tema 2. Ingeniería Marítima*. Consultado en <u>https://docplayer.es/18498203-Tema-2-caracterizacion-del-oleaje.html</u>

Jiménez, C. (2010). *Criterios de diseño de rompeolas de berma, bajo el concepto de oleaje irregular.* Cdmx, México: Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional. pp. 54-60. Consultado en

Investigación experimental del porcentaje de vacíos de elementos de la capa coraza de los rompeolas

https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10664/167.pdf?sequence=1&isAll owed=y

Melby, J. (1997). *CORE-LOC Concrete Armor Units*. Vicksburg, MS USA.: Technical Report CHL-97-4. U. S. Army Corps of Engineers. pp. 15, 35. Consultado en <u>https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA327318.pdf</u>

Pilotzi, J. (2018). Nuevo puerto de Veracruz, a punto de iniciar operaciones. Consultado en <u>https://pilotzinoticias.com/2018/11/entregan-primera-etapa-del-nuevo-puerto-de-veracruz/</u>

U. S. Army Corps of Engineers, (1984). *Shore Protection Manual. Vol. 1.* Palm City, FL. U.S.A.: Coastal Engineering Research Center. pp. 197,200.

U. S. Army Corps of Engineers, (1984). *Shore Protection Manual. Vol. 2.* Palm City, FL. U.S.A.: Coastal Engineering Research Center. pp. 330, 358.

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/