



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE
SOCAVACIÓN POR OLEAJE
EN MUROS VERTICALES**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Daniel Alejandro Santana González

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin



Ciudad Universitaria, abril 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Señor
DANIEL ALEJANDRO SANTANA GONZÁLEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SOCAVACIÓN POR OLEAJE EN MUROS VERTICALES"

- INTRODUCCIÓN
- I. PROTECCIÓN DE LA COSTA
- II. GENERALIDADES SOBRE LA SOCAVACIÓN EN ZONA COSTERA
- III. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS
- IV. RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 6 de agosto del 2015.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

RESUMEN

Los muros verticales son, posiblemente, la estructura de protección de la costa más común, estas obras se construyen para proteger la zona seca de la playa y prevenir inundaciones. Sin embargo, debido a la incidencia del oleaje y a que los muros suelen colocarse en sitios con suelos arenosos, frecuentemente se presenta erosión al pie de la estructura. Si esta pérdida de sustento se sale de control, ocurre la falla del muro y la pérdida de la protección que ofrecía en su estado inicial. Debido a esto, es necesario comprender el mecanismo que conduce a la pérdida del sedimento en la base del muro (socavación), para prevenir la falla por socavación y alargar la vida útil tanto en términos operativos como estructurales.

En este estudio se presentan los resultados de una investigación experimental desarrollada en el laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, enfocada en comprender el fenómeno de la socavación en la base de un muro vertical. Se llevaron a cabo un total de 234 pruebas en un canal de oleaje donde se colocó un modelo bidimensional de pequeña escala. La finalidad del estudio fue evaluar la respuesta de un sistema muro-suelo granular a la incidencia de una ola enfocada que rompe por fondo antes de llegar al muro. Se analizó el efecto empleando 3 diferentes materiales (arena y dos gravillas con diferentes tamaños de partícula). El programa experimental contempló diferentes pendientes de la rampa, profundidad de agua, y espectro de energía empleado. El resultado más relevante de este trabajo es un modelo empírico para predecir la profundidad de la socavación como función de la altura de ola máxima al pie de la rampa.

ABSTRACT

Vertical seawalls are fairly a common structure, constructed in coastal areas to protect land in the lee side and prevent flooding. However, due to the impact of waves, scour frequently occurs at the toe of the structure, leading in the failure of the seawall or totally collapse, and the loss of protection offered. Because of this, it is necessary to understand the mechanism that leads to loss of sediment at the toe of the seawall (scour), to prevent failure by undermining and extend the life in operational terms as structural.

This study is aimed to present the results of an experimental research conducted in the Coasts and Ports Laboratory at the Engineering Institute, UNAM, to understand the phenomenon of scour at the toe of a vertical seawall. A total of 234 tests were performed in a wave flume that were conducted at a two-dimensional model on small scale. The purpose of the study was to evaluate the incidence of a focused wave group, steeped by an artificial slope that breaks on the seawall or as close as possible causing erosion at the toe of the structure. Three different materials (sand and two gravels sizes) were analyzed. The experimental program included different beach slopes, water depths and energy spectra. The most important result of this work is an empirical model to predict scour depth as a function of maximum wave height at the toe of the slope.

CONTENIDO

| | |
|--|-------------|
| RESUMEN..... | III |
| ABSTRACT | III |
| CONTENIDO | IV |
| ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS | VI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VIII |
| GLOSARIO..... | IX |
| INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| MOTIVACIÓN | 11 |
| OBJETIVOS..... | 12 |
| ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO..... | 12 |
| PROTECCIÓN DE LA COSTA | 13 |
| 1.1 ¿POR QUÉ SE EROSIONAN LAS COSTAS? | 13 |
| 1.1.1 TIPOS DE EROSIÓN | 14 |
| 1.1.2 CAUSAS DE LA EROSIÓN | 15 |
| 1.1.3 PROBLEMAS DEBIDO A LA PÉRDIDA DE PLAYAS | 17 |
| 1.2 ¿CÓMO SE PROTEGEN LAS COSTAS? | 17 |
| 1.2.1 PRACTICAS DE PROTECCIÓN NATURALES..... | 17 |
| 1.2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA..... | 18 |
| 1.3 MUROS VERTICALES | 21 |
| 1.3.1 DISEÑO DE MUROS..... | 24 |
| GENERALIDADES SOBRE LA SOCAVACIÓN EN ZONAS COSTERAS | 29 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN..... | 29 |
| 2.2 SOCAVACIÓN EN AMBIENTE MARINO | 29 |
| 2.3 SOCAVACIÓN FRENTE A MUROS VERTICALES..... | 30 |
| 2.3.1 SOCAVACIÓN OCASIONADA POR OLAS QUE ROMPEN | 30 |
| 2.3.2 ESTADO DEL ARTE | 33 |

| | |
|--|-----------|
| DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS | 42 |
| 3.1 ARREGLO EXPERIMENTAL | 42 |
| 3.1.1 CANAL DE OLEAJE | 42 |
| 3.1.2 INSTRUMENTACIÓN..... | 43 |
| 3.1.3 SISTEMA DE MEDICIÓN: imc SPARTAN..... | 47 |
| 3.2 GRADOS DE LIBERTAD..... | 48 |
| 3.2.1 ESPECTRO EMPLEADO | 48 |
| 3.2.2 MATERIAL GRANULAR..... | 51 |
| 3.2.3 ALTURA DE LA ESTRUCTURA Y TIRANTE DE AGUA SOBRE LA ESTRUCTURA..... | 51 |
| 3.2.4 PENDIENTE | 52 |
| 3.2.5 CONDICIONES CONSTANTES DURANTE LAS PRUEBAS..... | 52 |
| 3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 54 |
| 3.3.1 PROCEDIMIENTO | 54 |
| 3.3.2 DIAGRAMA DE FLUJO | 56 |
| RESULTADOS | 57 |
| 4.1 ENSAYOS CON ESPECTRO JONSWAP | 57 |
| 4.1.1 ESPECTRO Y ONDA ENFOCADA | 57 |
| 4.1.2 RELACIÓN ENTRE S Y HMAX | 58 |
| 4.1.3 INFLUENCIA DE LA PENDIENTE | 60 |
| 4.1.4 SOCAVACIÓN Y TIPO DE MATERIAL | 61 |
| 4.1.5 RELACIÓN ENTRE LA SOCAVACIÓN Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS | 61 |
| 4.1.6 NÚMERO DE IRIBARREN | 65 |
| 4.2 ENSAYOS DEL ESPECTRO TOP-HAT | 66 |
| 4.2.1 ESPECTRO Y ONDA ENFOCADA | 66 |
| 4.2.2 RELACIÓN ENTRE S Y HMAX | 68 |
| 4.2.3 INFLUENCIA DE LA PENDIENTE Y TIPO DE MATERIAL | 68 |
| 4.2.4 RELACIÓN ENTRE LA SOCAVACIÓN Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS | 69 |
| 4.2.5 NÚMERO DE IRIBARREN | 72 |
| CONCLUSIONES | 73 |
| REFERENCIAS | 75 |
| ANEXO A | 77 |
| ANEXO B | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1 Dren de playa..... | 19 |
| Figura 1. 2 Relleno artificial de playa..... | 19 |
| Figura 1. 3 Rompeolas flotante | 20 |
| Figura 1. 4 Espigón de escollera | 20 |
| Figura 1. 5 Espigones | 20 |
| Figura 1. 6 Rompeolas no ligado a la playa | 20 |
| Figura 1. 7 Dique..... | 21 |
| Figura 1. 8 Muro vertical | 21 |
| Figura 1. 9 Muro Escalonado | 22 |
| Figura 1. 10 Muro con cara frontal curva | 22 |
| Figura 1. 11 Muro Vertical..... | 22 |
| Figura 1. 12 Ejemplo de falla de un muro vertical..... | 23 |
| Figura 1. 13 Mampara | 24 |
| Figura 1. 14 Ascenso máximo y Descenso mínimo..... | 24 |
| Figura 1. 15 Configuración de muro | 25 |
| Figura 1. 16 Análisis Mecánico | 26 |
| Figura 1. 17 Tipos de cimentación para muros | 26 |
| Figura 1. 18 Ascenso Máximo..... | 27 |
| Figura 1. 19 Tipos de protección contra la socavación..... | 27 |
| | |
| Figura 2. 1 Tipo de rotura de ola | 31 |
| Figura 2. 2 Parámetro Xs de Jones..... | 34 |
| Figura 2. 3 Relación entre la profundidad de socavación, altura de ola y distancia relativa al muro (SCHILLER) .. | 35 |
| Figura 2. 4 Configuración del experimento de FOWLER 1992..... | 38 |
| Figura 2. 5 Profundidad de socavación relativa máxima contra profundidad relativa frente a muro | 39 |
| Figura 2. 6 Predicción de la profundidad de socavación frente a muro POWELL | 40 |
| | |
| Figura 3. 1 Canal de oleaje | 42 |
| Figura 3. 2 Pala generadora de tipo pistón..... | 42 |
| Figura 3. 3 Esquema de la prueba | 43 |
| Figura 3. 4 Terminal para los sensores de nivel..... | 44 |
| Figura 3. 5 Sensor de nivel..... | 44 |
| Figura 3. 6 Distribución de los sensores | 44 |
| Figura 3. 7 Vectrino- II | 45 |
| Figura 3. 8 Perfil de Velocidad | 45 |
| Figura 3. 9 Configuración de la sonda | 45 |
| Figura 3. 10 Sistema SPARTAN | 47 |
| Figura 3. 11 Espectro JONSWAP | 49 |
| Figura 3. 12 Espectro Top-Hat | 50 |

| | |
|--|--------------------------------------|
| Figura 3. 13 Tamaño de partícula del material..... | 51 |
| Figura 3. 14 Esquema de altura de estructura, tirante de agua y pendiente | 52 |
| Figura 3. 15 Ancho de Berma | 53 |
| Figura 3. 16 Ubicación de sensores de nivel sobre la rampa..... | 53 |
| Figura 3. 17 Instrumento de medición de la socavación | 54 |
| | |
| Figura 4. 1 Perfil de Superficie libre del agua (H_{MAX}) para espectro Jonswap | 57 |
| Figura 4. 2 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Jonswap)..... | 58 |
| Figura 4. 3 Relación entre Altura de ola máxima y Socavación para talud 1:2.0..... | 59 |
| Figura 4. 4 Relación entre Altura de ola máxima y Socavación para talud 1:2.5..... | 60 |
| Figura 4. 5 Relación entre Altura de ola máxima y Socavación para talud 1:3.0..... | 60 |
| Figura 4. 6 Esquema de agrupación de los ensayos para espectro Jonswap y todas las pendientes..... | 61 |
| Figura 4. 7 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos para espectro Jonswap..... | 62 |
| Figura 4. 8 Regresión lineal para arena y pendiente específica (Jonswap) | 63 |
| Figura 4. 9 Representación del modelo de predicción de la socavación para cada material (Jonswap)..... | 64 |
| Figura 4. 10 Rotura de ola sobre la berma en forma de voluta para espectro Jonswap | 65 |
| Figura 4. 11 Socavación relativa contra Número de Iribarren para espectro Jonswap..... | 66 |
| Figura 4. 12 Perfil de Superficie libre del agua (H_{MAX}) Espectro Top-Hat | 67 |
| Figura 4. 13 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Top-Hat) | 67 |
| Figura 4. 14 Altura de ola máxima contra Socavación para espectro Top-Hat | 68 |
| Figura 4. 15 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos (Top-Hat)..... | 70 |
| Figura 4. 16 Análisis de regresión cuadrática para arena y pendiente específica (Top-Hat)..... | 71 |
| Figura 4. 17 Representación del modelo de predicción de la socavación para espectro Top-Hat..... | 72 |
| Figura 4. 18 Socavación relativa contra Número de Iribarren para espectro Top-Hat..... | 72 |
| | |
| Tabla 1. 1 Estructuras de protección a instalaciones costeras | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 1. 2 Estructuras para estabilizar playa | ¡Error! Marcador no definido. |
| Tabla 1. 3 Estructuras de acorazamiento costero | ¡Error! Marcador no definido. |
| | |
| Tabla 3. 1 Coordenadas de posición de los sensores de nivel..... | 45 |
| Tabla 3. 2 Propiedades del Material..... | 51 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------|---|
| ϕ | Coefficiente de fricción interna del material |
| α | Angulo de inclinación del talud |
| C_D | Coefficiente de arrastre |
| ρ | Densidad del fluido |
| d | Tirante de agua al pie de la estructura |
| d_{50} | Tamaño de partícula |
| f_p | Frecuencia de pico espectral $f_p = \frac{1}{T_p}$ |
| γ | Parámetro de forma 1 a 7, 3.3 default |
| g | Aceleración debida a la gravedad terrestre |
| h | Tirante de agua del canal |
| H | Altura de ola en aguas profundas |
| H_b | Altura de ola de ruptura |
| H_0 | Altura de ola Incidente |
| H_r | Altura de ola reflejada |
| H_s | Altura de ola significativa |
| H_R | Altura de la estructura |
| ξ | Número de Iribarren |
| L | Longitud de onda en aguas profundas |
| L_0 | Longitud de onda incidente |
| σ | 0.07 para $f < f_p$; 0.09 para $f > f_p$ |
| s | Peso específico del sedimento |
| S | Profundidad de socavación |
| T | Periodo de onda |
| u_r | Velocidad de onda paralela al fondo |
| U_{fm} | Valor máximo de velocidad de fricción de onda |
| U_0 | Velocidad próxima a la estructura |
| ν | Viscosidad cinemática del fluido |
| ω | Velocidad de caída del sedimento |
| x | Distancia del punto de ruptura de la ola al muro |
| x_b | Distancia del punto de ruptura de ola a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa |
| x_s | Posición relativa del muro respecto a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa |
| X | Distancia de la estructura respecto a la línea de costa |

GLOSARIO

Acorazamiento: proceso de erosión selectiva que suele darse en algunos ríos y arroyos cuyo material de fondo tiene una granulometría graduada. Las partículas mayores, que no alcanzan a ser transportadas se quedan en el lugar, formando, en el fondo una capa donde solo se encuentra predominantemente el material grueso.

Altura de ola incidente: distancia vertical entre la cresta y el valle de una ola determinada.

Amplitud de ola: distancia que una partícula se aleja de su posición media en dirección perpendicular a la de propagación. También es equivalente a la mitad de la altura de ola.

Ascenso máximo de oleaje: ascenso máximo del agua sobre un talud de una estructura, medido por la distancia vertical del nivel medio del mar al punto máximo de desplazamiento sobre el talud.

Berma: espacio llano en una pared empinada próximo a un muro o que separa dos zonas, son usadas para el control de la erosión.

Canal de oleaje: instalación utilizada para llevar acabo la reproducción de oleaje regular o irregular con un equipo de generación.

Descenso del oleaje: descenso del agua sobre el talud de una estructura, medido por la distancia del nivel medio del mar al punto más bajo de desplazamiento sobre el talud.

Difracción: fenómeno que modifica al oleaje, el cual es una transferencia lateral de energía y se presenta cuando el oleaje es interrumpido parcialmente por un obstáculo generando una distribución lateral de la energía detrás de la barrera.

Espectro de oleaje: relación de la distribución de la energía de las ondas con respecto a sus frecuencias, representándose gráficamente.

Espigón: estructura que se construye en forma perpendicular a la línea de costa con el fin de evitar la erosión ocasionada por el transporte litoral.

Fetch: superficie de un lago u océano sobre el cual incide el viento en una dirección dominante, generando oleaje.

Frecuencia: magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de un fenómeno o suceso. También calculado como el inverso del periodo.

Mampara: estructura divisora entre la parte seca de una playa y el mar, similar al muro como obra de protección costera pero con la finalidad de retener la arena de la acción del oleaje.

Marea: movimiento periódico y oscilatorio de ascenso y descenso del nivel del mar, debido a la fuerza gravitacional de ejerce la luna y el sol sobre la tierra.

Obra de protección: estructura que se encuentra de manera exterior en un puerto o costa, con la finalidad de proteger una zona o bien contra la influencia del oleaje evitando la erosión.

Ola: onda que se describe en la superficie del agua en movimiento.

Pendiente o talud: grado de inclinación con respecto a la horizontal, usado generalmente como una relación entre las unidades verticales con respecto a las unidades horizontales.

Periodo de ola: tiempo transcurrido en pasar una partícula por dos crestas o valles consecutivamente.

Rebase (overtopping): expresión utilizada para describir el efecto de transmisión de oleaje por encima de la corona de una estructura.

Sensores de nivel: equipo electrónico para efectuar la medición del oleaje reproducido en los ensayos dentro de un canal de oleaje.

Transporte litoral: movimiento de sedimentos en la zona litoral generado por el oleaje y corrientes, de manera paralela a la costa.

INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN

La zona costera constituye una delgada franja continua que no ocupa grandes superficies y que, sin embargo, bordea toda la interfaz mar-tierra del planeta. Las costas constituyen paisajes sumamente diversos, resultantes de una gran heterogeneidad geomorfológica, climática, ecológica y socioeconómica. Son regiones altamente productivas, por lo que numerosas culturas se han desarrollado con base en la riqueza natural de sus ecosistemas. Hoy en día son zonas de gran importancia económica por sus recursos pesqueros, energéticos, turísticos, industriales y urbanos (Silva, 2015). A pesar de ser considerada un sitio paradisiaco, es clasificada por los expertos como de alto riesgo para quienes la habitan o la usan de recreación. La riqueza y diversidad de recursos presentes en las zonas costeras conllevan la correspondiente concentración de actividades y asentamientos humanos a lo largo de los litorales, ocasionando que exista mayor vulnerabilidad debido a la presencia de fenómenos naturales, haciendo cada vez más importante conocer los peligros y la manera de protegerlas, para evitar situaciones de alto riesgo tanto de pérdidas humanas como de daños al medio ambiente costero.

El oleaje es la forma más evidente de energía en los océanos. Las olas obtienen su energía del viento y al propagarse a través del océano llegan a zonas costeras en donde pueden provocar daños de manera directa por su impacto sobre la infraestructura y de manera indirecta provocar erosión de las playas por la generación de corrientes y transporte de sedimentos. Los procesos y los ambientes costeros están sujetos a cambios que varían ampliamente en escala geográfica, tiempo y duración, y que al combinarse crean sistemas biológicamente muy productivos, pero vulnerables a las presiones ambientales de la diversas actividades humanas. Los procesos oceánicos están también dominados por factores hidrológicos y físicos que a su vez controlan el transporte de materiales y los regímenes de energía.

En México, la longitud de costa relativa a su superficie es, entre los países continentales, de las mayores del mundo, por lo que la importancia y potencial de la costa es indudable.

Aun en proyectos en los que se han tomado previsiones contra la socavación, el monitoreo suele revelar la aparición de zanjas u oquedades que se deben reparar. La predicción de la ocurrencia y localización de la socavación se encuentra en etapas muy rudimentarias, por lo que los diseños de protección para una obra nueva y para una reparación son similares. El mayor problema que se debe resolver, una vez que ha ocurrido la socavación, es si el hueco se debe rellenar o ya no, ya que un hueco con paredes muy verticales que no se rellena, es susceptible de provocar el deslizamiento del talud; mientras que un hueco demasiado grande es resultado de corrientes y oleaje muy intensos y, al rellenarse, generará dichos efectos en zonas adyacentes a la estructura que no estarán protegidas. La decisión debe tomarse con cuidado y considerando tanto la seguridad de la estructura como la del medio circundante, a lo cual, el conocimiento generado en este trabajo pretende contribuir.

OBJETIVOS

La finalidad de la presente tesis, es revisar los métodos existentes de predicción de socavación al pie de un muro vertical. Presentar los resultados obtenidos de pruebas de laboratorio y estudiar la socavación frente a un muro vertical debido a la incidencia de una ola enfocada al pie de la estructura, y posteriormente proponer recomendaciones para la predicción de la profundidad de la socavación y evitar el daño de las estructuras a fin de garantizar la seguridad de las actividades desarrolladas en la costa.

Como objetivos particulares:

- Estudiar el perfil de la superficie libre del agua de una onda enfocada y la relación con la profundidad de la socavación.
- Estudiar la relación de la pendiente en el comportamiento de la rotura de la ola próximo al muro en estudio.
- Estudiar la implicación del suelo en estudio con la profundidad de la socavación variando el tamaño de partícula del sedimento.
- Analizar el efecto que tiene la pendiente de la estructura en la profundidad de la socavación.

Cabe mencionar que para el presente trabajo se usará de manera indistinta el concepto de prueba o ensayo, para referir a un solo caso de estudio de las 234 pruebas realizadas.

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo está constituido por seis capítulos, en el primer capítulo se presenta una introducción e importancia de las zonas costeras en la que se justifica la realización del trabajo; así mismo se presentan los objetivos particulares y la organización del trabajo.

En el capítulo segundo, se hace una revisión de los factores que erosionan las costas, los agentes que intervienen en el proceso erosivo, los tipos de erosión y las implicaciones de la pérdida de playa. Así mismo se presentan tanto alternativas naturales como artificiales para la protección de las playas y se presenta una panorámica general del muro vertical como obra de protección costera.

En el tercer capítulo, se presentan las generalidades sobre la socavación en ambiente marino, se describen los problemas asociados a la socavación frente a muros verticales, agentes que intervienen en el proceso de socavación y contiene una breve descripción sobre estudios y trabajos de laboratorio previos para determinar la profundidad de la socavación.

En el cuarto capítulo, descripción de los experimentos, se describen las condiciones y procedimientos para el desarrollo de los ensayos, la preparación de los ensayos desde los materiales empleados hasta el equipo de laboratorio empleado en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El quinto capítulo, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, se hace un análisis para intentar comprender la influencia del comportamiento de la onda y la implicación que tiene con la profundidad de la socavación.

El sexto capítulo, se presentan las conclusiones de los datos presentados en el capítulo anterior, adicionalmente se presentan recomendaciones para la predicción de la socavación y las futuras líneas de investigación. Por último se presentan las referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO 1

PROTECCIÓN DE LA COSTA

1.1 ¿POR QUÉ SE EROSIONAN LAS COSTAS?

La línea de costa es el resultado de un equilibrio dinámico donde compiten por un lado el mar, erosionando o depositando materiales y por el otro los aportes terrestres provenientes de los ríos o debido a la acción del viento. Como resultado de esto, la línea o sección de costa no es un elemento estático, sino que avanza o retrocede dependiendo de las acciones y aportes del mar o tierra y en ocasiones se mantiene estático cuando el volumen de material arrastrado es el mismo que el depositado a lo largo del tiempo.

Son regiones altamente productivas, por lo que numerosas culturas se han desarrollado con base en la riqueza natural de sus ecosistemas. Como consecuencia del crecimiento poblacional y la búsqueda del asentamiento por parte de ésta cerca de la zona costera, se han alterado los ciclos de erosión natural causando la pérdida superficie terrestre con un gran valor económico, energético, social, turístico y ambiental. Se puede decir que la costa es un dominio geológico, ecológico, biológico y socioeconómico único y de gran importancia para numerosas formas de vida incluyendo la humana y que representa una zona de gran fragilidad al ser la región más dinámica y cambiante del planeta.

El hombre al influir sobre la erosión natural marina, modifica la morfología natural de la costa causando daños irreversibles en las comunidades marinas. La problemática actual en las franjas litorales se debe a varios factores antropogénicos. La alteración de ramblas, desembocaduras de ríos y presas disminuye los aportes de sedimentos al mar. Así mismo la eliminación de los sistemas dunares y la vegetación litoral buscando la comodidad de los turistas, impide la circulación de arena entre mar y tierra, disminuyendo la cantidad de arena disponible en las playas. Para considerar si hay erosión o acreción en una costa es importante hacer un cálculo del balance, en al menos un ciclo anual, de los sedimentos litorales, evaluando las contribuciones y pérdidas para calcular si habrá pérdida o ganancia neta en el volumen de material disponible en el perfil de playa.

También debe considerarse desfavorable, a la acreción de las playas como consecuencia de la erosión de algún otro sitio cercano o lejano, como fue el caso del huracán Wilma en las costas de Quintana Roo que provocó la pérdida de playas en Cancún, mientras que el material transportado aumento la superficie de las playas en Puerto Morelos.

La acumulación de arena en el perfil de las playas se produce durante las estaciones con menos energía del oleaje, lo cual es un proceso más lento que la erosión del perfil de las playas que se produce en los episodios más intensos. El transporte horizontal de sedimentos en las playas depende de la disponibilidad de arena, ángulo y energía del oleaje y de la presencia de obstáculos temporales o permanentes, como en el caso de la construcción de espigones.

1.1.1 TIPOS DE EROSIÓN

De manera general podemos hablar de los siguientes tipos de erosión:

- **Erosión a corto plazo:** ocurre debido a un evento de tormenta, la cual puede durar uno o varios días. La excesiva entrada de energía, modifica la distribución espacial de las arenas ya que los sedimentos más finos son removidos a zonas menos expuestas a la energía del oleaje o corriente, en sitios de aguas profundas quedando estancadas por estructuras naturales o artificiales. Esta erosión es la más apreciable, aparatosa y destructiva, por lo que se le presta mayor atención y es la que lleva a tomar medidas inmediatas que, en muchos casos, no son las mejores por falta de diseño y planeación. Si bien este tipo de erosión afecta directamente la infraestructura, podría mitigarse el impacto con la existencia de cordones dunares de un ancho suficiente.
- **Erosión a largo plazo:** ocurre debido al oleaje regular que llega a todas las costas y mueve la arena de las playas en un movimiento aproximadamente paralelo a la costa, comúnmente conocido como transporte litoral. Si el suministro de arena es constante y suficiente, el perfil de la playa tiende a mantenerse constante evitando la erosión de la misma. El problema ocurre en zonas con fuerte presencia de infraestructura o playas “antropizadas”, donde las obras de puertos y espigones modifican el transporte litoral, y la interrupción del suministro de sedimento de las cuencas a la costa debido a las presas en los ríos. Esta interrupción del aporte de suministro, tiene efecto sobre la disponibilidad de arena y por lo tanto se genera una paulatina erosión en la playa. Como esta reducción del ancho de la playa es de pequeña amplitud pero constante día a día, la erosión no es apreciable a corto plazo. De esta manera, este tipo de erosión es un fenómeno importante que debe de tomarse en cuenta para prevenir desastres y debe ser contemplada para el desarrollo de infraestructura y el manejo de la zona costera.
- **Erosión temporal:** la resiliencia natural de la costa permite la regeneración natural de la misma, debido a los procesos geomorfológicos como erosión o deposición en una playa en diferentes intervalos de tiempo (tormentas, mareas o fenómenos como El Niño y La Niña).
- **Erosión cíclica:** la morfología de la playa esta principalmente determinada por la acción que el oleaje ejerce sobre los sedimentos. De manera general se puede considerar que existen dos tipos de playas, las disipativas y reflejantes. Las playas disipativas tienen como característica pendientes suaves entre 0.01 y 0.03, donde gran parte de la energía del oleaje es disipada por los procesos relacionados con la rompiente del oleaje permitiendo la acumulación de sedimentos creando una barra longitudinal lineal. En las playas reflejantes, el ancho de la playa suele ser estrecho, la pendiente más pronunciada (entre 0.10 y 0.20), y el material es grueso, razón por la cual, tiende a reflejar la energía de la ola. En playas meso y macromareales (amplitudes de marea superiores a 2 m), la franja litoral puede tener un comportamiento disipativo en periodos de marea baja y comportarse de manera reflejante en marea alta. En virtud de las variaciones de marea, los procesos de cambio del perfil se deben considerar como naturales, y no deben implementarse acciones de protección costera.

1.1.2 CAUSAS DE LA EROSIÓN

Definiendo la erosión en términos prácticos, podemos decir que las playas se erosionan cuando pierden más sedimento del que reciben. Los procesos erosivos más comunes son la acción destructiva del oleaje durante tormentas, aumento o disminución de la marea y la limitación del aporte de sedimentos por obras de origen antrópico (Bird, 1996 y Silva y Mendoza 2015).

1.1.2.1 CAUSAS NATURALES

- El transporte de sedimento a lo largo de la costa, debido a la acción del mar o viento, es uno de los procesos más importantes en el control de la morfología de las playas y determina en gran parte si la costa se está erosionando, está creciendo o es estable.
- La selección y redistribución de los tamaños del material de la playa por la acción del oleaje, generalmente perdiendo los granos finos en las zonas con más energía.
- El movimiento de sedimentos a lo largo de la costa se conoce como transporte litoral, mientras que los volúmenes de arena involucrados en el transporte se conocen como deriva litoral. Este transporte puede ser detenido por rompeolas o capturado por cañones submarinos. En el caso de los rompeolas, el resultado es la acreción de la playa del lado corriente arriba y erosión corriente abajo.
- La erosión eólica es un fenómeno que consiste en el transporte del material de la zona de playa activa hasta la parte posterior de la misma, donde se acumula formando dunas, que posteriormente pueden servir como aporte de material.
- El calentamiento global es otra causa de la pérdida de playas ya que produce el deshielo de los glaciares y aumento en el nivel de agua y por lo tanto de la marea, produciendo una recesión paulatina de la línea de costa.
- Los eventos de tormenta generan una depositación de sedimentos fuera de la zona activa de la playa, trasladando el material a zonas marinas como acantilados marinos o arrecifes, y a zonas terrestres donde en condiciones regulares el oleaje o viento no es capaz de regresar la arena a la zona activa.

1.1.2.2 CAUSAS DE ORIGEN ANTRÓPICO

- Una fuente de erosión, de gran impacto en todo el mundo, es la deforestación, modificación o eliminación de las dunas. Estas son elementos dinámicos que naturalmente se adaptan a los ciclos y condiciones marinas, protegiendo a la zona costera tanto de la acción del viento como del oleaje, ya que por un lado la ola de tormenta necesita de la duna para ascender y disipar energía y por otro lado la vegetación afirma el sedimento evitando que este vuele con la acción del viento. Durante eventos extraordinarios, las dunas aportan gran cantidad de material minimizando el impacto en el ancho de la a la playa.
- Construcción de infraestructura en zonas activas o sobre las dunas. Estas impiden la acumulación de arena en forma de dunas, mismas que durante las tormentas sirven como reserva de sedimentos. La acción del oleaje sobre las estructuras genera una reflexión de la energía en lugar de disipar la energía, aumentando la capacidad de transporte de sedimento.
- La explotación de recursos superficiales (gas, petróleo, carbón, agua, entre otros), produciendo el hundimiento del terreno.
- Variando el nivel del mar, por obras de gradado en una boca o bahía, la penetración de la marea astronómica puede sufrir modificaciones y el oleaje podrá incidir con mayores alturas.
- Impedir el acarreo natural de la arena, por la construcción de obras de protección que sirven de manera local, influyendo sobre las zonas circunvecinas alterando el equilibrio que se tiene.
- Reducción del aporte de sedimentos por la construcción de obras de ingeniería (p. e. presas) aguas arriba de los ríos, azolvándolas. En condiciones naturales el material sería transportado hasta la desembocadura.
- Concentración de la energía del oleaje sobre la playa, como son los fenómenos de reflexión y difracción del oleaje, consecuencia de la construcción de obras marítimas perpendiculares y paralelas a la playa. En algunos casos puede ocasionar erosiones al pie de las estructuras.
- Remoción de arena de las playas, eliminando los bancos de materiales. En algunas ocasiones, y dado que no existen bancos de arena, se toma este material de la playa, con la consecuente pérdida de material de abastecimiento al transporte litoral.

1.1.3 PROBLEMAS DEBIDO A LA PÉRDIDA DE PLAYAS

El problema de la erosión genera consecuencias muy diversas, desde pérdidas económicas, sociales, ecológicas y políticas hasta incluso las pérdidas de vidas humanas. Entre las pérdidas ecológicas, la disminución de ancho de la playa reduce la zona de anidación de las tortugas marinas, también incluye la pérdida de materia vegetal y eliminación de fauna, hasta casos más severos como son la extinción de la biota endémica. En las pérdidas económicas se encuentran el daño o deterioro de la infraestructura, como hoteles, restaurantes, depósito de material en dársenas de puertos que conlleva gastos por dragado, disminución en el turismo como consecuencia de la falta de playas de recreación familiar. Las pérdidas sociales se relacionan con la disminución de sitios recreativos.

1.2 ¿CÓMO SE PROTEGEN LAS COSTAS?

Una vez que se conocen los peligros que pueden presentarse en las costas debida a la erosión, salta la interrogante de ¿Qué hacer frente a los peligros costeros? Es complicado responder con certeza, más bien existen una serie de recomendaciones para realizarse de manera integral considerando los factores y actores en la costa. Actualmente se está utilizando el término de “manejo integral de la zona costera” en el cual se contemplan las implicaciones económicas, ambientales, sociales, de cualquier modificación antropogénica de la zona costera.

1.2.1 PRACTICAS DE PROTECCIÓN NATURALES

Naturalmente las playas y cordones dunares sirven de protección ante los peligros costeros como tormentas tropicales y huracanes. Estos cordones dunares actúan como barrera natural ante el aumento del nivel del mar y los oleajes extremos producidos en estos eventos, aportando material a la playa disminuyendo la erosión, de esta manera se minimizan los daños o impactos a la infraestructura y biota situados atrás de los cordones.

La recuperación artificial de la playa comúnmente llamada “rellenos de playa”, ha tomado mucha popularidad en las últimas décadas como medida de protección, buscando recrear un ancho adecuado de la playa y en algunos casos la formación de dunas artificiales para mitigar los embates de las fuerzas durante los eventos extremos. En efecto, la función de la playa no solo es proveer un espacio de recreación sino también sirve como medida de protección a los ambientes costeros, por lo tanto, aunque se pierda la playa natural o regenerada, los costos del relleno no se podrán equiparar con el costo de tener que reconstruir o restaurar la zona costera tras sufrir un desastre. Es importante mencionar que para que un relleno de playa sea exitoso, se requiere considerar la dinámica costera (oleaje, corrientes, tipo y tamaño de arena, entre otros) y hacer diseño apropiado para cada caso, evitando aplicar las mismas políticas a diferentes proyectos y lugares.

La vegetación estimula el crecimiento de dunas, atrapando y estabilizando la arena que es arrastrada por el viento. En lugares donde se presenta vegetación natural, se reduce la velocidad del viento, disminuyendo notablemente la capacidad de transporte de arenas. Del mismo modo como la vegetación sobre las dunas favorece a la retención de los sedimentos, la siembra de algas o pastos marinos ofrecen la misma solución.

Los arrecifes coralinos naturales son una fuente de alimento para millones de animales; protegen las costas de las tormentas y la erosión; proporcionan hábitat para el desove y cría de especies de peces de importancia económica; proporcionar puestos de trabajo e ingresos para las economías locales de la pesca, la recreación y el turismo.

1.2.2 OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA

Tradicionalmente se han utilizado estructuras fijas para controlar la erosión costera y tratar de conservar un ancho adecuado de la playa para proteger la zona ante diversos peligros que se puedan presentar. Es importante mencionar que la ingeniería de costas es una ciencia reciente influenciada por la ingeniería de puertos, donde el uso de infraestructura es indispensable. Sin embargo, los primeros problemas de erosión costera fueron derivados de la construcción de éstos, por lo que hizo indispensable el uso de estructuras para mitigar la erosión.

En situaciones que los procesos de erosión sean de origen antrópico, primero se debe valorar la posibilidad de restablecer los flujos de arena. La construcción de nueva infraestructura con o sin rellenos artificiales solo podrá estar justificada si previamente se demuestra que no es factible restablecer los equilibrios dinámicos de la playa.

La infraestructura de protección costera representa el conjunto de obras y sistemas construidos e implementados por el hombre para la defensa o estabilización costera contra el embate de las inclemencias del mar. La protección costera puede estar diseñada para proteger asentamientos establecidos en o cerca de la costa, o para proteger la costa misma.

1.2.2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA MARINA

Existen opciones de estructuras marinas para proteger la costa cumpliendo diferentes funciones. El Manual de Ingeniería Costera (Coastal Engineering Manual 2003 V-7) propone obras que pueden servir como protección a instalaciones costeras, estructuras de estabilización playera, relleno de playas, acorazamiento costero, o una combinación de estas. Silva y Salles (2004) proponen la siguientes tablas (1.1 a 1.3) que se han ilustrado con las figuras 1.1 a 1.8.

- Estructuras de protección a instalaciones costeras

Tabla 1. 1 Estructuras de protección a instalaciones costeras

| Tipo de Estructura | Objetivo | Función Principal |
|-------------------------------------|--|---|
| Dren de playa | Prevenir erosión playera | Acumulación de material playero en la porción drenada de la playa |
| Relleno artificial de playa y dunas | Prevenir erosión playera y proteger contra inundaciones | Relleno artificial de la playa y duna para que sea erosionado en lugar del material naturalmente depositado |
| Rompeolas flotante | Proteger puertos y zonas de ataque contra oleaje de alta frecuencia | Reducción de alturas de ola por reflexión y atenuación |
| Espigón de escollera | Estabilizar canales de navegación en desembocaduras y bocas | Confinar corrientes y flujos de marea. Proteger contra aguas pluviales y corrientes cruzadas |
| Muro de conducción | Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger atraques contra corrientes | Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras |
| Barreras para marea de tormenta | Proteger estuarios contra mareas de tormenta | Separación del estuario y el mar por medio de compuertas móviles |
| Protección contra socavación | Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente | Aumento de la resistencia contra erosión causada por oleaje y corrientes |

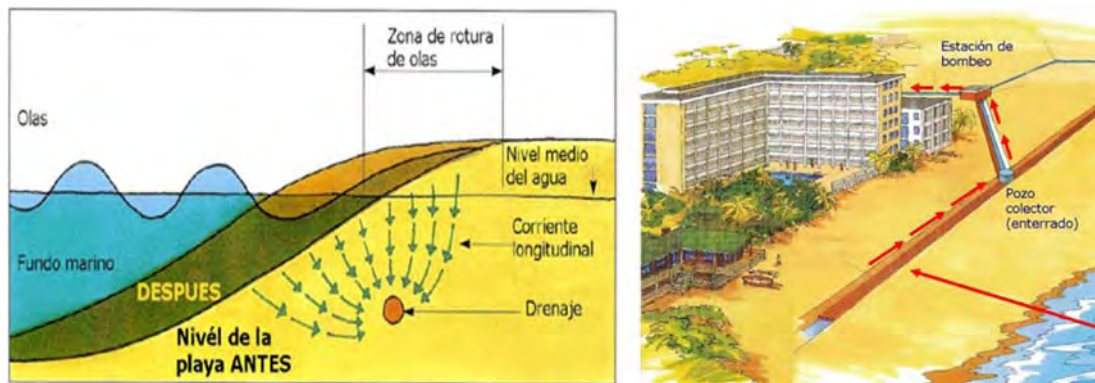


Figura 1. 1 Dren de playa



Figura 1. 2 Relleno artificial de playa



Figura 1.3 Rompeolas flotante



Figura 1.4 Espigón de escollera

- Estructuras para estabilizar playa

Tabla 1.2 Estructuras para estabilizar playa

| Tipo de Estructura | Objetivo | Función Principal |
|--------------------------------|---|--|
| Espigón | Prevenir erosión playera | Reducción de transporte longitudinal a la playa |
| Rompeolas no ligado a la playa | Prevenir erosión playera | Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura |
| Dique o rompeolas arrecife | Prevenir erosión playera | Reducción de la altura de ola en la playa |
| Dique sumergido | Prevenir erosión playera | Retardar el movimiento del sedimento mar adentro |
| Rompeolas | Proteger puertos y obras de toma contra oleaje y corrientes | Disipación de energía de oleaje y/o reflexión del oleaje hacia mar adentro |



Figura 1.5 Espigones



Figura 1.6 Rompeolas no ligado a la playa

- Estructuras de acorazamiento costero

Tabla 1. 3 Estructuras para estabilizar playa

| Tipo de Estructura | Objetivo | Función Principal |
|----------------------------|--|--|
| Dique | Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas | Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra |
| Muro vertical (espaldones) | Proteger tierra y estructuras contra inundaciones y rebase | Refuerzo de parte del perfil de playa |
| Revestimiento | Proteger la línea de costa contra erosiones | Refuerzo de parte del perfil de playa |
| Malecón de retención | Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar | Refuerzo y relleno del banco de tierra costero |



Figura 1. 7 Dique



Figura 1. 8 Muro vertical

1.3 MUROS VERTICALES

Los muros verticales son obras rígidas de protección costera que separan las zonas de tierra y agua. Están diseñados para prevenir la erosión costera y otros daños debido a la acción de las olas y las mareas (astronómicas y meteorológicas), previniendo las inundaciones en la zona posterior al muro reduciendo el rebase. Este tipo de infraestructura son estructuras masivas ya que están diseñadas para resistir la fuerza de las olas y los cambios de mareas.

Las obras rígidas de protección costera, evitan la contribución del sedimento a los procesos naturales, reteniendo el material en la zona de la playa. Esto modifica el proceso de transporte de sedimento, alterando las zonas aledañas a la obra de infraestructura generando usualmente efectos de erosión. Los muros verticales (figuras 1.9 a 1.11) son construidos con diferentes tipos de terminación de la cara frontal (escalonada, curva y vertical) y la estructura suele ser soportada por pilas o gravedad, así mismo los materiales empleados son rocas, gaviones, madera, bloques de concreto o concreto colado in situ, sin embargo generan una pérdida de los distintivos visuales que caracterizan la playa. En algunos casos la construcción del muro permite habilitar la parte superior de este como zona recreativa (malecón). A pesar de delimitar un ancho de playa constante altera los procesos de transporte litoral. Es importante considerar los efectos causados por la construcción de la infraestructura.



Figura 1. 9 Muro Escalonado

Maumee Bay State Park Resort And Conference Center, Lucas County, Ohio



Figura 1. 10 Muro con cara frontal curva



Figura 1. 11 Muro Vertical

La finalidad de los muros verticales es proteger la tierra de las olas y la acción de las mareas. Su construcción suele ser paralela a la línea de costa, proporcionando una barrera física entre la tierra y el mar. La erosión se presentará en la costa aun cuando el muro vertical no sea construido, sin embargo, los efectos sobre los procesos costeros serán mayores debido a la obra de protección costera, aumentando la tasa de erosión frente al muro debido a la reflexión de la onda, y en los extremos de la estructura ocasionado por el enfoque de las olas. Cuando todo el sedimento disponible ha sido desplazado de la zona frontal del muro vertical, la zona de deriva litoral no recibirá más aporte de sedimentos y el proceso erosivo se intensificará como resultado de la construcción de la infraestructura.

La pérdida de material en la base de la estructura puede conducir a una falla en la estabilidad (figura 1.12). Durante el proceso de construcción es importante considerar la profundidad del dentellón para reducir la posible erosión en la base del muro, mejor conocido como socavación. Otro factor a considerar es el alto del muro, siendo capaz de prevenir el rebase de las olas.



Figura 1. 12 Ejemplo de falla de un muro vertical

Para permitir un correcto funcionamiento del muro vertical, es necesario un monitoreo constante de la estructura en busca de cualquier daño o desplazamiento. Si se presentara alguna falla, proceder al replazo o reparación. Al ser una obra de infraestructura, el diseño y construcción de los muros requieren la supervisión de ingenieros y contratistas especializados.

Los muros verticales y las mamparas (figura 1.13Figura 1. 13) son estructuras similares, su principal diferencia radica en la función que desempeñan. Las mamparas son usadas en casos donde se quiere retener la arena de la acción del oleaje, mientras que el muro vertical es diseñado principalmente para resistir la acción del oleaje en zonas de gran valor económico reduciendo la erosión y evitar inundaciones.



Figura 1. 13 Mampara

1.3.1 DISEÑO DE MUROS

El diseño de estructuras de protección costera es funcional, dependiendo el uso e importancia de la misma, se determina la característica geométrica y mecánica de la obra. De este modo, la seguridad de una obra de la que dependen vidas humanas deberá ser mayor que de la que dependan bienes materiales. El diseño de estructuras costeras consta, por una parte del *diseño geométrico* que implica el dimensionamiento general de la obra en función del comportamiento hidráulico requerido o permisible, y por otro lado el *diseño mecánico*, que es la determinación del tamaño y peso de las piezas que conforman la zona expuesta al oleaje y deberá resistir las acciones del mar.

Para el diseño de los muros verticales es indispensable poner énfasis en los elementos de cimentación (pilas) para minimizar el asentamiento, y de igual manera proteger el dentellón para evitar la socavación. El asentamiento y la socavación son las principales causas de falla o daño de los muros verticales. Los pasos a seguir para un correcto diseño del muro se detallan a continuación.

a. DETERMINAR EL NIVEL DEL MAR EN EL SITIO

- a. Nivel medio del mar
- b. Nivel máximo de ascenso
- c. Nivel mínimo de descenso
- d. Mareas astronómicas
- e. Marea de tormenta
- f. Nivel del agua en lagos

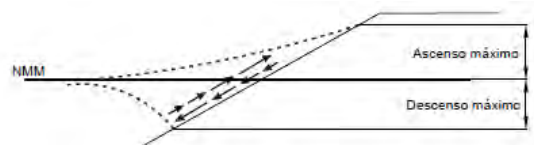


Figura 1. 14 Ascenso máximo y Descenso mínimo

- b. DETERMINAR ALTURAS DE OLA
 - a. Altura de ola
 - b. Altura significativa de ola
 - c. Periodo de onda
- c. DETERMINAR EL PERFIL DE LA PLAYA POSTERIOR A TORMENTAS
- d. SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL MURO
 - a. Cimentado o diseño por gravedad
 - b. Selección de material (Costo-Durabilidad)
 - c. Altura del muro
 - d. Acabado de cara frontal (Escalonado, Vertical, curvo) mostrado en la figura 1.15

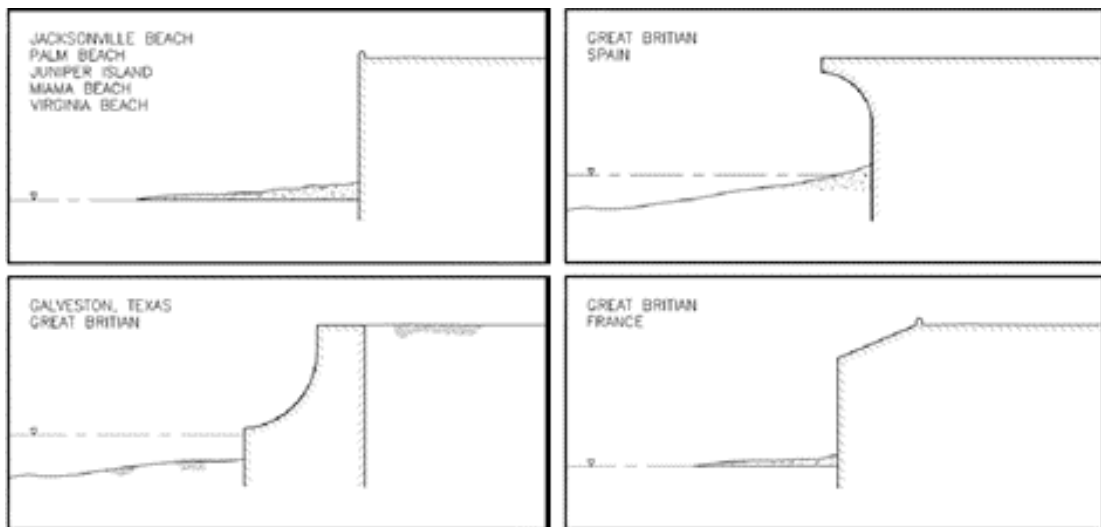


Figura 1. 15 Configuración de muro

- e. DISEÑO ESTRUCTURAL
 - a. Análisis Geométrico
 - b. Análisis Mecánico

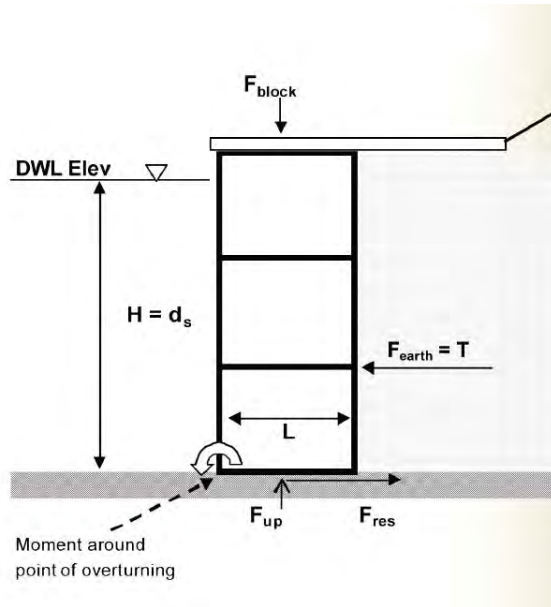


Figura 1. 16 Análisis mecánico

f. DISEÑO DE CIMENTACIÓN

- a. Diseño por gravedad
- b. Anclas (Torones) por ejemplo los mostrados en la figura 1.17
- c. Pilas

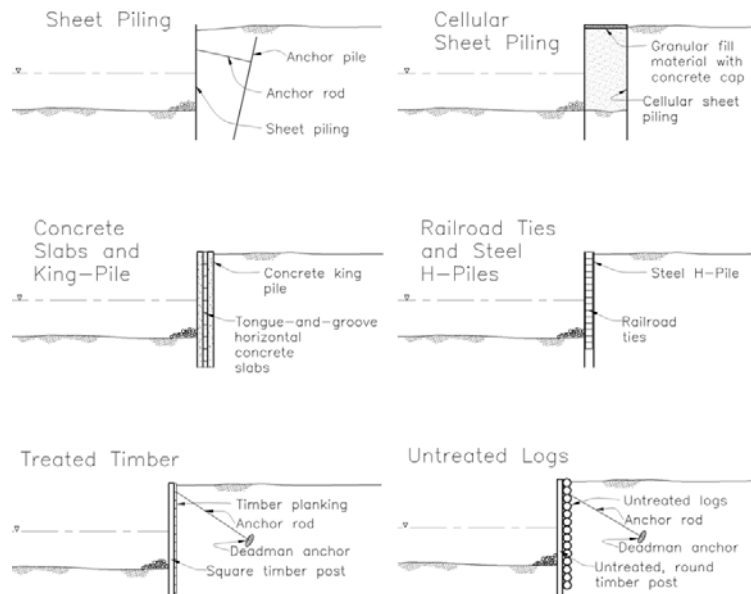


Figura 1. 17 Tipos de cimentación para muros

- g. CONTEMPLAR MATERIAL DE RELLENO
- h. ANÁLISIS POR VOLTEO Y DESLIZAMIENTO
- i. DETERMINAR ASCENSO MÁXIMO (figura 1.18)

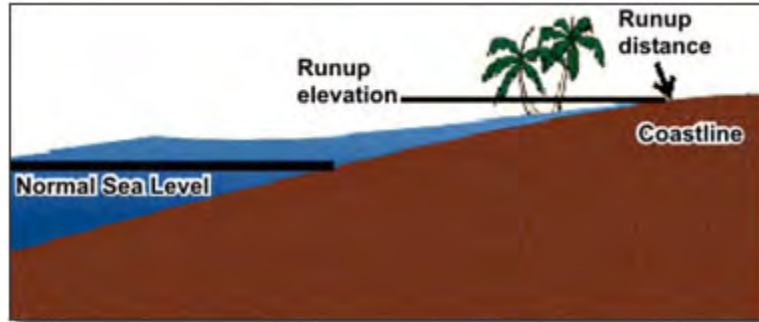


Figura 1.18 Ascenso máximo

- j. DETERMINAR ALTURA MÁXIMA DE REBASE

El rebase ocurre cuando los niveles más altos de ascenso máximo exceden el francobordo de una estructura. En el caso que se construya caminos de acceso o instalaciones sobre la corona, se tendrá requerimientos propios y magnitudes de rebase admisibles.

- k. DISEÑO DE DREN (SI ES REQUERIDO)
- l. DISEÑO DE PROTECCIÓN CONTRA SOCAVACIÓN (figura 1.19)

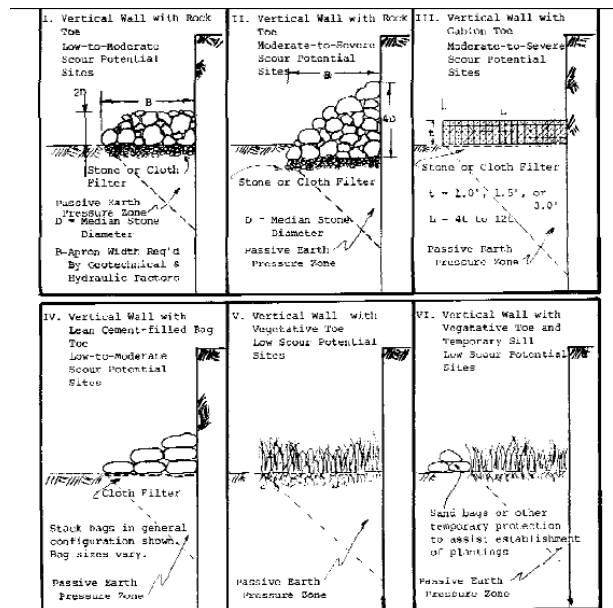


Figura 1.19 Tipos de protección contra la socavación

- m. ANÁLISIS DE COSTO
- n. ESTABLECER COSTOS DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE LA ESTRUCTURA

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES SOBRE LA SOCAVACIÓN EN ZONAS COSTERAS

2.1 INTRODUCCIÓN

La socavación alrededor de las estructuras expuestas a una corriente constante ha recibido gran atención por lo menos durante los últimos cincuenta años. Esto se debe a que una de las más importantes estructuras hechas por el hombre, el puente, construido para permitir el cruce de un río, puede fallar debido a la erosión de la base, siendo esta una de las causas principales de la falla de la estructura.

Sin embargo, la socavación debido al oleaje no ha recibido la misma importancia como la producida por el cauce de un río. Principalmente se debe a que el uso de estructuras marinas es más reciente que el uso de puentes para cruzar cauces y por otra parte, debido a que la socavación no tiene el mismo grado ni reconocimiento como modo de falla.

Una de las obras de protección costera más usuales es el muro vertical. Bajo condiciones regulares de oleaje y corrientes, el fondo de la estructura que soporta al muro, tiende a sufrir erosión y posteriormente se presenta una falla total o parcial. Este problema suele implicar costos muy altos de reparación, por lo tanto, hace necesario métodos de construcción y diseño precisos.

Para un correcto diseño del muro es indispensable ser capaz de estimar correctamente la pérdida de sedimentos al pie de la estructura y la posible socavación que pueda presentarse. En la mayoría de los ambientes marinos, el oleaje, las mareas y corrientes interactúan entre sí resultando en situaciones hidráulicas complejas. Debido a esto, es necesario establecer modelos físicos para estudiar y evaluar la estabilidad y funcionalidad de las estructuras (muros).

2.2 SOCAVACIÓN EN AMBIENTE MARINO

Cuando una estructura es construida en el ambiente marino, la presencia de la estructura va a cambiar el patrón del flujo en sus alrededores dando como resultado uno o más de los siguientes fenómenos:

- a. La contracción del flujo
- b. La formación de un vórtice en forma de herradura enfrente de la estructura
- c. Turbulencia
- d. La aparición del fenómeno de reflexión y difracción de ondas
- e. Facilitar la rotura de las olas
- f. Generar un diferencial de presión en el suelo y licuefacción permitiendo la suspensión y el transporte de las arenas producido por las corrientes.

Como resultado de los fenómenos anteriores, se puede presentar erosión local al pie de la estructura. Cuando la erosión es considerable la estructura puede fallar, ocasionando pérdidas económicas y dejando a la línea de costa sin la protección adecuada.

Existen diversos estudios teóricos y experimentales para lograr la comprensión de las causas que originan la socavación. Principalmente se han enfocado en analizar el efecto que tiene el oleaje en el transporte de sedimentos en la base de la estructura. Aunque las corrientes suelen ser la principal causa del transporte litoral, existe una influencia que se atribuye a la presencia de una obra de protección como es el muro vertical.

2.3 SOCAVACIÓN FRENTE A MUROS VERTICALES

Los muros verticales son estructuras construidas paralelamente a la línea de costa para separar la parte seca de la zona de mareas. Como se ha mencionado anteriormente, se construyen principalmente para evitar la erosión de la playa y mantener un ancho de playa constante ocasionado por el oleaje.

Debido al ángulo de incidencia del oleaje se pueden presentar diferentes escenarios de socavación en 2D y 3D. Si el oleaje incide de manera perpendicular al muro, el mecanismo de socavación será en 2D pudiendo presentarse alguno de los siguientes casos en el flujo.

- a. Las olas rompen antes de llegar al muro.
- b. Las olas rompen sobre el muro vertical.
- c. Las olas alcanzan al muro sin producirse la rotura y la onda es reflejada
- d. La onda, al incidir sobre el muro, alcanza a rebasar a éste.

Los escenarios descritos en los incisos c y d tienden a ocurrir durante eventos meteorológicos extremos como tormentas o ciclones.

La socavación en 3D se presenta cuando existen diversos ángulos de incidencia del oleaje, y alguno de los siguientes casos.

- a. Se produce corriente a lo largo de la costa ocasionadas por la rompiente de las olas
- b. En el caso donde las olas no rompen es posible que se genere una corriente continua paralela a la costa
- c. Presencia de corrientes en eventos meteorológicos extremos.

En primer lugar se analizará el fenómeno de socavación en la base de los muros verticales originados por las olas que rompen, y posterior se prestara atención al fenómeno debido a las olas que no rompen.

2.3.1 SOCAVACIÓN OCASIONADA POR OLAS QUE ROMPEN

Desafortunadamente el conocimiento y la información existente sobre la socavación debida a la rotura de ola es limitada, y el modo en que este fenómeno se lleva acabo aun no es del todo claro. Durante el proceso de rotura de la ola se crean corrientes perpendiculares a la superficie del agua que provocan la socavación del fondo marino.

Por ejemplo, en el caso de olas que rompen y son inmersivas, la onda generada penetrará el fondo del suelo y suspenderá el sedimento. Así mismo, el efecto de socavación se presentará en la situación donde la ola rompe sobre el muro.

El proceso de socavación por influencia del oleaje en la base de la estructura se ve regido por los siguientes factores:

- a. Tipo de rotura de la ola
- b. La presencia de muro vertical
- c. Propiedades del sedimento

2.3.1.1 TIPO DE ROTURA DE OLA

Existen 4 modos (figura 2.1) en que una ola puede romper (descrestamiento, voluta, oscilación, colapso). Evidentemente el modo como las olas rompen es un factor importante en la influencia de la socavación.

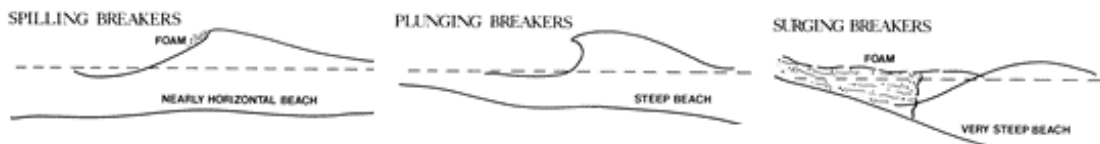


Figura 2.1 Tipo de rotura de ola

El tipo de rotura se puede identificar por el parámetro de semejanza de la rompiente o número de Iribarren ξ , el cual se define como:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (II.1)$$

- | | |
|----------|---|
| α | Angulo de inclinación del talud |
| H | Altura de ola en aguas profundas |
| ξ | Número de Iribarren |
| L | Longitud de onda en aguas profundas ($gT^2/2\pi$) |
| T | Periodo de onda |

2.3.1.2 PRESENCIA DE MURO VERTICAL

Es evidente que solo en presencia del muro vertical se desarrollará la socavación. Otro parámetro a considerar es la profundidad del agua sobre la pared d . Dado un valor “d” constante, la profundidad de la socavación cambiara dependiendo de la distancia del punto de ruptura de ola “x”. Partiendo de “d” y “x” se puede obtener los siguientes parámetros adimensionales.

$$\frac{d}{H}, \frac{x}{L} \quad (11.2)$$

Así mismo se puede agregar un tercer parámetro $\frac{T\sqrt{gH}}{d}$ donde T es el periodo, que contempla la profundidad de incidencia del flujo en el perfil del suelo marino al pie de la estructura y suspende el sedimento. Por lo tanto, el parámetro adimensional que puede representar el proceso de socavación en presencia de un muro es:

$$\frac{d}{H}, \frac{x}{L}, \frac{T\sqrt{gH}}{d} \quad (11.3)$$

2.3.1.3 PROPIEDADES DEL SEDIMENTO

Se darán en términos de velocidad de caída del sedimento

$$\theta, \frac{w}{U_{fm}} \quad (11.4)$$

Donde θ se define como

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (11.5)$$

| | |
|----------|---|
| d_{50} | Tamaño de partícula |
| g | Aceleración debida a la gravedad terrestre |
| s | Peso específico del sedimento |
| U_{fm} | Valor máximo de velocidad de fricción de onda |
| w | Velocidad de caída del sedimento |

2.3.2 ESTADO DEL ARTE

La socavación al pie de un muro vertical ha sido tema de estudio e investigación durante años. Para realizar un correcto estudio de este fenómeno es necesario abordar los efectos producidos por el oleaje, el viento, las mareas, corrientes marinas y tormentas tanto en la estructura misma como en el perfil del fondo marino que soportara la estructura. Los métodos de predicción de socavación frente a un muro vertical varían desde normas aprendidas de la experiencia hasta modelos matemáticos. Cuando se presentan condiciones hidromecánicas complejas (interacción de oleaje, mareas, corrientes y tormentas) los métodos numéricos de predicción existentes tienden a ser limitados y se hace necesario la implementación de un modelo físico para el estudio.

2.3.2.1 MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE SOCAVACIÓN PARA MUROS VERTICALES

Cuando se presenta el problema de erosión al pie de una estructura, la preocupación principal es sobre la ubicación de la socavación y la cantidad de material desplazado, ambos referenciados a la profundidad superficie y cercanía con la base de la estructura. La profundidad de la socavación S ha sido estudiada por diversos investigadores presentándola como función de los siguientes parámetros.

$$S = f_1(\rho, s, d_{50}, \omega, d, U_0, \nu, T, X, H) \quad (II.6)$$

Donde

| | |
|----------|---|
| ρ | Densidad del fluido |
| s | Peso específico del sedimento |
| d_{50} | Tamaño de partícula |
| ω | Velocidad de caída del sedimento |
| d | Tirante de agua al pie de la estructura |
| U_0 | Velocidad próxima a la estructura |
| ν | Viscosidad cinemática del fluido |
| T | Periodo de onda |
| X | Distancia de la estructura respecto a la línea de costa |
| H | Altura de ola en aguas profundas |
| S | Profundidad de socavación |

En análisis bidimensionales 2D, la influencia de ciertos parámetros descritos anteriormente es mínima, por lo que se pueden omitir. Usualmente se usa la relación adimensional S/H que expresa la socavación relativa. A continuación se presentan algunos métodos de predicción, estudios experimentales, y campos de estudio, relacionados con la predicción de la socavación frente a muro vertical.

2.3.2.2 JONES (1975)

Douglas Frank Jones en su publicación, *The effect of vertical seawalls on longshore currents*, parte de las suposiciones de una estructura con perfecta reflexión y de longitud infinita, para proponer una ecuación que estima la profundidad de la socavación. Dicha ecuación relaciona la profundidad de la socavación S con la altura de ola de ruptura H_b y el parámetro x_s , la posición relativa del muro respecto a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa.

$$x_s = \frac{x}{x_b} \quad (11.7)$$

- x Distancia del punto de ruptura de la ola al muro
- x_b Distancia del punto de ruptura de ola a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa
- x_s Posición relativa del muro respecto a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa

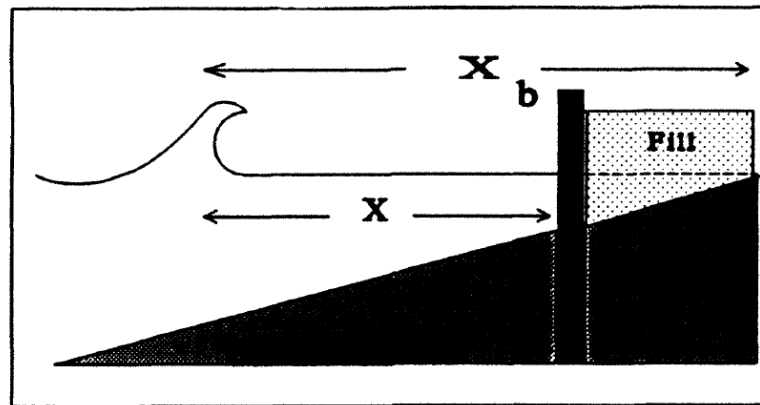


Figura 2. 2 Parámetro X_s de Jones

Cuando el pie de la estructura coincide con el nivel medio del mar $x_s = 1$. La ecuación que propone Jones para predecir la socavación máxima es:

$$\frac{S_{max}}{H_b} = 1.60 (1 - x_s)^{2/5} \quad (11.8)$$

2.3.2.3 SONG y SCHILLER (1973)

Won Oh Song y Robert E. Schiller de la Universidad de Texas en, *Experimental Studies of Beach Scour Due to Wave Action*, realizaron estudios de laboratorio bidimensionales, presentando un modelo de regresión que predice la socavación última (ecuación II.9).

$$\frac{S_{max}}{H_0} = 1.94 + 0.57 \ln(x_s) + 0.72 \ln\left(\frac{H}{L}\right) \quad (II.9)$$

- H_0 Altura de ola incidente
- H Altura de ola en aguas profundas
- L Longitud de onda en aguas profundas
- x_s Posición relativa del muro respecto a la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa

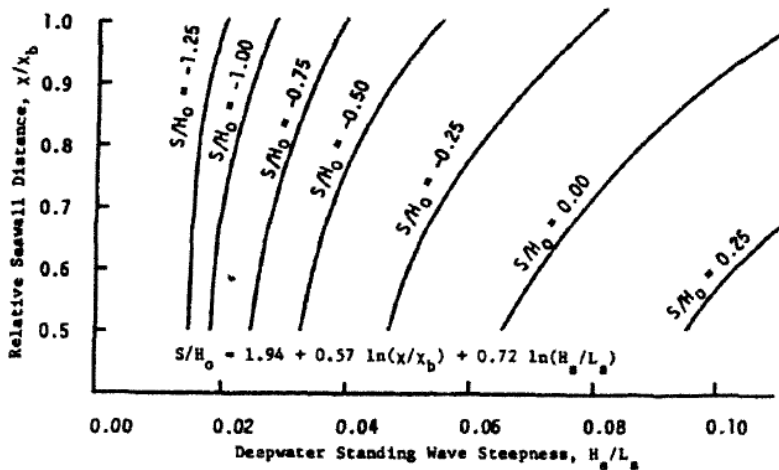


Figura 2. 3 Relación entre la profundidad de socavación, altura de ola y distancia relativa al muro (SCHILLER)

2.3.2.4 HERBICH (1968)

Herbich y Stephen C. Ko, de la Universidad Lehigh, Pennsylvania, presentan en *Scour of flat sand beaches In front of seawalls*, un modelo 2D (ecuación II.10) para condiciones donde las olas no rompen antes de impactar con la estructura.

$$S_{max} = \left(\frac{d - a}{2} \right) \left[(1 - C_r) u_r \left(\frac{3}{4} C_D \rho \frac{\cot \phi}{d_{50}(s - \rho)} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (II.10)$$

$$a = H_0 + H_r \quad (II.11)$$

$$C_r = \frac{H_r}{H_0} \quad (II.12)$$

Donde

| | |
|----------|---|
| ϕ | Coficiente de fricción interna del material |
| C_D | Coficiente de arrastre |
| ρ | Densidad del fluido |
| d | Tirante de agua al pie de la estructura |
| d_{50} | Tamaño de partícula |
| H_0 | Altura de ola Incidente |
| H_r | Altura de ola reflejada |
| s | Peso específico del sedimento |
| u_r | Velocidad de onda paralela al fondo |

Para el uso de la ecuación presentada es necesario conocer la relación de la altura de ola incidente y la reflejada **a** (ecuación II.11), y a través de pruebas de laboratorio conocer o valores publicados conocer **C_D** .

2.3.2.5 SATO, TANAKA y IRIE (1968)

Estudiaron el comportamiento de la socavación frente a muros verticales en condiciones de oleaje normal tonto de tormenta. En el estudio variaron el ángulo de inclinación del muro, el tamaño de partícula, la pendiente de la playa, y las condiciones del oleaje en 2D. Presentaron 5 tipos de configuración de la socavación.

- Tipo 1 - Socavación inicial rápida seguida de una acreción gradual del material
- Tipo 2 - Socavación inicial rápida seguida de la estabilidad de la playa
- Tipo 3 - Socavación inicial rápida con una progresiva disminución pero con erosión prolongada
- Tipo 4 - Suave pero continua socavación
- Tipo 5 - Suave pero continua acreción

Adicionalmente a identificar la posible configuración de socavación, proponen las siguientes conclusiones.

- a. La relación $\frac{S_{max}}{H_0}$ tiende a la unidad en condiciones de tormenta, comparado con condiciones de oleaje regular.
- b. La profundidad de socavación relativa decrece a medida que el tamaño de partícula decrece.
- c. La profundidad máxima de socavación en condiciones de tormenta, se presenta cuando el muro es construido en la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa.
- d. La profundidad de socavación máxima se presenta en condiciones del Tipo 3, caracterizado por una socavación inicial rápida, proseguida por una disminución progresiva y prolongada.
- e. La socavación máxima se presenta con muros verticales con ángulo de inclinación de 90°.

2.3.2.6 CHESNUTT y SCHILLER (1971)

Charles B. Chesnutt, de la Universidad de Texas en *Scour of simulated Gulf Coast sand beaches due to wave action in front of sea walls and dune barriers*, dirigieron aproximadamente 50 pruebas en dos canales de oleaje, para investigar el proceso de socavación frente a muro vertical a lo largo de la costa del Golfo de Texas. La arena empleada en el estudio fue propia de la región con un tamaño de partícula de 0.17 mm. El trabajo pretendía estudiar la profundidad de la socavación, asociado con diferentes condiciones de oleaje, pendiente de la playa, ubicación del muro e inclinación de este. Los resultados más relevantes fueron:

- En las condiciones establecidas, la socavación máxima es aproximadamente igual a la altura de ola en aguas profundas. Se usó un muro vertical (90° de inclinación).
- La socavación máxima enfrente del muro vertical se presenta en condiciones donde $0.5 < x_s < 0.67$.
- La profundidad de la socavación aumenta cuando se incrementa la altura de ola.
- La profundidad de la socavación decrece cuando disminuye en ángulo de inclinación del muro.
- La profundidad de la socavación decrece conforme disminuye la pendiente de la playa.

2.3.2.7 FOWLER (1992)

Jimmy E. Fowler, presenta el estudio experimental realizado (figura 2.4); en *Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Seawalls*. Se evaluó la presencia de socavación frente a muro vertical (90°) ubicados en tres diferentes posiciones, variando 3 ft delante y atrás de la posición inicial.

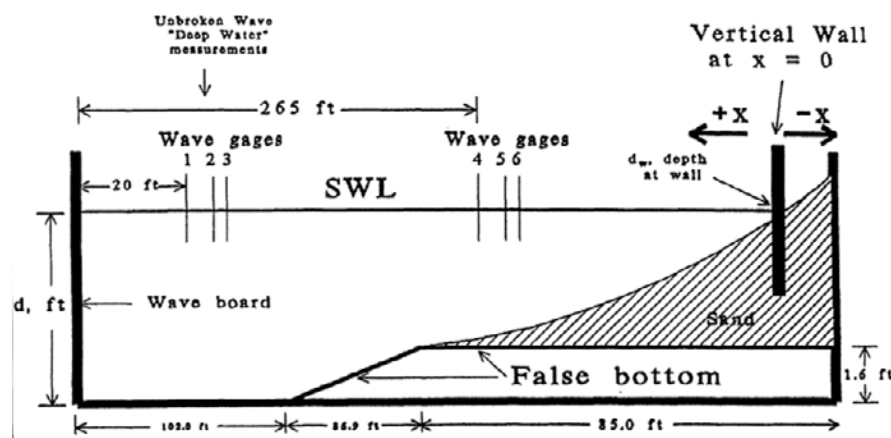


Figura 2.4 Configuración del experimento de FOWLER 1992

En la mayoría de los casos, las olas rompieron próximos o al pie de la estructura. Ensayaron 18 trenes de oleaje irregular y 4 regulares. Inicialmente el fondo de la playa era plano con pendiente 1:15. La socavación máxima se presentó 3 ft delante de la posición inicial.

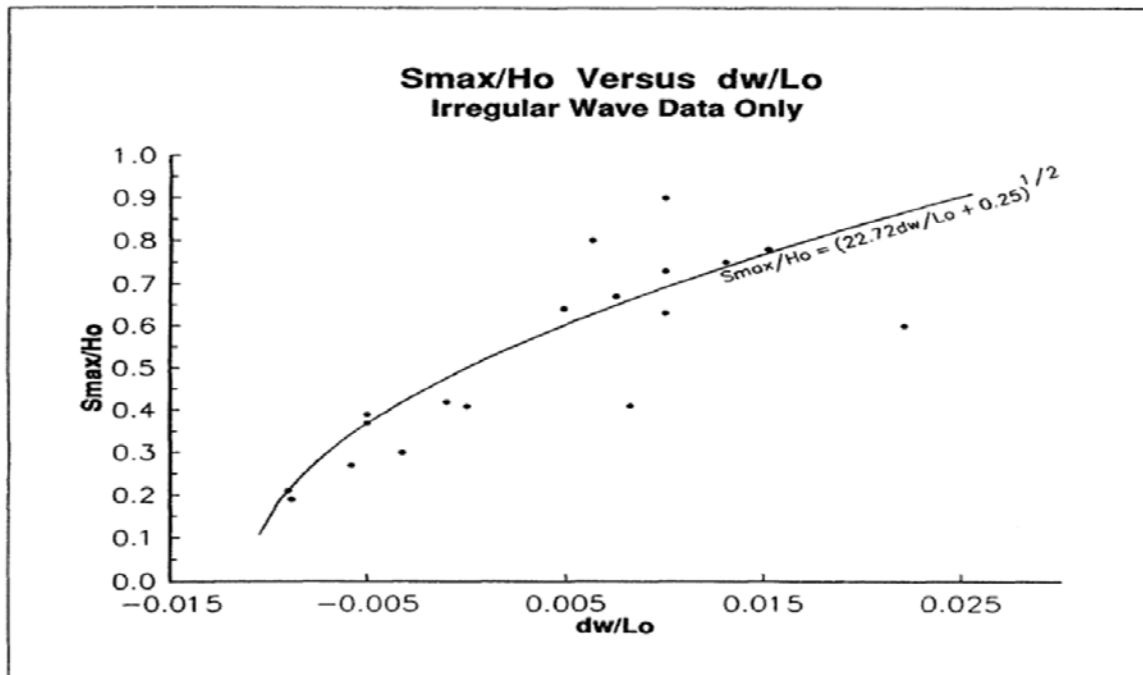


Figura 2. 5 Profundidad de socavación relativa máxima contra profundidad relativa frente a muro

En la Figura 2. 5 se presentan los datos obtenidos de la prueba, la socavación normalizada contra el parámetro $\frac{d}{L}$. La línea continua de la Imagen representa la ecuación propuesta por Fowler (1992).

$$\frac{S}{H} = (22.72 \frac{d}{L} + 0.25)^{1/2} \quad (II.13)$$

- d Tirante de agua al pie de la estructura
- H Altura de ola en aguas profundas
- L Longitud de onda en aguas profundas
- S Profundidad de socavación

Los límites de aplicación de la ecuación:

$$-0.011 < \frac{d}{L} < 0.025 \quad (II.14)$$

$$0.015 < \frac{H}{L} < 0.040 \quad (II.15)$$

Fowler concluye:

- La altura de ola significativa es el mejor parámetro de diseño en oleaje irregular para hacer coincidir con los resultados basados en pruebas de oleaje regular.
- En el caso de pruebas de oleaje regular, la profundidad de socavación aumenta en un 15%.
- Los datos obtenidos refuerzan el método empírico de $\frac{S}{H_0} < 1$.

2.3.2.8 POWELL y LOWE'S (1994)

Para los experimentos realizados, se usó un tren de oleaje irregular, emplearon material grueso ($5\text{mm} < d_{50} < 30\text{mm}$), y una pendiente inicial del fondo de 1:17. En la figura 2.6 se presentan curvas de nivel como resultado de las pruebas realizadas. Se presenta la socavación normalizada $\frac{S}{H_0}$ como función de $\frac{d}{H_0}$ y $\frac{H_0}{L_0}$. Así mismo se puede observar que se distinguen dos regiones: la zona de acreción y la de erosión.

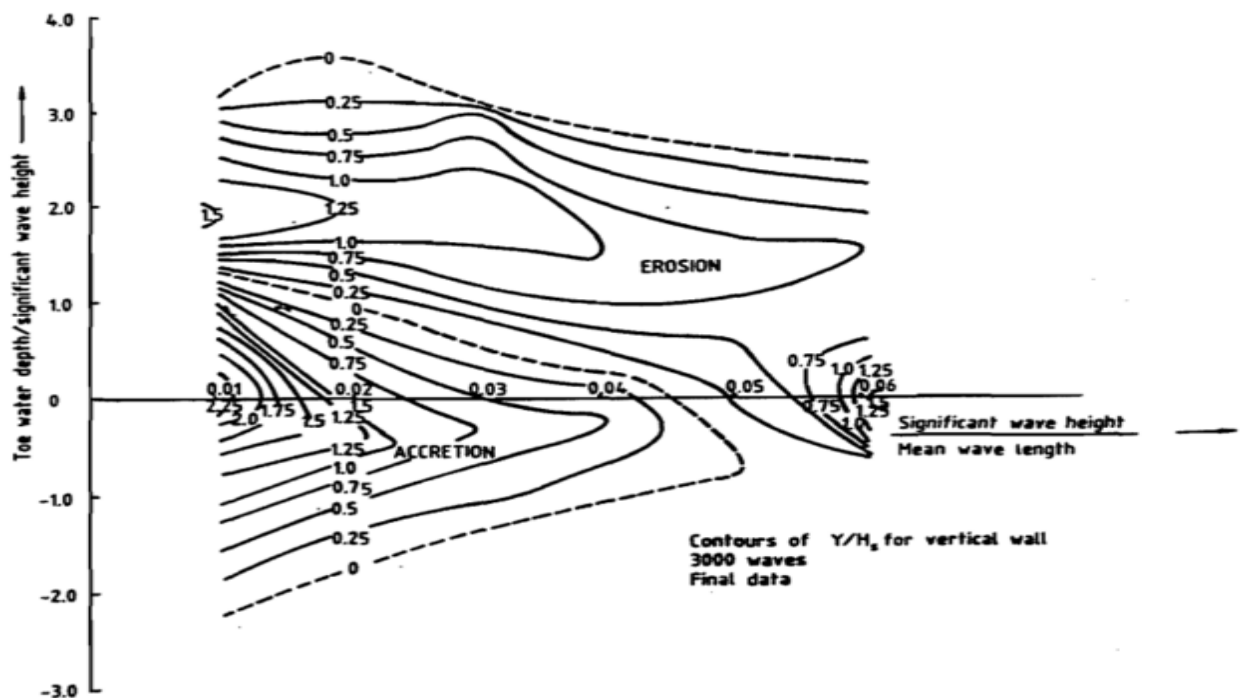


Figura 2. 6 Predicción de la profundidad de socavación frente a muro POWELL

Con relación a la figura 2.6 se puede observar que se permiten valores máximos de $\frac{S}{H_0} = 1.5$.

Estudios más recientes muestran un comportamiento similar con tamaños de partícula $d_{50} = 0.2\text{mm}$. En este trabajo, la información obtenida no fue resultado de un trabajo experimental, sino de una simulación numérica.

2.3.2.9 McDOUGAL, KRAUS y AJIWIBOWO'S (1996)

Estos autores realizaron un análisis numérico para determinar la socavación frente a muro vertical. El modelo numérico comprende de los siguientes dos elementos.

- a. Modelo de transformación del oleaje, para predecir obstáculos, refracción, y rotura de olas.
- b. Emplear un algoritmo de transporte de sedimento para delimitar el perfil de la playa.

El modelo conocido como SBEACH (Larson y Kraus, 1989), fue empleado también para complementar el efecto de reflexión en el muro.

El objetivo del trabajo no fue para desarrollar una ecuación de diseño, sino para lograr identificar aquellas variables que tienen mayor influencia en el proceso de socavación. Es por esto que determinaron una expresión empírica a partir de los datos de socavación obtenidos del modelo numérico (ecuación II.16).

$$\frac{S}{H_0} = 0.41 m^{0.85} \left(\frac{L_0}{H_0}\right)^{1/5} \left(\frac{d}{H_0}\right)^{1/4} \left(\frac{H_0}{d_{50}}\right)^{1/3} \quad (\text{II.16})$$

2.3.2.10 SUTHERLAND y OBHRAI (2006)

Realizaron un conjunto de 34 pruebas de laboratorio para determinar la socavación al pie de un muro vertical. Pretendieron suspender el material para permitir el transporte de sedimento en un canal de laboratorio. A lo largo de las pruebas se pudo observar este fenómeno. Para la realización de las pruebas se empleó un oleaje irregular. Los resultados obtenidos complementaron estudios similares.

Registraron dos profundidades de socavación. La primera socavación medida fue la que estaba adyacente al muro, y la otra se medía la máxima obtenida. Ambas son de gran interés para determinar la estabilidad de la estructura.

Se analizó la influencia de:

- a. Efecto de la pendiente de fondo
- b. Cambio en el perfil de fondo con relación a la pendiente del muro
- c. Variación en la profundidad de la socavación respecto a la pendiente del muro
- d. Variación de la profundidad de la socavación con relación a la profundidad del agua
- e. Ampliación del número de Iribarren respecto a la profundidad de socavación.
- f. Variación de la socavación relativa respecto al número de Iribarren y la profundidad relativa más próxima a la estructura.

Concluyeron que la profundidad de la socavación relativa depende del tirante de agua al pie de la estructura y del número de Iribarren. Con lo que respecta a la pendiente del muro, resulto indiferente ante esto, se presentó socavación similar en muros verticales que en aquellos con pendiente de 1:20.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Costas y Puertos, de la coordinación de Hidráulica, del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El modelo físico, instrumentación, materiales y metodología empleados se describen a continuación.

3.1 ARREGLO EXPERIMENTAL

3.1.1 CANAL DE OLEAJE

Para la realización de los ensayos, se ocupó el canal de oleaje (Figura 3. 1). El canal tiene dimensiones de, 22 m de largo, 0.60 m de alto y 0.40 m de ancho, con paredes de vidrio templado. La estructura para dar soporte al canal está construida con acero inoxidable. Así mismo cuenta con dos secciones de 0.90 m de largo por 0.30 de ancho de fondo removible, ubicadas a 13 y 15.5 m desde la pala generadora.



Figura 3. 1 Canal de oleaje

El sistema de generación de oleaje, de la firma HR Wallingford, con el que fue equipado el canal, está integrado por una pala de tipo pistón de acero inoxidable, siendo una de sus principales ventajas, el desplazamiento de la pala no está limitado en comparación con las de bisagra, haciendo el sistema de pistón ideal para la generación de olas enfocadas y solitarias, además de tener la capacidad de absorber las ondas reflejadas. La pala está montada debajo de un transmisor de accionamiento eléctrico, el cual se encuentra suspendido de una estructura ajustada a las paredes del canal (Figura 3. 2).



Figura 3. 2 Pala generadora de tipo pistón

Para la simulación de distintos estados del mar, el software HR Merlín permite generar oleaje regular e irregular al indicar distintos parámetros como la amplitud de onda, frecuencia, tipo de espectro o serie temporal, altura significativa y periodo pico, de acuerdo al tipo de oleaje seleccionado. Además, el generador de olas está equipado con un sistema de absorción dinámica de ondas re-reflejadas para el control preciso de las condiciones de oleaje, el cual es activado de manera opcional.

La colocación del material ensayado requirió la construcción de una estructura para simular el muro vertical. El muro fue construido de una placa de madera triplay de 7 capas, de media pulgada de espesor. Se cortó de 0.40 m de ancho por 0.60 m de alto de tal manera que quedara ajustada al ancho de canal simulando las fronteras de estudio. El muro se colocó a 18.21 m desde la pala intentando que quedara lo más retirado de ésta, y permitiendo una medición del fenómeno adecuada (Figura 3. 3). En la parte posterior del muro se colocó roca de río para compensar el empuje del material y evitar el desplazamiento de este.

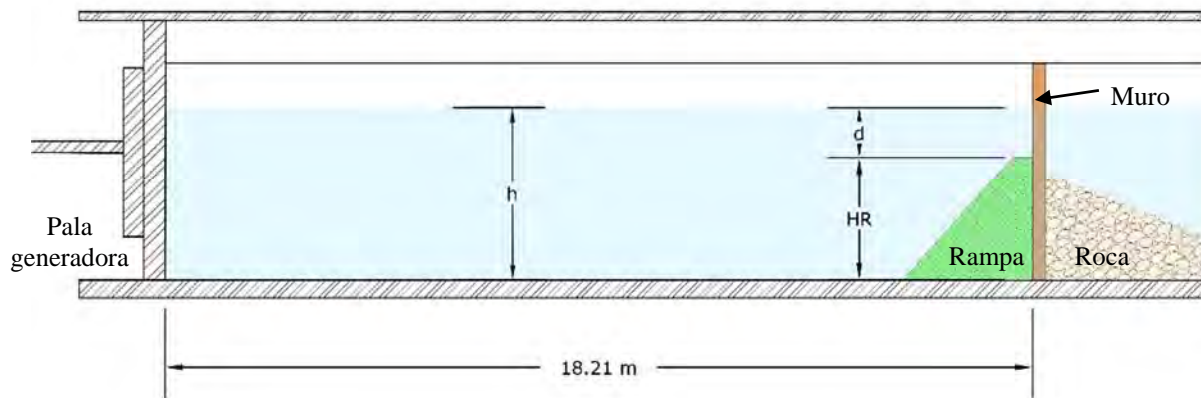


Figura 3. 3 Esquema de la prueba

3.1.2 INSTRUMENTACIÓN

3.1.2.1 SENSORES DE NIVEL

Para determinar la variación de la superficie libre del agua, se utilizaron 7 sensores de nivel (Figura 3. 5) conectados a dos terminales de la marca HR Wallingford (Figura 3. 4), de 8 y 4 canales. Estos cuentan con dos varillas de acero inoxidable unidas en forma paralela, en el extremo inferior se tiene un aislante, y en la superior un conductor, conectado con un cable a una terminal. El sistema se basa en la respuesta lineal de la corriente a la longitud de la sección de las varillas por la que circula (aumentando la corriente mientras más sumergido está el sensor). La elevación del agua respecto al nivel de la superficie en reposo, se puede medir directamente, a través del voltaje de salida en que es convertida la corriente en cada sensor. Este proceso fue realizado con la ayuda del sistema de medición, imc SPARTAN, que posteriormente se describirá.

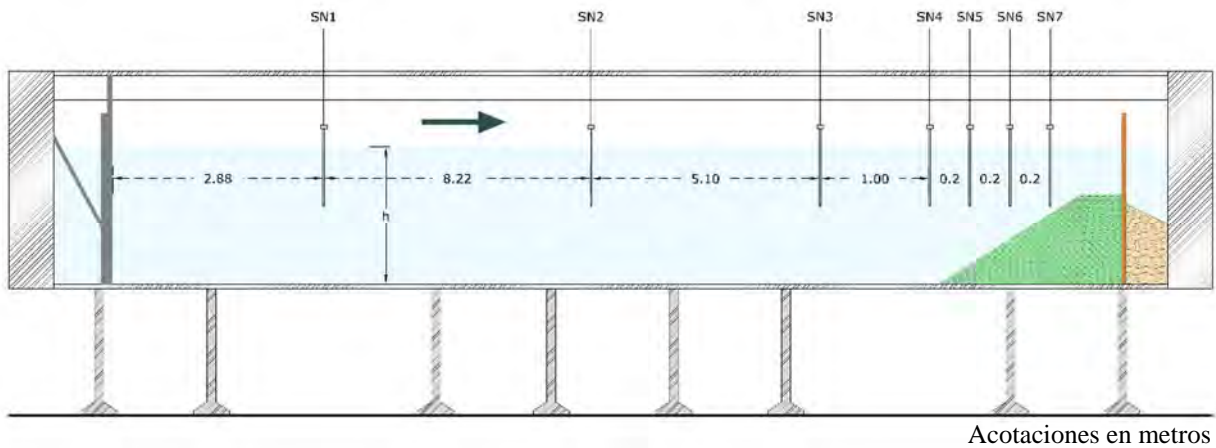


Figura 3. 4 Terminal para los sensores de nivel



Figura 3. 5 Sensor de nivel

Los 7 sensores empleados fueron colocados a lo largo del canal, estando el primer sensor (SN-1) ubicado a 2.88 m de la pala generadora. En la Figura 3. 6 se muestra el esquema y la distribución de los sensores restantes (tabla 3.1).



Acotaciones en metros

Figura 3. 6 Distribución de los sensores

Tabla 3.1 Coordenadas de posición de los sensores de nivel

| Sensor | Distancia desde la pala (m) |
|-----------------|-----------------------------|
| Pala Generadora | 0 |
| SN 01 | 2.88 |
| SN 02 | 11.10 |
| SN 03 | 16.20 |
| SN 04 | 17.20 |
| SN 05 | 17.40 |
| SN 06 | 17.60 |
| SN 07 | 17.80 |
| Muro Vertical | 18.21 |

3.1.2.2 SENSOR DE VELOCIDAD

Así mismo, se instrumentó el canal con un sensor de velocidad Vectrino-II (Figura 3.7) de la firma NORTEK AS, ubicado 3 cm delante del SN-07. El Vectrino es un instrumento acústico de alta resolución diseñado para la medición de velocidades en 3D a pequeña escala capturando un perfil de velocidades de 30 mm (Figura 3.8), se usa además para medir la turbulencia, velocidades en canales y modelos físicos a escala reducida. El Vectrino también cuenta con un sensor de temperatura incluido, captura datos en un rango de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Está formado por una sonda de titanio con cuatro transductores receptivos ubicados dentro de cada uno de los brazos receptores y uno de transmisión que se encuentra en el centro de la sonda (Figura 3.9). La configuración de la medición y los valores registrados fueron almacenados por el software Vectrino II Profiling.



Figura 3.7 Vectrino-II

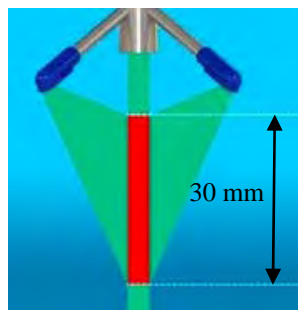


Figura 3.8 Perfil de Velocidad



Figura 3.9 Configuración de la sonda

3.1.3 SISTEMA DE MEDICIÓN: imc SPARTAN

Para la sincronización del registro de los sensores de nivel, se utilizó un sistema de medición de alta precisión llamado SPARTAN de la firma imc, el cual permite el control integrado y simultáneo de distintos tipos de señales (voltaje, corriente, temperatura, tensión), y el uso de múltiples frecuencias de muestreo (hasta 500 Hz) y condiciones de inicio de medición, y la realización de cálculos en tiempo real en canales sincrónicos.

El SPARTAN empleado para los ensayos tiene capacidad de entrada de 48 canales analógicos (12 conectores de 4 canales) y 16 digitales (4 conectores de 4 canales). Para el caso de las señales analógicas generadas por los sensores de nivel, se adaptaron las salidas de los monitores en 3 grupos para la entrada a conectores de 15 pines que van conectados al SPARTAN, de esta manera, quedaron disponibles del canal 1 al 12 para los sensores de nivel, aunque únicamente se emplearon en las pruebas de laboratorio 7 sensores.



Figura 3. 10 Sistema SPARTAN

La adquisición de los datos recabados por el SPARTAN se realizó a través del software de operación y configuración imc STUDIO, el cual permite capturar, procesar y visualizar las señales analógicas y digitales, además, es posible automatizar las mediciones con duraciones desde un segundo hasta un año. El procesamiento de los datos obtenidos por el imc STUDIO fue realizado en primera instancia con la ayuda del software imc FAMOS (Fast Analysis and Monitoring of Signals), el cual pertenece a la misma firma.

3.2 GRADOS DE LIBERTAD

3.2.1 ESPECTRO EMPLEADO

A través del análisis de una gran cantidad de espectros de oleaje se ha encontrado que éstos presentan características similares que pueden ser relacionadas mediante el empleo de parámetros físicos como velocidad, duración del viento y profundidad sobre la cual se propaga la onda. Las formas de un espectro de un estado de mar varían considerablemente dependiendo de varios factores, sin embargo la forma del mismo no es arbitraria ya que existen muchas propiedades físicas del oleaje que están representadas en él.

Un tren de oleaje enfocado es un grupo lineal de olas individuales, cada una con amplitud y frecuencia específica, cuya fase de cada ola se ajusta de tal manera que las crestas de todas las olas individuales coinciden en una posición y tiempo predeterminado. Previo a este lugar y tiempo, el tren de oleaje tiende a ser de menor tamaño (altura de ola) y de mayor duración. Emplear este método permite generar olas con diferentes condiciones de ruptura cambiando la ubicación del foco, amplitud y espectro empleado.

Para la realización de las pruebas se seleccionaron los espectros JONSWAP y Top-Hat. Esto con la finalidad de poder comparar la fuerza de impacto de la onda enfocada, teniendo cuidado de que solo se presentara una o dos olas sobre la berma. La duración de las pruebas fue de 39 s para el espectro JONSWAP y 128 s en el caso del Top-Hat.

3.2.1.1 JONSWAP

Hasselman en 1973 propuso el espectro JONSWAP, el cual fue generado con datos tomados a finales de la década de los setenta por un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP, por sus siglas en inglés (*Joint North Sea Wave Project*).

Este espectro fue generado para estados del mar formados por el viento, con fetch limitado y para una profundidad de agua indefinida. Yoshima Goda en 1988 derivó una expresión aproximada del espectro JONSWAP en términos de la altura de ola significativa H_s y de la frecuencia de pico espectral f_p . El espectro queda definido como:

$$S(f) = \frac{a H_s^2 f_p^4}{f^5} e^{-\left[1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right]} \gamma e^{-\left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]} \quad (\text{III.1})$$

$$a = \frac{0.0624}{\left[0.230 + 0.0336 \gamma - \frac{0.185}{1.9 + \gamma}\right]} \quad (\text{III.2})$$

γ Parámetro de forma 1 a 7, 3.3 default

σ 0.07 para $f < f_p$; 0.09 para $f > f_p$

f_p $f_p = \frac{1}{T_p}$

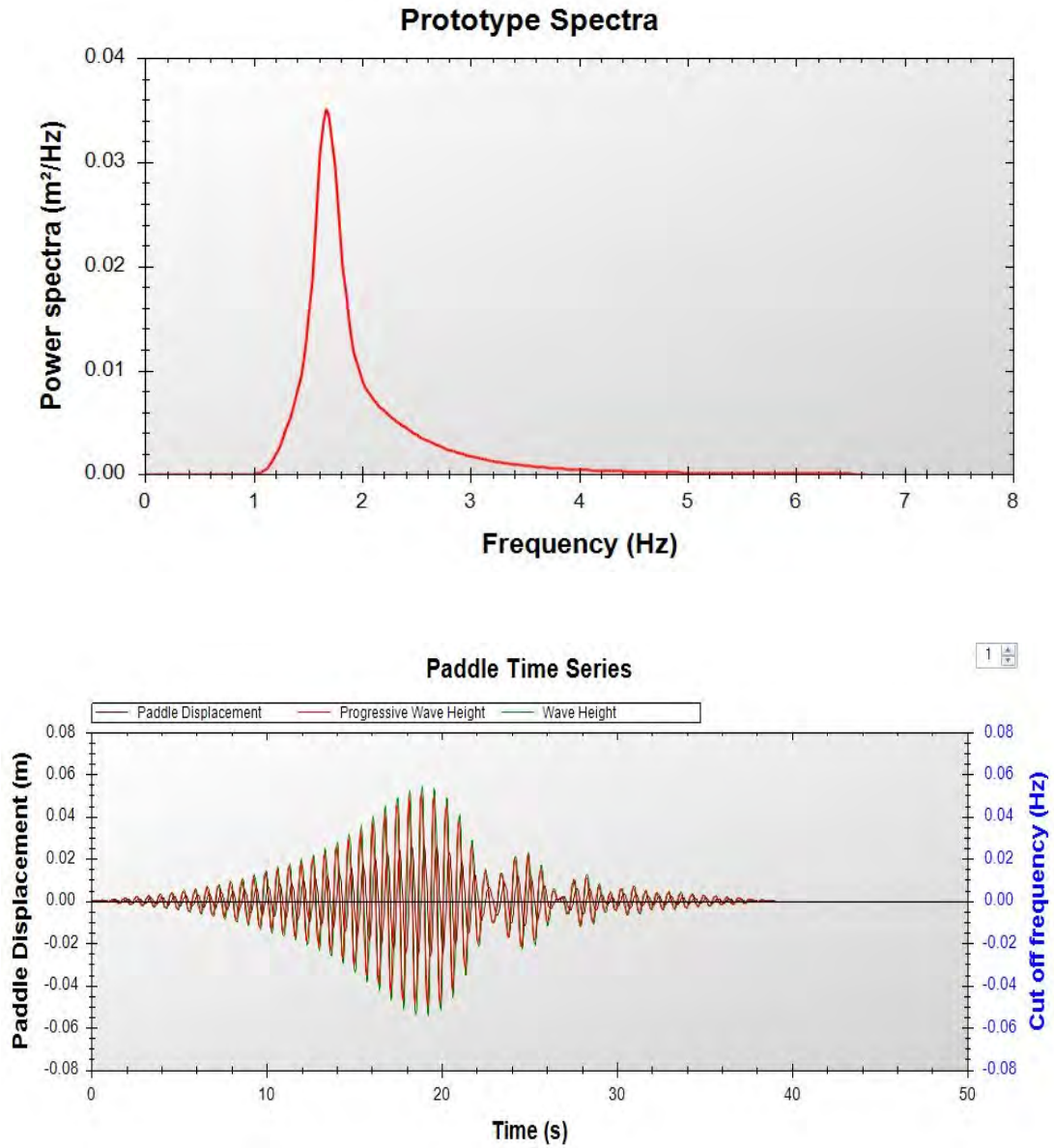


Figura 3. 11 Espectro JONSWAP

3.2.1.2 TOP-HAT

El espectro Top-Hat es recomendado para proporcionar una cantidad uniforme de energía a través de una gama de frecuencias definida.

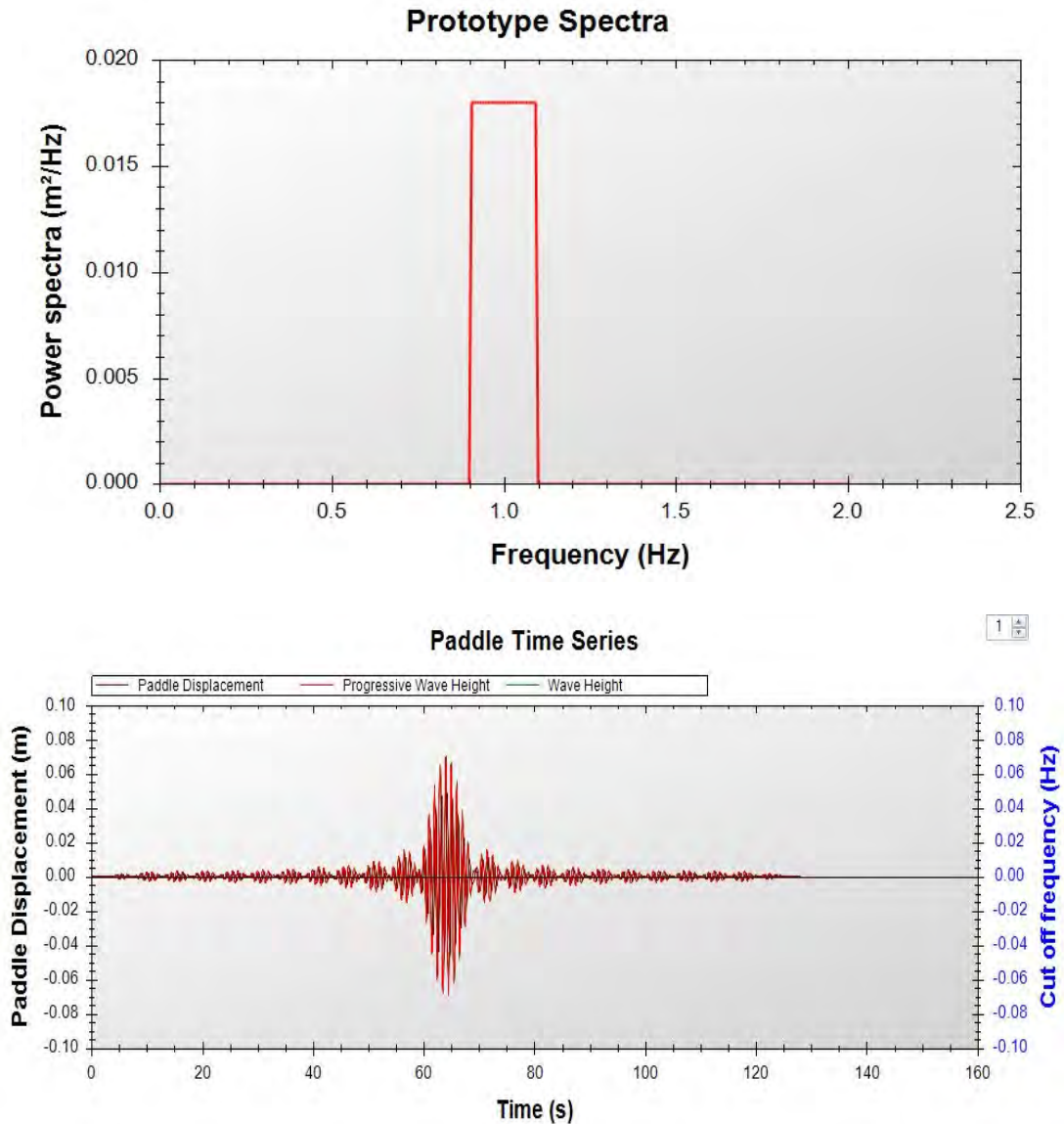


Figura 3. 12 Espectro Top-Hat

3.2.2 MATERIAL GRANULAR

Para la construcción del modelo físico que representa el perfil de fondo, se emplearon 3 diferentes tamaños de grano identificado como (d_{50} , Tamaño de partícula medio). La curva granulométrica y densidad de los materiales fueron determinados utilizando el Sistema de análisis granulométrico por imágenes CAMSIZER de la compañía Retsch Technology. Los materiales empleados fueron los siguientes:

Tabla 3. 2 Propiedades del Material

| Característica | Arena (Tipo 1) | Verde (Tipo 2) | Roja (Tipo 3) |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|
| d_{50} | 0.267 mm | 2.2 mm | 3.6 mm |
| Densidad kg/m^3 | 2850 | 2904 | 2805 |



Figura 3. 13 Tamaño de partícula del material

4.2.3 ALTURA DE LA ESTRUCTURA Y TIRANTE DE AGUA SOBRE LA ESTRUCTURA

La altura de la estructura H_R se fue variando para lograr condiciones diversas de análisis. Se inició con un $H_R = 26 \text{ cm}$ con incrementos de 2 cm hasta los 32 cm. Así mismo se varió el tirante de agua sobre la berma d (Tirante de agua al pie de la estructura) partiendo de 3 cm con incrementos de 2 cm hasta los 9 cm. Debido a la condición y altura del canal, el tirante de agua h (Tirante de agua del canal) estuvo limitado a un h máximo de 37 cm, solo permitiendo algunos tirantes d para la altura de estructura de 30 y 32 cm.

$$h = d + H_R \quad (\text{III.3})$$

$$d + H_R \leq 37 \text{ cm} \quad (\text{III.4})$$

$$H_R \text{ (cm)} \begin{cases} 26 \\ 28 \\ 30 \\ 32 \end{cases} \quad d \text{ (cm)} \begin{cases} 3 \\ 5 \\ 7 \\ 9 \end{cases} \quad (III.5)$$

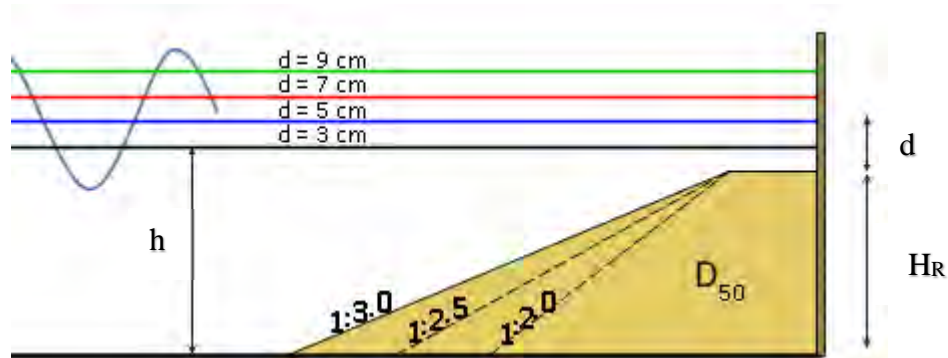


Figura 3. 14 Esquema de altura de estructura, tirante de agua y pendiente

3.2.4 PENDIENTE

Del mismo modo como se fue variando el tirante de agua sobre la estructura y la altura de la estructura, se realizaron pruebas modificando la pendiente α para cada H_R , teniendo cuidado de acomodar el material evitando oquedades o bultos en el relieve de la rampa. Las pendientes relaciones empleadas fueron:

$$\alpha = \begin{cases} 1 : 2.0 \\ 1 : 2.5 \\ 1 : 3.0 \end{cases} \quad (III.6)$$

3.2.5 CONDICIONES CONSTANTES DURANTE LAS PRUEBAS

En este estudio, se definieron condiciones iniciales de prueba para limitar las variables a las mencionadas anteriormente. Las condiciones base que se mantuvieron constante durante las 234 pruebas se explican a continuación.

a. Ancho de Berma

Para todas las condiciones de H_R y d se mantuvo un ancho de berma de 11 cm en la base del muro, como se muestra en la figura 3.15.

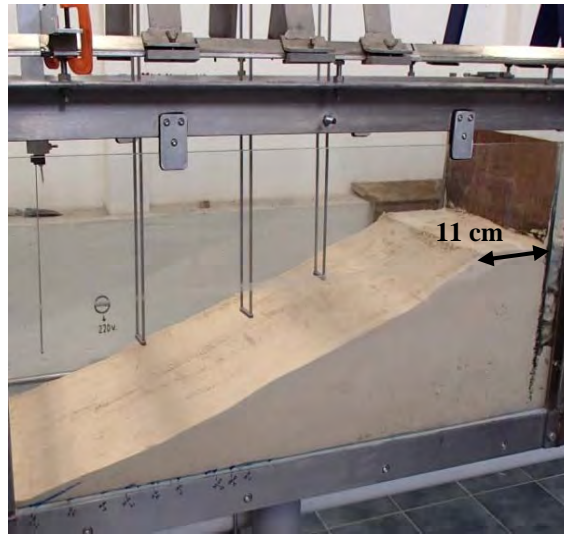


Figura 3.15 Ancho de Berma

b. Angulo y Posición del Muro

La ubicación del muro se mantuvo constante como se muestra en la Figura 3.3 a una distancia de 18.21 m desde la pala. Además el ángulo de inclinación del muro se fijó a 90° respecto al fondo del canal, esta condición le otorga a la estructura el adjetivo de Muro *Vertical*.

c. Ubicación de los Sensores y Vectrino

A pesar de variar la longitud de la base respecto al muro, la posición de los sensores de nivel y el Vectrino se mantuvieron fijos para cada prueba. Para definir la ubicación inicial de los sensores, se estableció en SN 04 al inicio de la pendiente para la estructura con altura de 30 cm y una pendiente 1:3.0 .

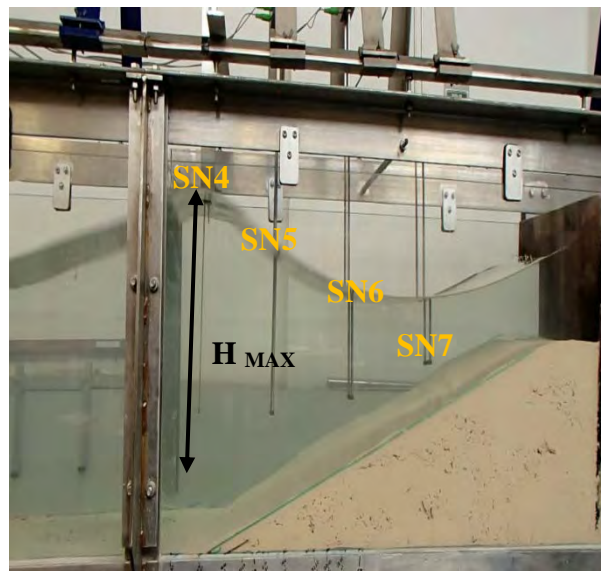


Figura 3.16 Ubicación de sensores de nivel sobre la rampa

d. Localización de la Onda Enfocada

Para la misma condición de estructura anterior, se programaron los espectros de tal manera que la onda enfocada se presentara sobre el SN 04. En el Capítulo 5, se presentará la información respectiva.

e. Procedimiento de medición de la socavación

Para determinar la socavación ocasionada debido a la influencia de la ola enfocada, se tomaron 3 medidas empleando un calibrador vernier digital, fijado a una estructura metálica que reposaba sobre los rieles superiores del canal, estableciendo un punto de referencia. Una vez colocado el material con la configuración correspondiente, se tomó la distancia del riel al perfil de la berma, tomando como primer dato al centro del ancho del canal, y dos en los extremos a 40 mm de la pared del canal, separado a 15 mm del muro. Posteriormente se procedió con la realización de la prueba, y se volvió a tomar datos en la misma ubicación y a una distancia de $20\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ separado del muro vertical (lugar donde se presentó la máxima socavación).



Figura 4. 17 Instrumento de medición de la socavación

3.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para poder comprender la influencia de la altura de ola, así como los demás parámetros (pendiente, material, tirante de agua) sobre la profundidad de la socavación al pie de un muro vertical, se llevaron a cabo 234 pruebas de laboratorio. Estas pruebas se realizaron empleando un modelo bidimensional 2D a relativamente pequeña escala. Como el tema de la escala suele ser polémico, pequeña escala se refiere a pruebas realizadas con altura de ola menor a 35 cm y con dimensiones del canal ya descritas.

3.3.1 PROCEDIMIENTO

La realización de los ensayos siguió la metodología que se describe a continuación. El proceso fue cíclico variando los grados de libertad mencionados.

a. Elección del Material (Arena, Verde, Rojo)

Para fines prácticos y agilizar los ensayos, se optó por realizar las 78 pruebas correspondientes a cada material empezando por el más fino (arena, verde, rojo).

- b. Establecer altura de la estructura H_R (26, 28, 30, 32)

Se procedió con la elección de la altura de la estructura, partiendo por la de menor tamaño para al ir cambiando el perfil, solo se tuviera que adicionar material a la rampa.

- c. Establecer pendiente α (1:20, 1:25, 1:30)

Al igual que con la altura de la estructura, se empezaron las pruebas definiendo una pendiente 1:20, manteniendo fijo H_R y acomodando la rampa con más material.

- d. Fijar nivel de agua h (29, 31, 33, 35, 37)

Una vez establecida la configuración de la rampa (α y H_R), se llenó el canal con el tirante de agua máximo correspondiente, por ejemplo, en el caso donde $H_R = 26 \text{ cm}$ para cualquier α , se procedía a llenar el canal con 35 cm de agua, cumpliendo que $d + H_R \leq 37 \text{ cm}$ ($9+26=35$), se realizaban los incisos (e, f, g, h, i) para ambos espectros y se disminuía d (2cm) hasta llegar a la condición de $d = 3 \text{ cm}$.

- e. Calibración de los Sensores de Nivel

Los sensores de nivel fueron calibrados mediante la determinación del valor correspondiente al voltaje cero igual al nivel medio del canal (h) y con ayuda del voltaje de salida de dos puntos conocidos.

- f. Nivelación (Determinar Perfil)

Se trazaba el perfil de la rampa sobre la pared del canal para tomar como referencia y lograr que la rasante de la rampa y la berma estuvieran lo más recto posible.

- g. Registrar valores iniciales del perfil de la berma

A continuación se procedía a la captura de los valores iniciales de la berma mediante el uso del vernier (proceso descrito en el apartado e. del Capítulo 4.2.5).

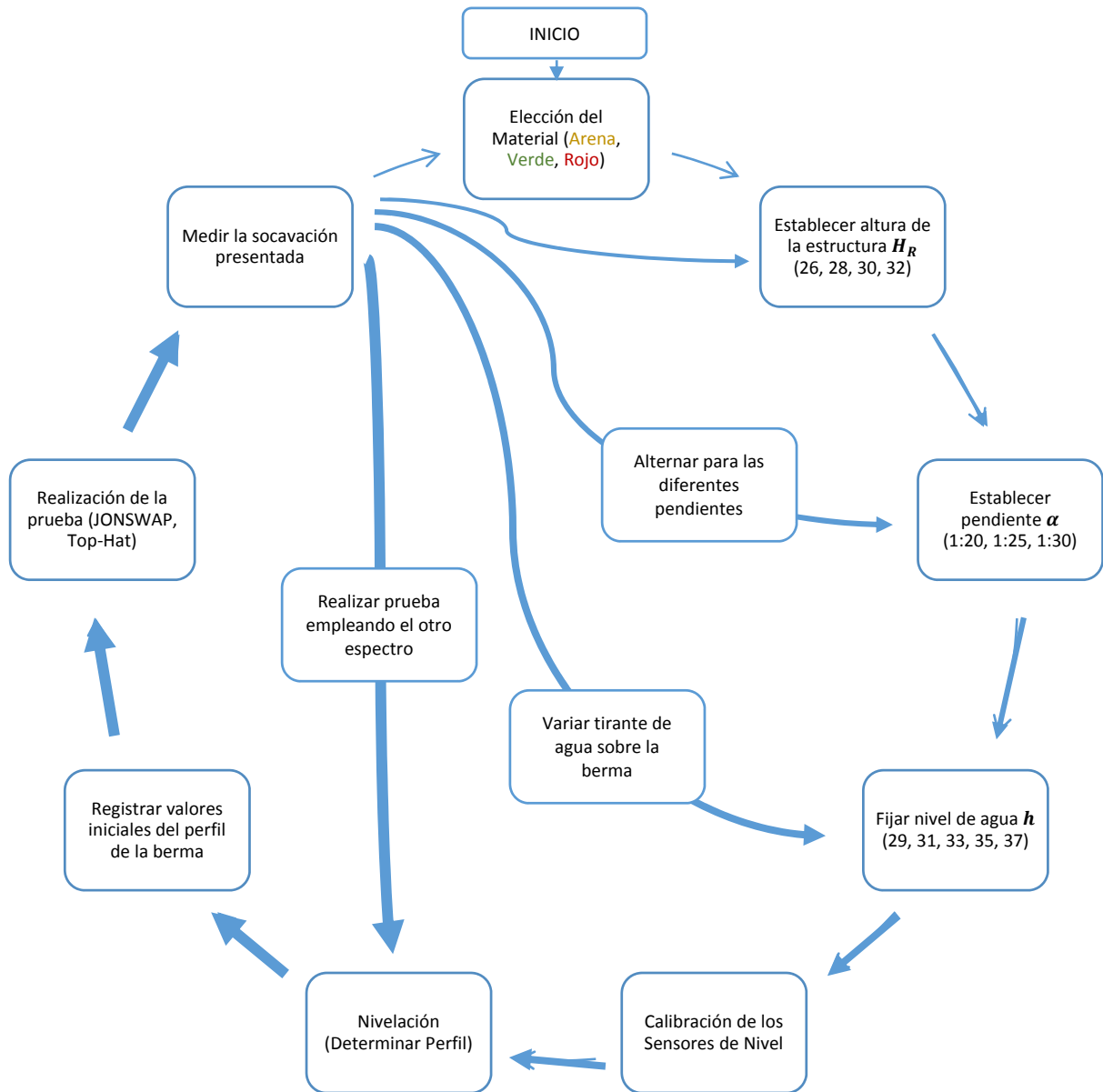
- h. Realización de la prueba (JONSWAP, Top-Hat)

Una vez establecido el modelo a probar, se procedió a lanzar el tren de oleaje (espectro), empezando por el JONSWAP por ser el de menor energía. Se registraban valores de la socavación y se regresaba el inciso f. para efectuar la prueba con el espectro Top-Hat.

- i. Medir la socavación presentada

Por último se midió la socavación presentada por la ruptura de la ola sobre la berma, y continua el proceso cíclico cubriendo primero espectros, luego tirante de agua, pendiente, altura de estructura y material.

4.3.2 *DIAGRAMA DE FLUJO*



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En las siguientes secciones se muestran los datos obtenidos durante la realización de los ensayos. En ella se analizan la respuesta de los materiales ensayados con diferentes pendientes, espectros, altura de ola, tirante de agua, y la respectiva influencia con la profundidad de la socavación.

Para simplificar el análisis, primero se hará la revisión del comportamiento de la superficie libre del agua para cada espectro. Después se presentarán los valores medidos de la socavación, la relación entre profundidad de socavación y altura de ola máxima, la influencia de la pendiente de la rampa con la erosión presentada al pie de la estructura, y la relación entre el material empleado y la socavación. Posteriormente empleando un análisis adimensional, se propone un modelo matemático simple para predecir la profundidad de socavación relacionando los parámetros de altura máxima de ola, longitud de onda y tirante sobre la berma.

El alcance del presente trabajo, no contempla el perfil de velocidades registrado con el vectrino.

4.1 ENSAYOS CON ESPECTRO JONSWAP

4.1.1 ESPECTRO Y ONDA ENFOCADA

La mayoría de los modelos disponibles en la literatura para la estimación de la erosión local están relacionados con el efecto de un tren de olas, sin embargo, las consecuencias debido a una o dos olas enfocadas en eventos extraordinarios pueden ser mayor.

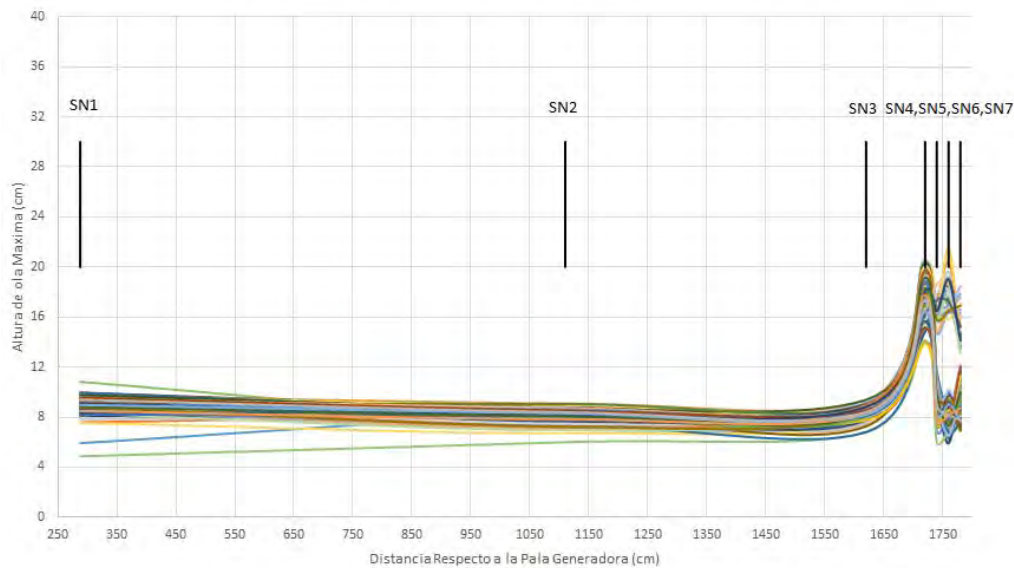


Figura 4. 1 Perfil de superficie libre del agua (H_{MAX}) para espectro Jonswap

Los valores de altura de ola máxima registrados mediante los sensores de nivel, se muestran en la Figura 4. 1, donde el tren de oleaje irregular Jonswap observado en cada prueba, resultó con menor altura de ola comparado con el espectro Top-Hat (Figura 4. 12). Al analizar las alturas máximas de ola para cada sensor, se puede ver que a lo largo del canal, los sensores SN1, SN2, y SN3 conservan aproximadamente la misma altura de ola registrada (8.5 cm), sin embargo, el comportamiento varía (aumenta) próximo al muro. En la Figura 4. 2 se puede ver a detalle la posición (SN4) donde se logró enfocar la onda con una altura de ola media de 18 cm, donde posteriormente decae la energía de la onda.

Lo que respecta a la altura de ola registrada por los sensores SN5, SN6 y SN7, los dos ramales visibles están condicionados al tirante de agua del canal h . El ramal superior concentra todas las pruebas con tirante de 29 y 31 cm, sin importar el ángulo de la rampa, ni el material en estudio.

El desarrollo del perfil de la ola se prolongó de la posición programada, haciendo que la rotura de la ola se presentara más próxima al muro, a comparación de los tirantes registrados en el ramal inferior. Para el resto de las pruebas con tirante de 33, 35 y 37 cm la rotura de la ola alcanzó su altura máxima en el sensor 4 como se había previsto y programado.

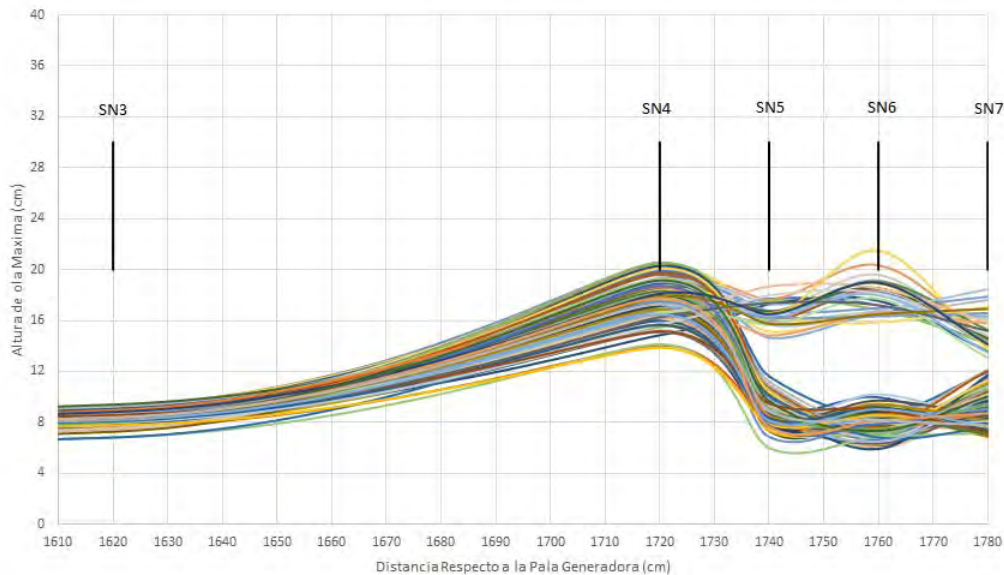


Figura 4. 2 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Jonswap)

4.1.2 RELACIÓN ENTRE S Y H_{MAX}

La socavación se registró mediante el procedimiento especificado en el Capítulo 3. Para cada ensayo realizado se midieron 3 valores, uno central y dos a 5 cm del vidrio, y se obtuvo el promedio de los dos valores máximos, debido a que se pretendió medir la socavación máxima posible. Los valores medidos se registraron en centímetros (**cm**) para un manejo fácil de la información y posteriormente permitir la normalización de los datos.

En las Figura 4. 3, Figura 4. 4 y Figura 4. 5, se presenta los valores obtenidos de altura de ola máxima contra la socavación máxima medida. En las 3 gráficas se puede observar el mismo comportamiento agrupando a la izquierda los ensayos para el material más grueso, socavando entre 0 y 0.7 cm, en el centro el material denominado como verde con granulometría media, presentando una socavación entre 0.15 y 1 cm; y a la derecha mayormente los ensayos de la arena, siendo este último con tamaño de partícula menor permitiendo la suspensión del grano por mayor tiempo y facilitando el arrastre en dirección de la pala con valores entre 0.1 y 1.5 cm.

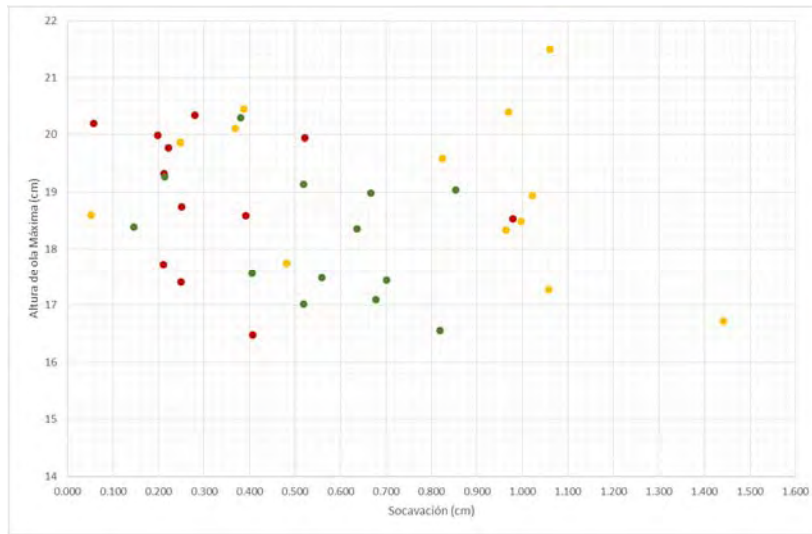


Figura 4. 3 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:2.0

De lo anterior se puede observar que a pesar de presentarse socavaciones máximas en la arena de hasta 1.5 cm, igualmente se presentan ensayos donde la socavación suele ser similar a los materiales más gruesos.

Al analizar la relación entre la altura de ola máxima y la profundidad de socavación, se observa que no existe relación directa, por ejemplo en la Figura 4. 3, se presenta la misma socavación de 0.4 cm para altura de ola de 20.5 cm en arena, 18.8 cm en grava roja y 17.6 cm en grava verde. Sin embargo, al tomar un solo material en este caso grava roja (Figura 4. 4), se observa que con una altura de ola de 20.5 cm y con una de 16.5 cm para un talud de 1:2.5, la socavación es la misma de 0.1 cm.

Este comportamiento se puede observar en las gráficas mencionadas para los 3 taludes propuestos. Para altura de ola medida en el sensor 4 de 16 cm se presenta una socavación desde 0.1 cm hasta 1.5 cm sin importar el talud observado. Y ese mismo rango de socavación se presenta para alturas de olas que rondan los 20 cm.

Es importante mencionar que los rangos de socavación máxima son similares para los 3 taludes, agrupando los ensayos con una menor socavación para los materiales con granulometría de mayor tamaño, en el centro (entre 0.15 y 0.9 cm) los de granulometría media, y a la derecha de las gráficas, los ensayos donde se permite el mayor arrastre de sedimento debido al tiempo de suspensión de las partículas.

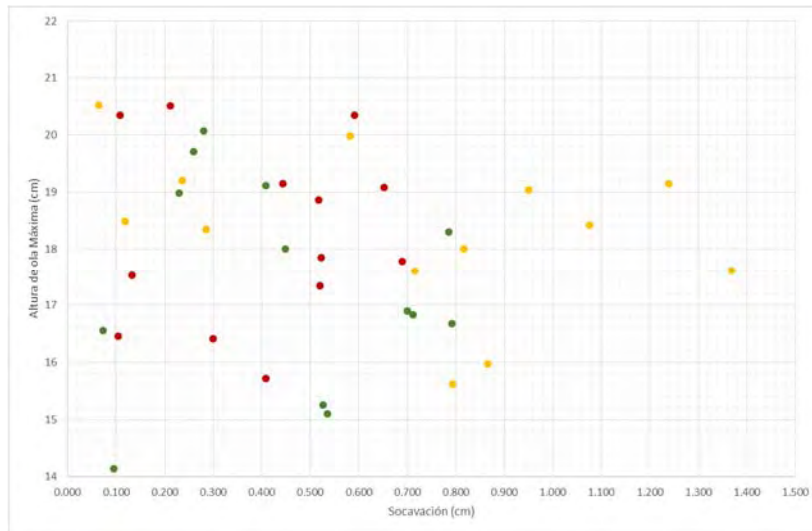


Figura 4. 4 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:2.5

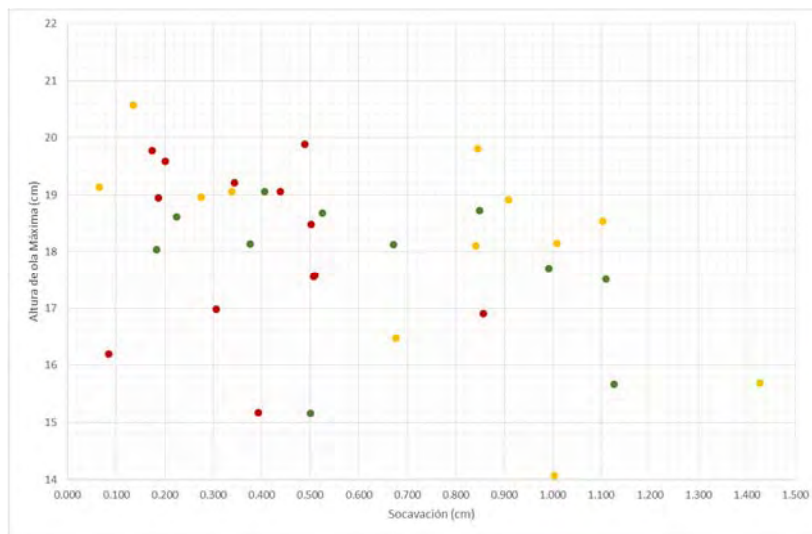


Figura 4. 5 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:3.0

4.1.3 INFLUENCIA DE LA PENDIENTE

En el capítulo 4.1.2 **RELACIÓN ENTRE S Y H_{MAX}** , se empezó a analizar la influencia de la pendiente sobre la profundidad de la socavación, sin embargo, se puede observar que el comportamiento de las Figura 4. 3, Figura 4. 4 y Figura 4. 5, es similar agrupando la gran mayoría de los ensayos en un rango de entre 0 y 1.5 cm en el eje de las abscisas y entre 14 y 22 cm aproximadamente en el eje de las ordenadas. En la Figura 4. 6, se puede observar los rectángulos anteriormente mencionados, en color negro la zona de cobertura de todas las pruebas, en rojo y pegado a la izquierda los ensayos realizados en grava roja, el rectángulo verde y haciendo un traslape con el material rojo, la grava con tamaño de partícula de 2.2 mm, y en amarillo la zona donde el comportamiento de la arena tiende a ser más disperso pues cubre el rango de las abscisas y las ordenadas.

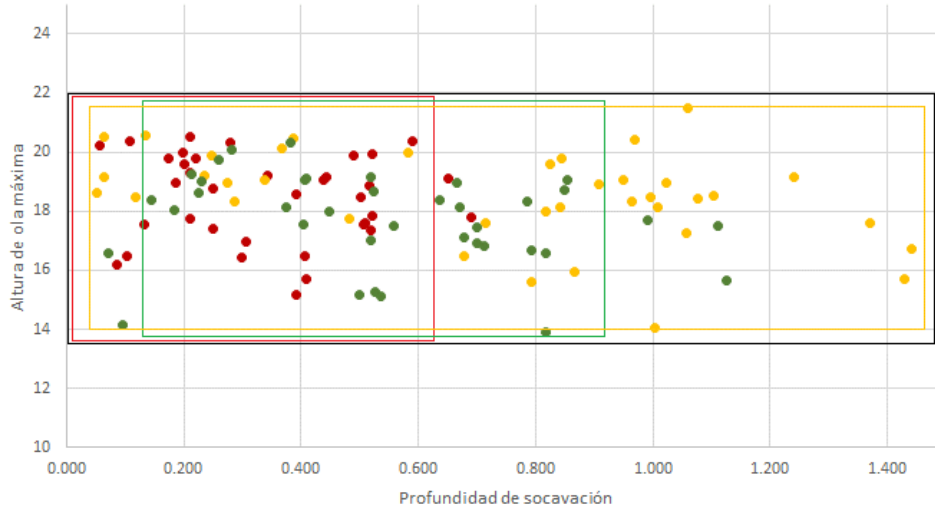


Figura 4. 6 Esquema de agrupación de los ensayos para espectro Jonswap y todas las pendientes

4.1.4 SOCAVACIÓN Y TIPO DE MATERIAL

Posterior a la realización de cada ensayo, el perfil inicial de la berma presentó un cambio de nivel representando socavación al pie del muro, y una acreción debido al transporte de material sobre la rampa.

En la Figura 4. 6, se observa que la socavación es mayor entre más fino es el material, pues éste al tener menor tamaño de partícula pasa más tiempo suspendido por la incidencia del oleaje, debido a la velocidad de caída del sedimento, permitiendo el arrastre del material en dirección a la pala, además el acomodo del material por el impacto al romper la ola tiende a ser uniforme a comparación con las gravillas gruesas y con ángulos de las caras del grano irregular.

4.1.5 RELACIÓN ENTRE LA SOCAVACIÓN Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Al realizar un análisis detallado de los ensayos, se optó por emplear relaciones adimensionales involucrando parámetros hidráulicos como son la longitud de onda en aguas profundas, el tirante de agua sobre la berma y la altura de ola máxima incidente.

La variación en la profundidad de socavación resultó ser proporcional a la profundidad del tirante de agua sobre la berma. La Figura 4. 7 muestra la variación relativa de la socavación $\frac{s}{L}$ contra la profundidad relativa al pie de la estructura $\frac{d}{H_{MAX}}$. Donde la longitud de aguas profundas está definida como

$$L = \frac{g T^2}{2 \pi} \quad (IV.1)$$

Para el espectro Jonswap, el periodo pico T fue de 0.6 s. Tomando la aceleración de la gravedad como $9.81 \frac{m}{s^2}$, la longitud de onda para todos los ensayos queda como:

$$L = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} (0.6 s)^2}{2 * \pi} \quad (IV.2)$$

$$L = 0.5621 m \quad (IV.3)$$

$$L = 56.207 cm \quad (IV.4)$$

En la Figura 4. 7, se muestra el comportamiento decreciente de la socavación relativa, con el aumento de la profundidad relativa al pie de la estructura. En color amarillo se muestran los ensayos de material más fino (Arena), en color verde la gravilla de tamaño de partícula medio (Grava verde) y en rojo los ensayos de tamaño de partícula mayor. Los ensayos con viñeta circular ● representan aquellas con pendiente 1:20, los de viñeta triangular ▲ representan aquellas con pendiente de la rampa 1:25, y los de forma cuadrada ■ indican los ensayos cuya pendiente de la rampa fue 1:30.

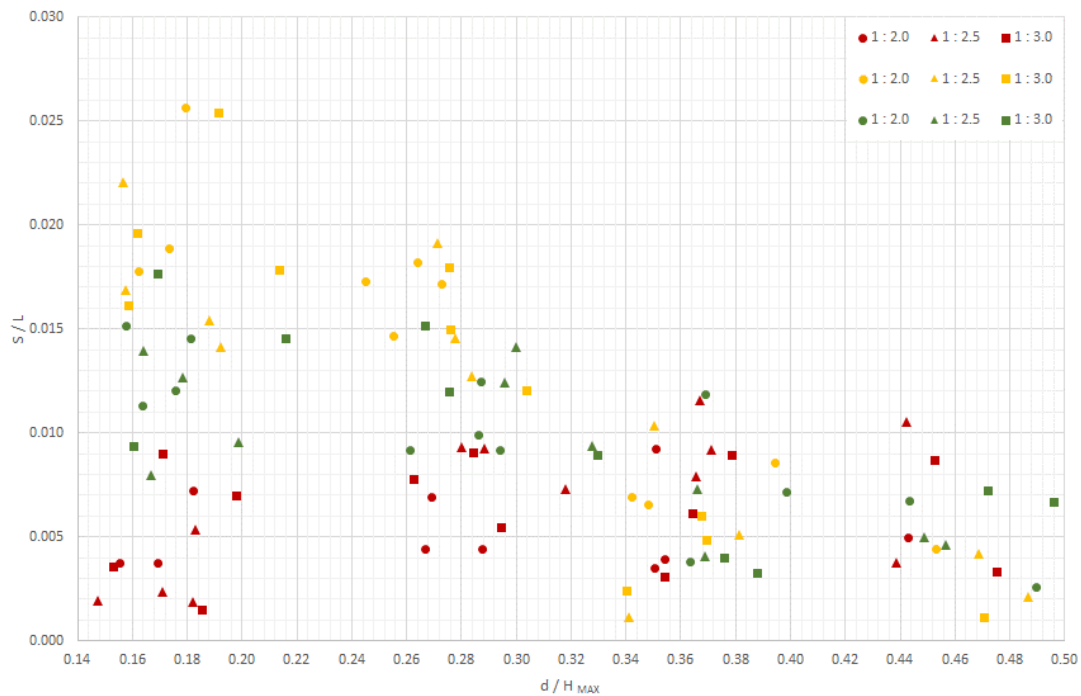


Figura 4. 7 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos para espectro Jonswap

Se puede observar en la Figura 4. 7 un comportamiento casi lineal tanto para la arena como la gravilla verde. Aplicando el modelo matemático de regresión lineal para la arena, se obtiene la línea de tendencia mostrada en la Figura 4. 8. La línea punteada representa los ensayos con pendiente de rampa 1:20, la línea

discontinua los ensayos con pendiente 1:25 y la línea continua representa los ensayos con pendiente de rampa 1:30. Para el mismo material se tiene aproximadamente la misma pendiente por lo que refuerza la idea de que la pendiente no afecta para este tipo de prueba.

De manera similar al comportamiento de la arena, los ensayos realizados con gravilla verde presentan una tendencia lineal y paralela sin que afecte la pendiente de la rampa, sin embargo, la pendiente de la regresión lineal en la gravilla verde es menor. Para los ensayos en gravilla roja no se pudo establecer un comportamiento lineal, pues para cualquier condición de pendiente de rampa, tirante de agua sobre la berma, y pendiente de la rampa, se presentó aproximadamente la misma socavación, presentándose solo un fenómeno de compactación del material debido a la incidencia de la ola enfocada.

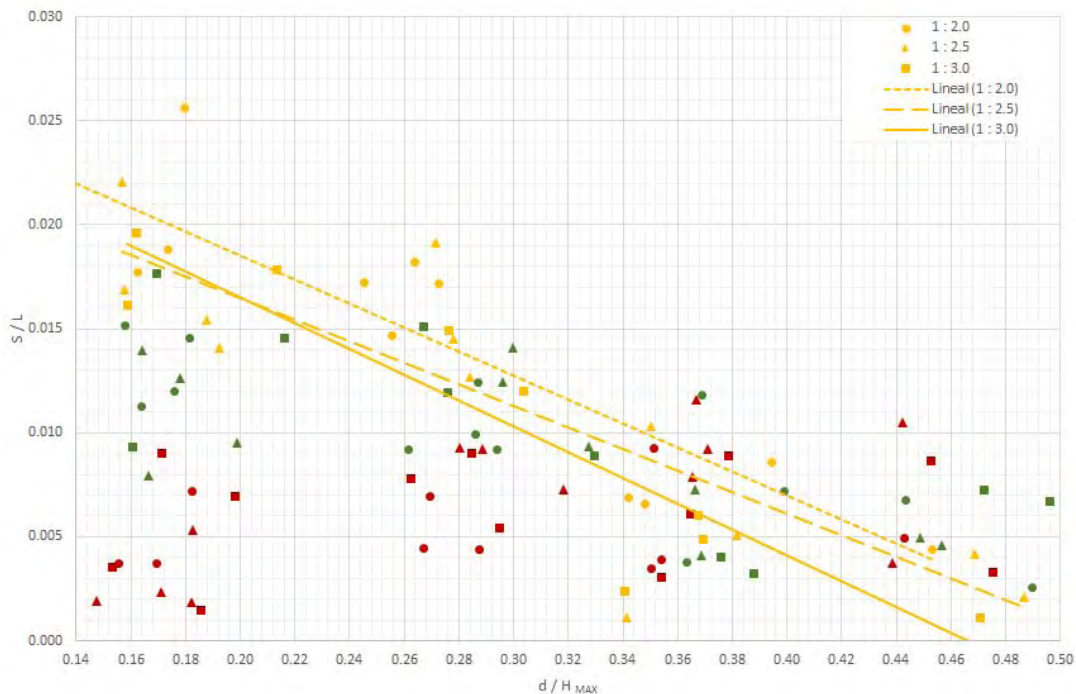


Figura 4. 8 Regresión lineal para arena y pendiente específica (Jonswap)

A continuación se presentan los modelos establecidos para predecir la profundidad de la socavación frente a un muro vertical, para material con tamaño de partícula de 0.267 mm y 2.2 mm.

- Modelo de predicción de la profundidad de la socavación para material Tipo 1

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.0576 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0288$$

(IV.5)

- Modelo de predicción de la profundidad de la socavación para material Tipo 2

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.027 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0177$$

(IV.6)

Debido al tipo de material y los resultados de los ensayos con gavilla roja (Tipo 3), no se puede concluir ningún comportamiento para la prueba establecida.

En la Figura 4. 9, se puede observar la intersección de las líneas de tendencia para los tres materiales. Para valores de $\frac{d}{H_{MAX}} > 0.30$, el comportamiento del material ante la incidencia del oleaje no se puede predecir con las ecuaciones mencionadas anteriormente.

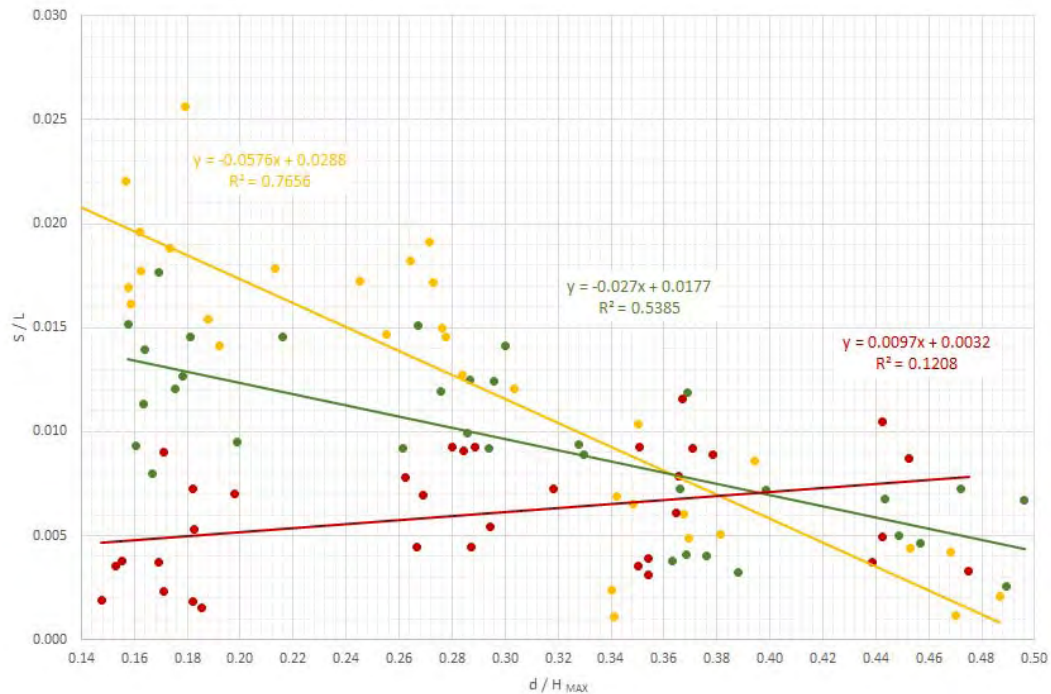


Figura 4. 9 Representación del modelo de predicción de la socavación para cada material (Jonswap)

Se observó que durante los ensayos realizados, la rotura de la ola sobre la berma se desarrollaba de manera efectiva (voluta) para tirantes d de 3 y 5 cm. Sin embargo para aquellos ensayos donde el tirante fue de 7 y 9 cm, el vórtice generado solo interactuó con el tirante de agua y no con el material de la berma como el mostrado en la Figura 4. 10, generando un proceso de compactación y no de erosión al pie del muro.

Este fenómeno de compactación se presentó para todos los ensayos con tirante sobre la berma de 7 y 9 cm. Entre mayor fue el tirante la socavación presentada fue menor debido a que la transferencia de energía en el medio se fue perdiendo. Cabe aclarar que para todos los ensayos realizados con el espectro Jonswap, la rotura de la ola se llevó a cabo en forma de voluta como se verá más adelante.

Las ecuaciones IV.5 y IV.6 están limitadas para:

$$0.01 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.35 \quad (IV.7)$$

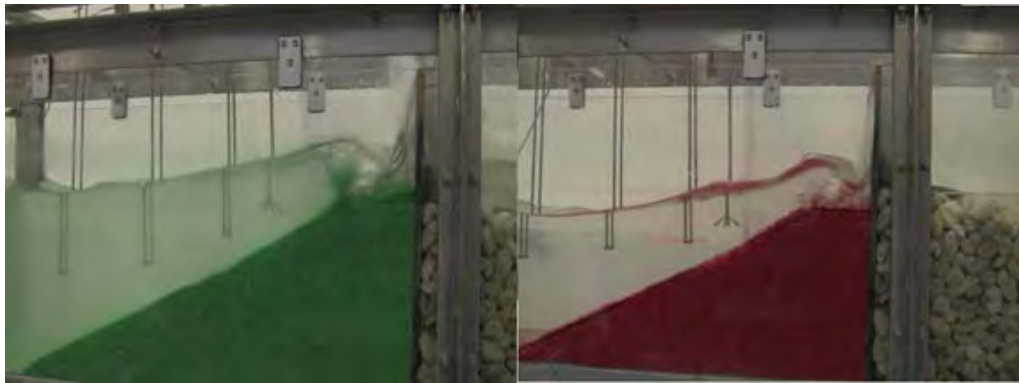


Figura 4. 10 Rotura de ola sobre la berma en forma de voluta para espectro Jonswap

4.1.6 NÚMERO DE IRIBARREN

La Figura 4. 11 muestra la variación de la socavación relativa contra el número de Iribarren, éste se calculó empleando la ecuación (II.1). Se observa que para los ensayos realizados con el espectro Jonswap, los parámetros obtenidos del número de Iribarren se encuentran en un rango entre 0.5 y 1.0, que de acuerdo con lo establecido en la bibliografía, se presenta una rotura en forma de voluta para valores de:

$$0.5 < Ir < 3.0$$

En esta misma gráfica se observan las dos zonas mencionadas donde se agrupan los ensayos con tirante sobre la berma de 3 y 5 cm, y en la parte inferior aquellos con tirante de 7 y 9 cm. El efecto de socavación en el material Tipo 3 (gravilla roja), se ve que es menor debido al gran tamaño de partícula, por lo que la ola al incidir, la suspensión del material es mínimo y el que se logra suspender se precipita rápidamente impidiendo un transporte de sedimento como se prevé para materiales finos.

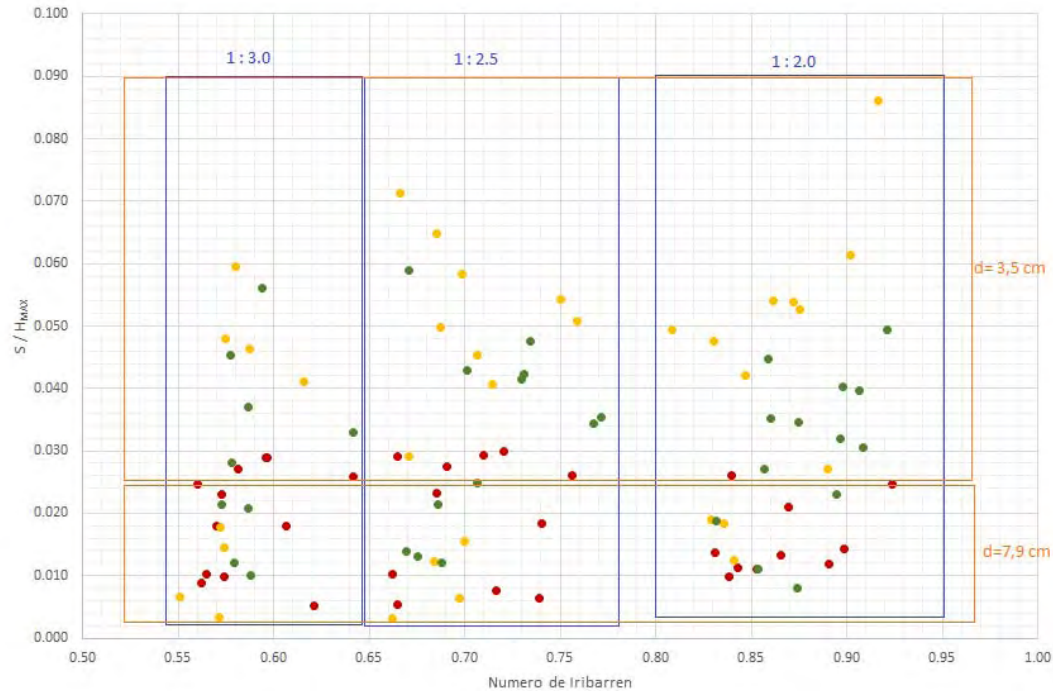


Figura 4. 11 Socavación relativa contra número de Iribarren para espectro Jonswap

4.2 ENSAYOS DEL ESPECTRO TOP-HAT

Del mismo modo como se presentaron los resultados obtenidos para los ensayos con el espectro Jonswap, a continuación se reporta la información obtenida para los ensayos realizados con el espectro Top-Hat.

4.2.1 ESPECTRO Y ONDA ENFOCADA

Al comparar el perfil de altura máxima de ola medidos mediante los sensores de nivel del espectro Jonswap contra los del Top-Hat, se observa en primera instancia que este espectro transporta mayor energía a lo largo del canal. En la Figura 4. 12 se observa que la altura de ola máxima registrada por los SN1, SN2 y SN3 se conserva constante a lo largo del canal con un valor aproximado de 13 cm comparado con la media del espectro Jonswap de solo 8.5 cm. El comportamiento del perfil del agua para los sensores restantes se volvió a agrupar en dos ramales (Figura 4. 13).

Para el ramal inferior la altura de ola media mediada en el sensor de nivel 4 fue de 29 cm mientras que la altura de ola máxima registrada en el sensor de nivel 7 fue de 30 cm.

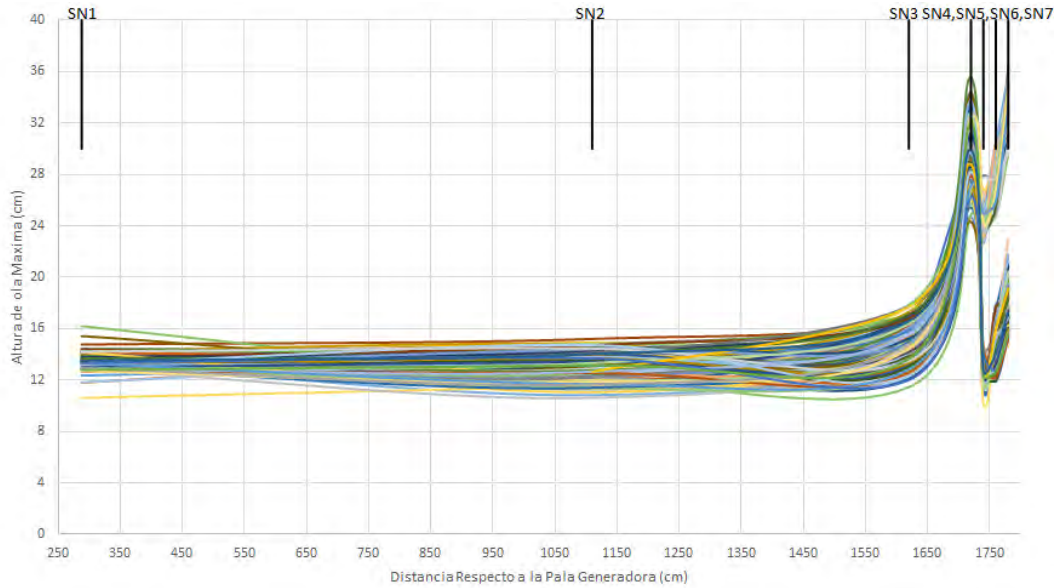


Figura 4. 12 Perfil de superficie libre del agua (H_{MAX}) espectro Top-Hat

En la Figura 4. 13 se observa cómo se logra enfocar la altura de ola máxima en los sensores SN4 y SN7, como se mencionó anteriormente, el ramal donde las alturas de ola máximas se ubican en el SN4 está condicionado para aquellos ensayos donde el tirante de agua del canal h fue de 33, 35 y 37 cm (ramal inferior). Para el ramal superior cumple el mismo comportamiento que los ensayos del espectro Jonswap, abarca todos los ensayos con un tirante del canal h de 29 o 31 cm, aunado a que la altura de ola máxima para estos ensayos fue registrada por el SN7.

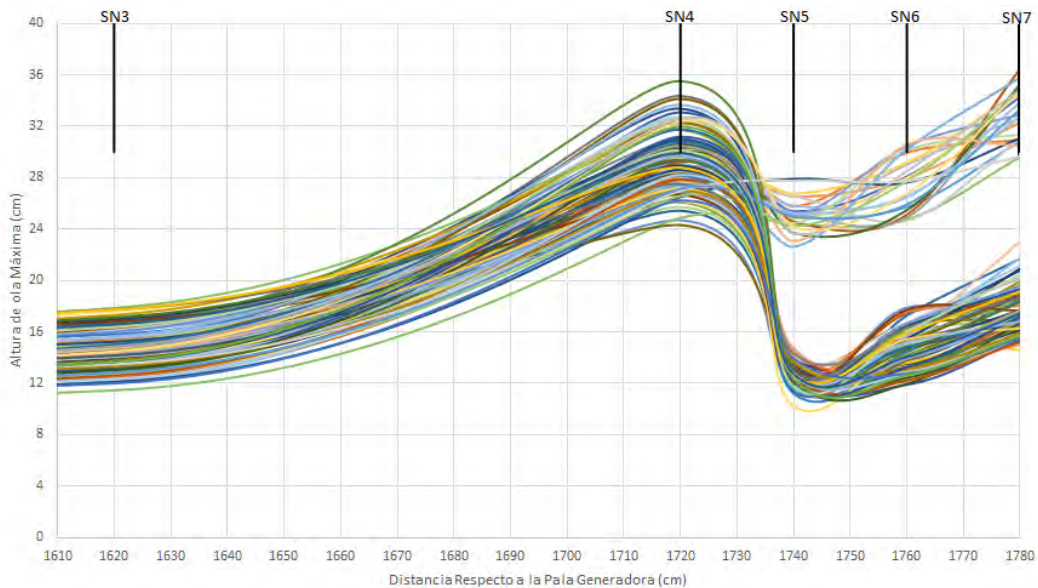


Figura 4. 13 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Top-Hat)

4.2.2 RELACIÓN ENTRE S Y H_{MAX}

La socavación se registró mediante el mismo procedimiento que para el espectro Jonswap. En la Figura 4. 14 se presentan los resultados obtenidos de la altura de ola máxima para cada ensayo contra el promedio de los dos valores máximos medidos. En esta figura se observa que de igual manera como en el espectro Jonswap, la gravilla roja de tamaño de partícula mayor es el material con el que sin importar la altura de ola la socavación medida es la menor. A diferencia de los ensayos con el otro espectro, en el Top-Hat la socavación tiende a ser similar para los materiales restantes.

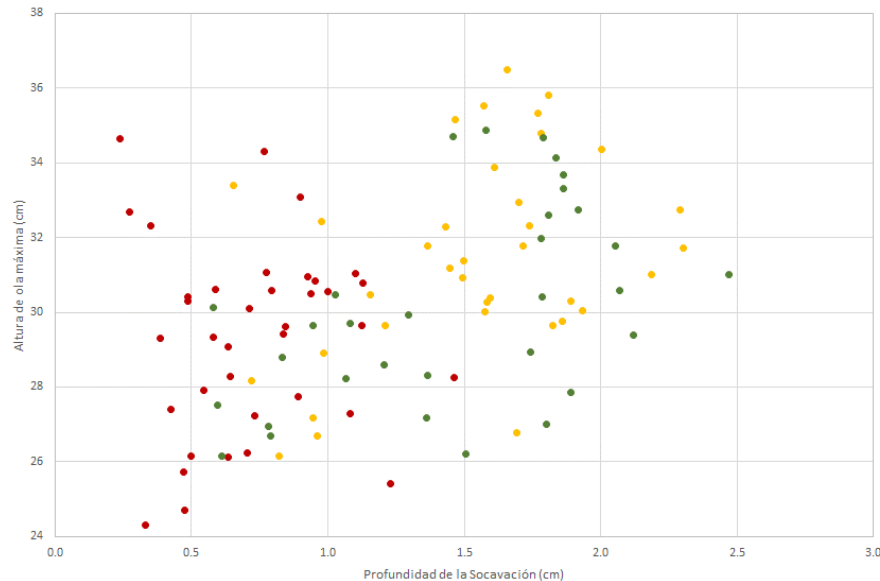


Figura 4. 14 Altura de ola máxima contra socavación para espectro Top-Hat

Para estos ensayos se observa que el rango de socavación varía comparado con el otro espectro y va de 0.25 cm hasta los 2.5 cm. Esta variación se debe a que el espectro transmite más energía logrando mayor altura de ola enfocada.

Al observar la socavación para la arena y la gravilla verde parecen tener el mismo comportamiento presentando una socavación entre 0.5 y 2.5 cm. Es importante mencionar que para ambos espectros, solo se presenta socavación del material o compactación más en ningún ensayo se registró acreción al pie del muro.

4.2.3 INFLUENCIA DE LA PENDIENTE Y TIPO DE MATERIAL

En lo que respecta a la influencia de la pendiente con la profundidad de la socavación, no afecta directamente pues el desarrollo del perfil de la onda se lleva a cabo previo a la rampa donde se alcanza la altura de ola máxima limitando la acumulación de energía. Como en ambos espectros se enfocó la onda en el SN4 sin importar la configuración de la rampa, el proceso de rotura por voluta, se lleva a cabo a lo largo de la rampa donde se disipa la energía limitando el control del fenómeno.

Al analizar los ensayos donde la altura de la estructura H_R fue de 26 o 28 cm y con ángulo de talud 1 : 2.0, la rampa inicia 38 cm delante de donde se enfocó la onda, aproximadamente sobre el SN6, por lo que la rotura se lleva a cabo sobre el mismo fondo, sin la intervención de la rampa.

Por lo que respecta a los materiales empleados, para ambos espectros, la gravilla roja es la menos concluyente. Debido al tamaño de partícula, la suspensión de este material se ve limitado y aquellas partículas que logran suspenderse tienden a precipitarse inmediatamente.

Sin embargo el comportamiento de socavación para la arena y gravilla verde es similar debido a que por la incidencia del oleaje y la energía que esta aporta al romper, suspende mayor cantidad de material facilitando el arrastre.

4.2.4 RELACIÓN ENTRE LA SOCAVACIÓN Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Se procedió a realizar la obtención de los parámetros adimensionales usados para el espectro Jonswap. Sin embargo para la obtención de la longitud de onda, se tenía una frecuencia máxima de 1.1 y una mínima de 0.9. Calculando con un valor medio de frecuencia de 1 y su inverso un periodo de 1 s. Empleando la ecuación IV.1 se obtuvo la longitud de onda como sigue:

$$L = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} (1 s)^2}{2 * \pi} \quad (IV.8)$$

$$L = 0.5 m \quad (IV.9)$$

$$L = 50.0 cm \quad (IV.10)$$

En la Figura 4. 15 se muestra el comportamiento parabólico de la socavación relativa, teniendo como punto de inflexión para arena y gravilla verde un rango de $0.13 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.18$. En esta misma imagen se muestra en color amarillo los ensayos realizados con el material fino (Tipo 1), en color verde los de tamaño de partícula de 2.2 mm (Tipo 2), y en rojo aquellos ensayos realizados con gravilla roja o material Tipo 3.

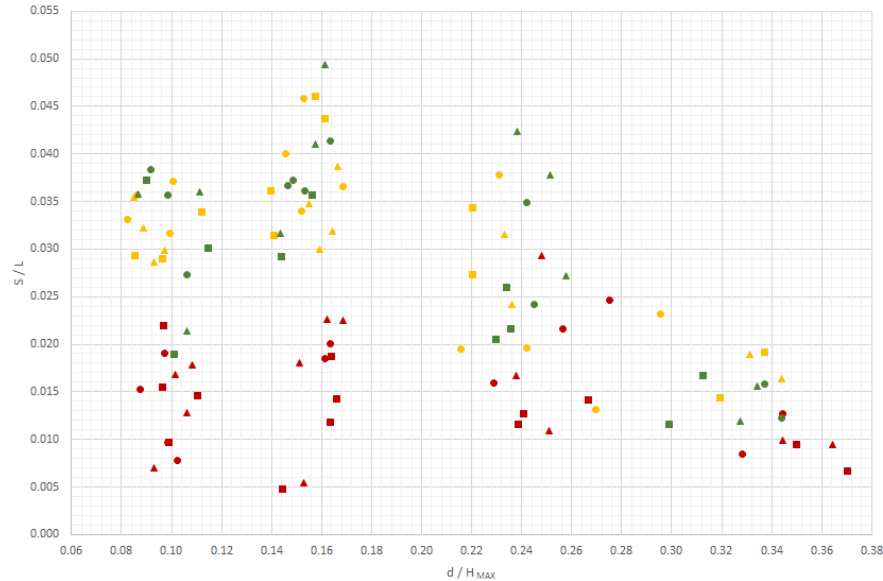


Figura 4. 15 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos (Top-Hat)

Del mismo modo como la Figura 4. 7, los ensayos con viñeta circular ● representan aquellas con pendiente 1:20, los de viñeta triangular ▲ representan aquellas con pendiente de la rampa 1:25, y los de forma cuadrada ■ indican los ensayos cuya pendiente de la rampa fue 1:30.

En la Figura 4. 16 empleando el modelo matemático de mínimos cuadrados mediante la paquetería de Excel, se obtuvo en línea punteada el modelo para arena con pendiente de la rampa 1 : 2.0, en línea discontinua el modelo para el mismo material y pendiente 1 : 2.5 y en línea continua para pendiente de la rampa 1 : 3.0. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para los restantes materiales observándose que el comportamiento de la gráfica tiende a ser el mismo para cada respectivo material, por lo que se llevó a obtener una sola ecuación por material empleado para la rampa (Figura 4. 17).

A continuación se presentan los modelos establecidos para la predicción de la profundidad de la socavación frente a muro vertical empleando un espectro de olas Top-Hat.

- Modelo para predicción de la profundidad de la socavación para material Tipo 1

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.4968 \left(\frac{d}{H_{MAX}} \right)^2 + 0.13 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0256 \quad (IV.10)$$

- Modelo para predicción de la profundidad de la socavación para material Tipo 2

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.7346 \left(\frac{d}{H_{MAX}} \right)^2 + 0.2338 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0166 \quad (IV.11)$$

Debido al tipo de material y los resultados de los ensayos con gravilla roja (Tipo 3), no se puede concluir ningún comportamiento para la prueba establecida.

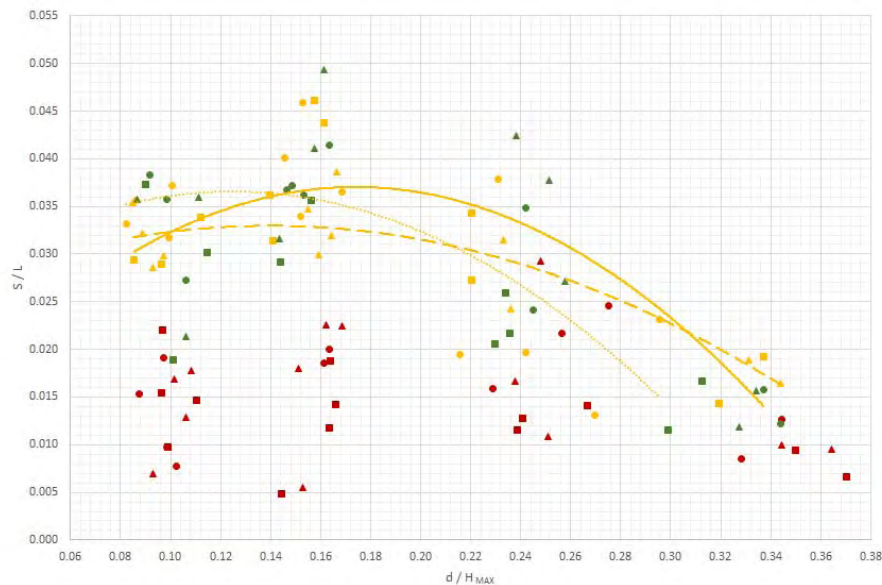


Figura 4. 16 Análisis de regresión cuadrática para arena y pendiente específica (Top-Hat)

En la Figura 4. 17 se puede observar que existe un punto de infección para las líneas obtenidas, donde se presenta la socavación mayor en una condición donde el tirante sobre la berma es de 5 cm, o para un tirante sobre la berma relativo de:

$$0.13 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.18 \quad (IV.12)$$

Esta condición se considera la crítica y debe evitarse para prevenir la falla del muro vertical. Sin embargo para el rango $0 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.13$ y $0.18 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.26$ también debe tenerse cuidado pues la socavación relativa tiende a ser alta. En el caso donde el tirante relativo sobre la berma excede 0.26 solo se presenta un desplazamiento mínimo del material y compactación del mismo, como se explicó para el espectro Jonswap y tirante sobre la berma de 7 y 9 cm.

Ambas ecuaciones (IV.10 y IV.11) son validas para valores de tirante relativo sobre la berma de:

$$0.05 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.35 \quad (IV.12)$$

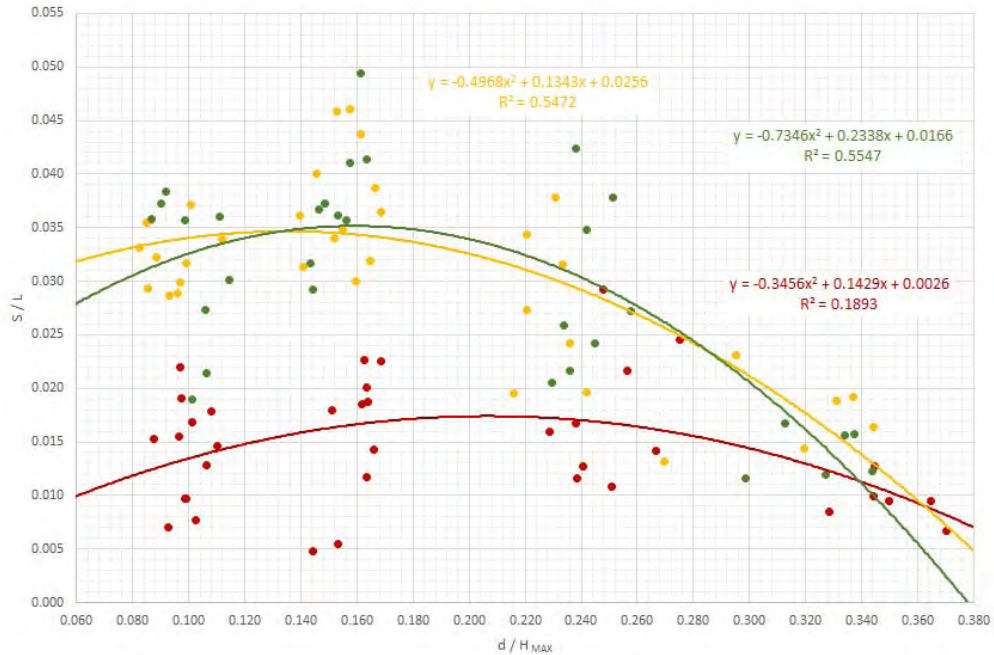


Figura 4. 17 Representación del modelo de predicción de la socavación para espectro Top-Hat

4.2.5 NÚMERO DE IRIBARREN

La Figura 4. 18 muestra la variación de la socavación relativa contra el número de Iribarren, el cálculo se realizó empleando la ecuación II.1. Se observa que la rotura de la ola se llevó en forma de voluta para todos los ensayos realizados con el espectro Top-Hat.

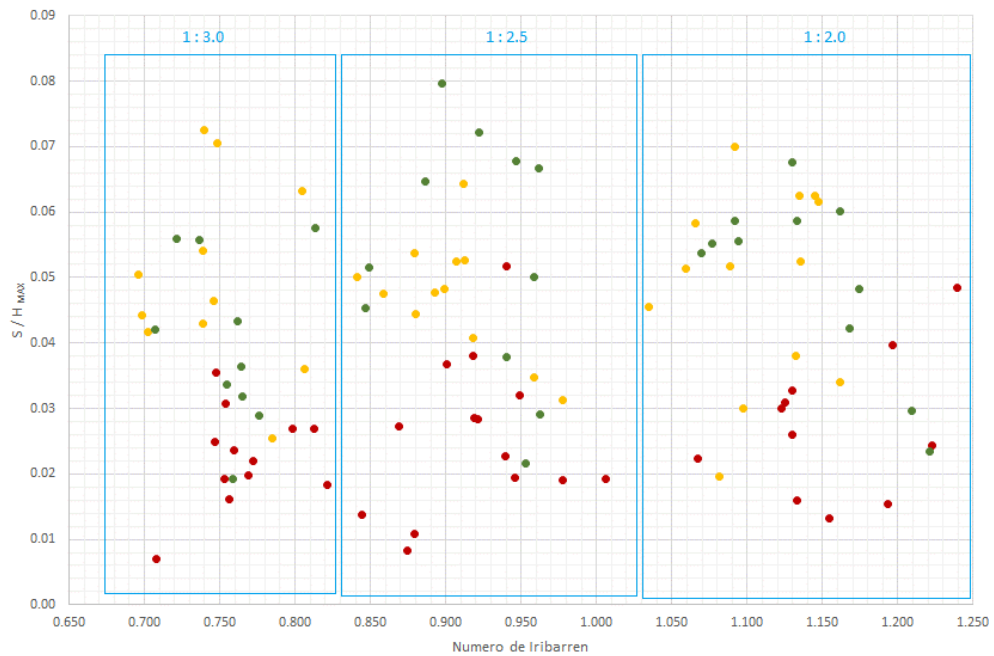


Figura 4. 18 Socavación relativa contra número de Iribarren para espectro Top-Hat

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El trabajo aquí presentado es parte de un estudio que se llevó a cabo a nivel mundial para analizar el daño que sufren las obras de protección costera como son el muro (en este trabajo muro vertical) y prevenir los costos de reparación de este o el daño que se pueda presentar debido a la pérdida de la función que desempeñan.

- En primer lugar se puede ver en la figura 5.1 la variación en el perfil del agua correspondiente a cada espectro. En la izquierda se presenta un ensayo (AJ30305) con el espectro Jonswap donde la altura de ola máxima se registra en el SN4 en color amarillo en este caso de 20 cm. A la derecha y con misma escala en el eje de las ordenadas se puede ver el ensayo (VJ30305) con el espectro Top-Hat de mayor energía presentando una altura de ola máxima en el SN4 (color amarillo) de 32 cm.

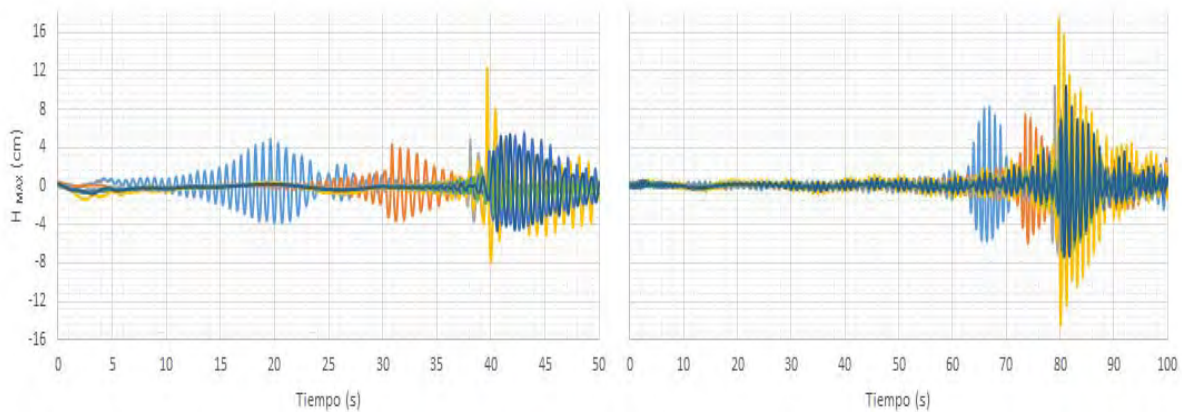


Figura 5.1 Condiciones Hidrodinámicas para ambos espectros

- La predicción de la onda enfocada para ambos espectros y todos los ensayos se obtuvo en el SN4, sin embargo en los registros para el espectro Top-Hat, alcanzó la altura de ola máxima en el SN7 para los tirantes de agua del canal de 29 y 31 cm.
- De los materiales empleados, se concluye que entre más fino es, o menor sea su tamaño de partículas, este tiende a suspenderse más fácilmente permitiendo el transporte del sedimento y ocasionando una mayor socavación.
- Para los ensayos realizados la pendiente no afecta la profundidad de la socavación pues el desarrollo del perfil de la onda se lleva a cabo previo a la rampa donde se alcanza una altura de ola máximo y al llegar a este punto empieza el proceso de rotura de la ola. Para ciertas condiciones de la rampa ($H_R = 26 \text{ cm}$ y $\alpha 1:2.0$), la ola rompe hasta 38 cm antes de entrar en contacto con la rampa.

- Realizando el cálculo del Número de Iribarren, se concluye que los 234 ensayos obtienen un valor entre $0.55 < Ir < 1.25$, lo cual indica la bibliografía revisada que la rotura de la ola se lleva a cabo de manera de voluta.
- De acuerdo con lo que CHESNUTT y SCHILLER dicen, se refuerza la idea de que la profundidad de la socavación aumenta si la altura de ola incidente aumenta. Esto se puede ver en los dos espectros, si se emplea el Jonswap donde se tiene una altura máxima de ola de 18 cm se obtuvo una socavación máxima de 1.5 cm, mientras que empleando el espectro Top-Hat con altura media máxima de ola de 30 cm, alcanzó socavación hasta de 2.5 cm
- Compartiendo lo que concluye Sato en su trabajo acerca de que “la profundidad máxima de socavación en condiciones de tormenta, se presenta cuando el muro es construido en la intersección del nivel medio del mar con la línea de costa”, se puede ver que entre menor es el tirante de agua sobre la berma (3 cm), la socavación tiende a ser mayor.

REFERENCIAS

- Beca International Consultants (2010), Shoreline Protection Guidelines Prepared for Government of Kiribati, *Beca International Consultants*, Kiribati, 37 pp
- Chávez, V (2013), Comportamiento de suelos marinos bajo la acción del oleaje, tesis de maestría, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, México, DF, 100
- Flower, J.E. (1992), Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Seawalls. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, U.S., Technical Report
- Gutiérrez, F. (2014), Análisis Experimental de la Interacción Oleaje-Suelos Finos, tesis de licenciatura, *Facultad de Ingeniería, UNAM*, México, DF, 109
- Hunt-Raby, A. (2011), Experimental measurement of focused wave group and Solitary Wave Overtopping, *Journal of Hydraulic Research*, Vol 49, No 4, 450-464
- HR Wallingford, (2014), Software Manual for V 2.24-1, *HR Merlin Wave Generation Program*, Oxfordshire, United Kingdom, 73 pp
- Jayarathne, R, Mendoza, E, Silva, R (2015), *Laboratory Modelling of Scour on Seawalls*, University of East London, Engineering Institute, UNAM.
- Kraus, N., McDougal, W (1996), The Effects of Seawalls on the Beach: Part I, *Journal of Coastal Research*, Vol 12, No 3, Lauderdale, Florida, 691-701
- Mutlu, B. (2002), Scour at Seawalls; en *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, World Scientific Publishing, Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 17, Singapore, 399-422
- Ohio Department of Natural Resources (2011), Ohio Lake Erie Shore Erosion Management Plan, en *Ohio Coastal Design Manual*, Sandusky, Ohio
- Ríos, AG (2015), Estudio de la interacción entre tuberías submarinas y suelos finos en presencia de oleaje, tesis de licenciatura, *Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM*, México DF, 147
- Salles, P y Appendini, CM (2014), Vulnerabilidad y Peligro en las Costas Mexicanas, *UNAM, Instituto de Ingeniería, Unidad Académica Sisal, Yucatán*, México, 10 pp
- Sheng-Wen, T y Wei-Miu, L (1999), Effects of Seawalls Slopes on Scour Depth, *Journal of Coastal Research*, Vol 15, No 4, Taiwan, 958-990
- Silva, R y Salles P (2004), Infraestructura de Protección Costera; en *El Manejo Costero en México*, Rivera, E, Villalobos, J, Azuz, I y Rosado, F (Editores), SEMARNAT, Quintana Roo, 179-190
- SNET (2010), Dinámica Costera, *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, Sección Educativa Oceanografía, El Salvador, 3pp
- Sutherland, J y Obhrai, C (2006), *Laboratory Test of Scour at a Seawall*, Laboratory test of Scour at a seawall, HR Wallingford, UK

Tiedeman, S. y Allsop, W. (2012), *A Demountable Wave Absorber for Wave Flumes and Basins*, HR Wallingford, Queen's University Belfast, Italia

U.S. Army Corps of Engineers (2002), *Coastal Engineering for Environmental Enhancement*; en *Coastal Engineering Manual*, Washington, D.C.

ANEXO A

| ID | TIPO | d ₅₀ | HR [cm] | α | d [cm] | h [cm] | S (cm) | H SN1 | H SN2 | H SN3 | H SN4 | H SN5 | H SN6 | H SN7 | H MAX |
|---------|---------|-----------------|---------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RJ26203 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 0.212 | 9.077 | 8.818 | 9.176 | 19.321 | 16.263 | 18.253 | 14.105 | 19.321 |
| RT26203 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 0.955 | 12.358 | 13.294 | 13.826 | 27.076 | 24.974 | 25.723 | 30.835 | 30.835 |
| RJ26205 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 0.249 | 9.430 | 7.730 | 8.246 | 17.406 | 16.177 | 16.400 | 16.949 | 17.406 |
| RT26205 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 0.926 | 14.117 | 12.361 | 14.412 | 29.144 | 25.778 | 29.958 | 30.954 | 30.954 |
| RJ26207 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 0.198 | 9.200 | 8.648 | 8.389 | 19.989 | 9.785 | 7.721 | 9.810 | 19.989 |
| RT26207 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 0.795 | 14.232 | 12.379 | 15.285 | 30.590 | 12.893 | 15.322 | 15.063 | 30.590 |
| RJ26209 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 0.057 | 8.801 | 8.398 | 8.422 | 20.201 | 9.543 | 6.242 | 10.249 | 20.201 |
| RT26209 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 0.424 | 13.742 | 14.923 | 14.830 | 27.413 | 12.666 | 17.466 | 18.651 | 27.413 |
| RJ28203 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 0.211 | 9.142 | 12.336 | 8.229 | 16.152 | 17.722 | 17.190 | 14.159 | 17.722 |
| RT28203 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 0.766 | 14.147 | 19.328 | 13.289 | 28.680 | 25.384 | 28.090 | 34.290 | 34.290 |
| RJ28205 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 0.391 | 9.686 | 8.650 | 7.863 | 18.587 | 8.753 | 8.317 | 8.171 | 18.587 |
| RT28205 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 1.002 | 14.309 | 12.851 | 15.217 | 30.561 | 13.278 | 14.829 | 16.831 | 30.561 |
| RJ28207 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 0.521 | 9.643 | 8.422 | 9.227 | 19.944 | 9.743 | 8.268 | 10.090 | 19.944 |
| RT28207 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 1.229 | 13.740 | 11.892 | 15.528 | 25.427 | 12.827 | 16.438 | 19.421 | 25.427 |
| RJ28209 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.279 | 9.077 | 7.964 | 8.468 | 20.336 | 10.207 | 7.358 | 10.918 | 20.336 |
| RT28209 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.635 | 14.766 | 15.207 | 16.971 | 26.120 | 12.405 | 17.451 | 18.419 | 26.120 |
| RJ30203 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 0.406 | 9.597 | 8.825 | 7.920 | 16.475 | 8.357 | 8.729 | 6.893 | 16.475 |
| RT30203 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 0.387 | 14.143 | 13.953 | 13.749 | 29.303 | 13.538 | 13.775 | 17.351 | 29.303 |
| RJ30205 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 0.979 | 9.377 | 8.207 | 8.872 | 18.528 | 8.464 | 9.083 | 7.840 | 18.528 |
| RT30205 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 1.824 | 13.505 | 14.033 | 14.191 | 31.599 | 12.301 | 13.284 | 18.266 | 31.599 |
| RJ30207 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 0.221 | 8.575 | 7.792 | 8.081 | 19.779 | 9.168 | 7.707 | 8.560 | 19.779 |
| RT30207 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 1.082 | 14.182 | 14.418 | 16.831 | 27.282 | 12.312 | 15.069 | 19.465 | 27.282 |
| RJ32203 | JONSWAP | Roja | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 0.827 | 8.687 | 8.264 | 8.347 | 18.162 | 7.351 | 8.790 | 8.283 | 18.162 |
| RT32203 | TOP-HAT | Roja | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 0.486 | 13.487 | 13.928 | 13.847 | 30.405 | 12.499 | 12.800 | 15.553 | 30.405 |
| RJ32205 | JONSWAP | Roja | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 0.250 | 9.083 | 7.962 | 8.991 | 18.744 | 8.246 | 8.414 | 9.317 | 18.744 |
| RT32205 | TOP-HAT | Roja | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 2.140 | 14.312 | 13.741 | 16.901 | 31.082 | 12.986 | 13.946 | 17.502 | 31.082 |
| RJ26253 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 0.108 | 9.718 | 9.100 | 9.339 | 19.289 | 17.634 | 20.345 | 14.546 | 20.345 |
| RT26253 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 0.351 | 13.297 | 13.979 | 14.767 | 28.190 | 26.530 | 27.986 | 32.313 | 32.313 |
| RJ26255 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 0.522 | 9.162 | 7.491 | 8.291 | 17.847 | 15.794 | 16.419 | 17.622 | 17.847 |
| RT26255 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 0.273 | 13.866 | 11.812 | 14.302 | 27.676 | 24.969 | 29.028 | 32.679 | 32.679 |
| RJ26257 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 0.517 | 9.376 | 8.146 | 7.904 | 18.867 | 9.456 | 7.554 | 9.839 | 18.867 |
| RT26257 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 0.836 | 13.595 | 12.958 | 15.517 | 29.427 | 12.576 | 15.276 | 14.610 | 29.427 |
| RJ26259 | JONSWAP | Roja | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.211 | 9.272 | 8.084 | 9.006 | 20.514 | 10.087 | 7.519 | 11.260 | 20.514 |
| RT26259 | TOP-HAT | Roja | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.475 | 13.481 | 13.716 | 15.283 | 24.691 | 11.737 | 17.889 | 15.920 | 24.691 |
| RJ28253 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 0.132 | 10.830 | 7.751 | 8.202 | 15.494 | 17.527 | 16.856 | 14.212 | 17.527 |
| RT28253 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 0.843 | 16.200 | 12.131 | 11.459 | 24.882 | 24.324 | 24.745 | 29.605 | 29.605 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|------|----|-----|---|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RJ28255 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 0.519 | 9.054 | 8.454 | 7.969 | 17.337 | 8.561 | 8.332 | 7.566 | 17.337 |
| RT28255 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 1.130 | 13.719 | 13.340 | 15.219 | 30.789 | 12.899 | 14.404 | 16.668 | 30.789 |
| RJ28257 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 0.652 | 9.545 | 8.138 | 9.212 | 19.086 | 9.289 | 8.598 | 9.293 | 19.086 |
| RT28257 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 0.544 | 13.496 | 14.609 | 14.547 | 27.908 | 12.403 | 14.420 | 18.771 | 27.908 |
| RJ28259 | JONSWAP | Roja | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.591 | 9.782 | 8.409 | 8.798 | 20.346 | 10.753 | 8.008 | 10.873 | 20.346 |
| RT28259 | TOP-HAT | Roja | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.498 | 14.376 | 14.784 | 17.046 | 26.140 | 12.419 | 16.240 | 18.498 | 26.140 |
| RJ30253 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 0.104 | 9.719 | 8.853 | 7.861 | 16.459 | 8.520 | 8.647 | 6.876 | 16.459 |
| RT30253 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 0.890 | 14.247 | 14.809 | 13.111 | 27.745 | 13.764 | 13.641 | 16.171 | 27.745 |
| RJ30255 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 0.690 | 9.753 | 8.669 | 8.969 | 17.783 | 9.240 | 9.981 | 7.234 | 17.783 |
| RT30255 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 0.900 | 13.769 | 13.723 | 14.387 | 33.087 | 13.196 | 13.021 | 16.552 | 33.087 |
| RJ30257 | JONSWAP | Roja | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 0.443 | 8.947 | 7.949 | 8.719 | 19.156 | 8.988 | 7.840 | 9.166 | 19.156 |
| RT30257 | TOP-HAT | Roja | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 1.463 | 14.426 | 14.310 | 17.044 | 28.241 | 12.524 | 14.513 | 18.352 | 28.241 |
| RJ32253 | JONSWAP | Roja | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 0.300 | 8.715 | 8.092 | 7.998 | 16.415 | 7.760 | 8.782 | 7.920 | 16.415 |
| RT32253 | TOP-HAT | Roja | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 0.641 | 13.450 | 14.255 | 12.190 | 28.280 | 12.228 | 12.324 | 15.416 | 28.280 |
| RJ32255 | JONSWAP | Roja | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 0.409 | 9.577 | 8.571 | 8.453 | 15.720 | 9.048 | 7.754 | 7.557 | 15.720 |
| RT32255 | TOP-HAT | Roja | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 1.125 | 14.128 | 13.487 | 16.318 | 29.637 | 13.124 | 13.455 | 16.734 | 29.637 |
| RJ26303 | JONSWAP | Roja | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 0.201 | 9.330 | 8.489 | 8.716 | 18.377 | 16.698 | 19.592 | 13.948 | 19.592 |
| RT26303 | TOP-HAT | Roja | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 1.100 | 12.826 | 13.673 | 13.794 | 26.920 | 26.545 | 24.682 | 31.023 | 31.023 |
| RJ26305 | JONSWAP | Roja | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 0.509 | 8.893 | 7.090 | 7.836 | 17.581 | 15.126 | 16.410 | 16.354 | 17.581 |
| RT26305 | TOP-HAT | Roja | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 0.240 | 13.916 | 11.966 | 13.846 | 27.215 | 24.785 | 27.963 | 34.641 | 34.641 |
| RJ26307 | JONSWAP | Roja | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 0.174 | 9.547 | 8.828 | 8.620 | 19.779 | 8.975 | 7.851 | 9.373 | 19.779 |
| RT26307 | TOP-HAT | Roja | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 0.706 | 13.205 | 12.473 | 16.109 | 26.249 | 11.565 | 13.893 | 16.863 | 26.249 |
| RJ26309 | JONSWAP | Roja | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.489 | 9.161 | 8.168 | 8.224 | 19.889 | 10.013 | 7.156 | 10.643 | 19.889 |
| RT26309 | TOP-HAT | Roja | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.472 | 13.268 | 14.855 | 14.701 | 25.719 | 12.198 | 16.144 | 18.504 | 25.719 |
| RJ28303 | JONSWAP | Roja | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 0.507 | 9.491 | 7.417 | 8.338 | 14.848 | 17.283 | 17.555 | 13.565 | 17.555 |
| RT28303 | TOP-HAT | Roja | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 0.773 | 14.106 | 12.719 | 12.110 | 26.508 | 27.900 | 27.633 | 31.077 | 31.077 |
| RJ28305 | JONSWAP | Roja | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 0.857 | 9.960 | 8.587 | 7.944 | 16.902 | 7.849 | 8.964 | 7.634 | 16.902 |
| RT29305 | TOP-HAT | Roja | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 0.939 | 14.397 | 13.461 | 14.521 | 30.492 | 13.293 | 14.411 | 16.980 | 30.492 |
| RJ28307 | JONSWAP | Roja | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 0.344 | 9.630 | 8.265 | 8.978 | 19.211 | 9.281 | 9.095 | 8.813 | 19.211 |
| RT28307 | TOP-HAT | Roja | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 0.579 | 13.645 | 14.204 | 14.778 | 29.345 | 12.694 | 14.011 | 17.750 | 29.345 |
| RJ28309 | JONSWAP | Roja | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.187 | 9.260 | 7.991 | 7.718 | 18.948 | 10.568 | 7.462 | 10.415 | 18.948 |
| RT28309 | TOP-HAT | Roja | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.333 | 15.429 | 12.951 | 16.871 | 24.314 | 13.461 | 16.592 | 16.933 | 24.314 |
| RJ30303 | JONSWAP | Roja | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 0.392 | 8.808 | 8.384 | 7.887 | 15.173 | 7.823 | 8.485 | 7.269 | 15.173 |
| RT30303 | TOP-HAT | Roja | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 0.732 | 13.890 | 13.768 | 13.171 | 27.229 | 14.119 | 13.527 | 16.140 | 27.229 |
| RJ30305 | JONSWAP | Roja | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 0.438 | 8.675 | 8.101 | 8.402 | 19.056 | 7.338 | 8.467 | 8.555 | 19.056 |
| RT30305 | TOP-HAT | Roja | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 0.588 | 13.391 | 13.518 | 13.914 | 30.602 | 12.454 | 12.433 | 15.630 | 30.602 |
| RJ30307 | JONSWAP | Roja | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 0.502 | 8.969 | 7.764 | 8.761 | 18.487 | 8.246 | 7.615 | 8.952 | 18.487 |
| RT30307 | TOP-HAT | Roja | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 0.636 | 14.270 | 13.769 | 16.794 | 29.067 | 12.705 | 14.209 | 17.395 | 29.067 |
| RJ32303 | JONSWAP | Roja | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 0.085 | 8.608 | 8.197 | 7.830 | 16.198 | 7.810 | 8.966 | 7.139 | 16.198 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------|----|-----|---|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RT32323 | TOP-HAT | Roja | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 0.486 | 12.942 | 12.549 | 13.731 | 30.312 | 14.716 | 13.151 | 15.002 | 30.312 |
| RJ32305 | JONSWAP | Roja | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 0.306 | 9.193 | 8.204 | 8.732 | 16.976 | 8.449 | 8.352 | 7.985 | 16.976 |
| RT32305 | TOP-HAT | Roja | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 0.711 | 13.979 | 13.366 | 16.038 | 30.090 | 13.989 | 12.960 | 15.799 | 30.090 |
| AJ26203 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 1.060 | 9.804 | 8.860 | 9.264 | 20.142 | 16.412 | 21.495 | 13.731 | 21.495 |
| AT26203 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 1.783 | 13.256 | 13.769 | 15.280 | 28.539 | 26.763 | 29.174 | 34.773 | 34.773 |
| AJ26205 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 1.022 | 9.454 | 7.589 | 8.560 | 18.936 | 16.761 | 18.315 | 17.105 | 18.936 |
| AT26205 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 1.701 | 13.953 | 11.282 | 14.397 | 28.763 | 25.120 | 30.449 | 32.928 | 32.928 |
| AJ26207 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 0.481 | 9.188 | 8.640 | 8.093 | 17.749 | 9.330 | 7.029 | 10.035 | 17.749 |
| AT26207 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 1.891 | 14.240 | 13.424 | 15.591 | 30.303 | 13.048 | 16.015 | 17.037 | 30.303 |
| AJ26209 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 0.248 | 9.941 | 8.535 | 9.089 | 19.861 | 11.626 | 8.608 | 11.968 | 19.861 |
| AT26209 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 1.157 | 13.390 | 13.533 | 15.118 | 30.467 | 11.390 | 17.280 | 21.703 | 30.467 |
| AJ28203 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 0.997 | 8.829 | 7.450 | 8.251 | 17.737 | 15.973 | 18.481 | 14.352 | 18.481 |
| AT28203 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 1.657 | 14.007 | 12.242 | 13.443 | 29.273 | 24.572 | 25.132 | 36.479 | 36.479 |
| AJ28205 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 0.824 | 8.552 | 8.479 | 8.009 | 19.586 | 7.990 | 7.429 | 9.414 | 19.586 |
| AT28205 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 2.003 | 13.638 | 12.746 | 15.417 | 34.369 | 12.409 | 15.247 | 17.399 | 34.369 |
| AJ28207 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 0.387 | 8.473 | 8.222 | 7.885 | 20.456 | 9.862 | 6.713 | 10.147 | 20.456 |
| AT28207 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 0.983 | 13.205 | 14.451 | 15.524 | 28.919 | 12.512 | 15.075 | 19.953 | 28.919 |
| AJ28209 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.051 | 8.723 | 7.831 | 8.408 | 18.599 | 10.378 | 6.061 | 11.252 | 18.599 |
| AT28209 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.655 | 13.884 | 14.377 | 16.404 | 33.381 | 12.029 | 16.402 | 20.790 | 33.381 |
| AJ30203 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 1.441 | 8.884 | 8.185 | 8.103 | 16.725 | 7.646 | 8.962 | 8.560 | 16.725 |
| AT30203 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 1.585 | 13.563 | 12.390 | 15.529 | 30.258 | 12.884 | 14.335 | 17.587 | 30.258 |
| AJ30205 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 0.964 | 9.477 | 8.292 | 8.716 | 18.336 | 8.690 | 10.208 | 8.043 | 18.336 |
| AT30205 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 2.292 | 13.107 | 12.525 | 16.077 | 32.738 | 12.396 | 16.667 | 21.157 | 32.738 |
| AJ30207 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 0.368 | 8.698 | 7.940 | 8.539 | 20.107 | 10.114 | 6.017 | 9.899 | 20.107 |
| AT30207 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 0.975 | 13.479 | 13.474 | 16.505 | 32.429 | 11.963 | 15.832 | 23.007 | 32.429 |
| AJ32203 | JONSWAP | Arena | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 1.058 | 8.465 | 8.015 | 8.031 | 17.269 | 7.631 | 9.277 | 8.468 | 17.269 |
| AT32203 | TOP-HAT | Arena | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 1.858 | 12.949 | 12.906 | 16.424 | 29.759 | 14.116 | 16.690 | 19.308 | 29.759 |
| AJ32205 | JONSWAP | Arena | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 0.969 | 8.629 | 7.866 | 8.651 | 20.392 | 7.969 | 7.468 | 9.000 | 20.392 |
| AT32205 | TOP-HAT | Arena | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 1.826 | 13.906 | 13.288 | 17.599 | 29.632 | 12.813 | 14.380 | 18.824 | 29.632 |
| AJ26253 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 0.950 | 9.700 | 8.484 | 9.223 | 19.046 | 17.280 | 18.015 | 14.313 | 19.046 |
| AT26253 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 1.609 | 12.923 | 13.778 | 14.066 | 27.762 | 25.820 | 26.472 | 33.876 | 33.876 |
| AJ26255 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 0.715 | 8.923 | 7.152 | 8.048 | 17.610 | 15.983 | 16.679 | 16.113 | 17.610 |
| AT26255 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 1.499 | 13.859 | 11.524 | 14.266 | 28.325 | 24.477 | 30.120 | 31.368 | 31.368 |
| AJ26257 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 0.286 | 5.928 | 8.248 | 7.942 | 18.349 | 9.268 | 7.100 | 10.132 | 18.349 |
| AT26257 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 2.363 | 8.938 | 11.369 | 14.392 | 29.401 | 9.944 | 15.345 | 18.207 | 29.401 |
| AJ26259 | JONSWAP | Arena | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.236 | 7.598 | 8.145 | 7.496 | 19.211 | 10.775 | 6.686 | 11.208 | 19.211 |
| AT26259 | TOP-HAT | Arena | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.945 | 11.800 | 14.263 | 15.327 | 27.186 | 12.867 | 17.544 | 18.038 | 27.186 |
| AJ28253 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 1.240 | 8.722 | 7.077 | 8.140 | 16.430 | 15.915 | 19.155 | 14.228 | 19.155 |
| AT28253 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 1.772 | 13.847 | 12.214 | 12.536 | 27.335 | 25.261 | 24.910 | 35.325 | 35.325 |
| AJ28255 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 1.369 | 9.073 | 8.608 | 8.190 | 17.617 | 7.391 | 8.556 | 9.530 | 17.617 |
| AT28255 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 1.933 | 13.355 | 11.761 | 14.775 | 30.053 | 13.958 | 13.597 | 16.702 | 30.053 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------|----|-----|---|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AJ28257 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 0.582 | 8.841 | 8.058 | 7.910 | 19.979 | 9.608 | 7.380 | 9.545 | 19.979 |
| AT28257 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 1.212 | 13.373 | 12.662 | 16.717 | 29.655 | 11.757 | 15.346 | 18.910 | 29.655 |
| AJ28259 | JONSWAP | Arena | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.118 | 8.966 | 8.277 | 7.812 | 18.492 | 10.804 | 7.191 | 11.021 | 18.492 |
| AT28259 | TOP-HAT | Arena | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.820 | 14.178 | 14.646 | 17.179 | 26.158 | 11.982 | 16.223 | 19.664 | 26.158 |
| AJ30253 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 0.866 | 8.933 | 8.485 | 8.229 | 15.967 | 7.645 | 8.916 | 7.885 | 15.967 |
| AT30253 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 1.492 | 13.485 | 13.141 | 14.924 | 30.909 | 13.659 | 13.281 | 17.137 | 30.909 |
| AJ30255 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 1.076 | 9.001 | 8.022 | 8.369 | 18.419 | 7.951 | 8.442 | 8.797 | 18.419 |
| AT30255 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 1.737 | 13.065 | 12.258 | 16.313 | 32.300 | 13.201 | 16.421 | 18.989 | 32.300 |
| AJ30257 | JONSWAP | Arena | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 0.063 | 8.775 | 7.939 | 8.435 | 20.517 | 9.060 | 6.354 | 9.348 | 20.517 |
| AT30257 | TOP-HAT | Arena | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 1.577 | 13.750 | 13.348 | 16.821 | 30.006 | 11.932 | 13.810 | 19.114 | 30.006 |
| AJ32253 | JONSWAP | Arena | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 0.794 | 8.433 | 7.842 | 7.968 | 15.614 | 7.947 | 9.090 | 7.263 | 15.614 |
| AT32253 | TOP-HAT | Arena | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 1.433 | 13.199 | 14.041 | 13.748 | 32.282 | 12.787 | 12.227 | 15.985 | 32.282 |
| AJ32255 | JONSWAP | Arena | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 0.817 | 8.646 | 7.689 | 8.444 | 17.999 | 7.846 | 8.354 | 8.589 | 17.999 |
| AT32255 | TOP-HAT | Arena | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 1.595 | 13.311 | 12.647 | 16.959 | 30.392 | 13.462 | 14.879 | 17.704 | 30.392 |
| AJ26303 | JONSWAP | Arena | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 1.104 | 9.359 | 8.656 | 9.393 | 17.988 | 16.712 | 18.544 | 14.600 | 18.544 |
| AT26303 | TOP-HAT | Arena | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 1.468 | 13.438 | 14.071 | 12.982 | 29.916 | 23.696 | 25.483 | 35.162 | 35.162 |
| AJ26305 | JONSWAP | Arena | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 1.008 | 8.794 | 7.205 | 8.568 | 18.152 | 14.649 | 16.516 | 16.323 | 18.152 |
| AT26305 | TOP-HAT | Arena | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 1.807 | 13.317 | 10.834 | 14.267 | 27.446 | 22.633 | 30.213 | 35.795 | 35.795 |
| AJ26307 | JONSWAP | Arena | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 0.339 | 9.434 | 8.711 | 8.153 | 19.058 | 9.695 | 7.478 | 9.432 | 19.058 |
| AT26307 | TOP-HAT | Arena | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 1.041 | 10.396 | 9.807 | 11.301 | 25.485 | 7.115 | 12.854 | 16.169 | 25.485 |
| AJ26309 | JONSWAP | Arena | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.065 | 9.695 | 8.211 | 8.448 | 19.132 | | 8.012 | 12.143 | 19.132 |
| AT26309 | TOP-HAT | Arena | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.960 | 13.556 | 14.272 | 15.537 | 26.704 | 12.462 | 16.643 | 20.179 | 26.704 |
| AJ28303 | JONSWAP | Arena | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 0.908 | 8.716 | 7.234 | 8.245 | 16.820 | 16.560 | 18.917 | 14.009 | 18.917 |
| AT28303 | TOP-HAT | Arena | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 1.045 | 8.891 | 7.528 | 8.338 | 19.363 | 15.611 | 17.470 | 26.874 | 26.874 |
| AJ28305 | JONSWAP | Arena | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 0.677 | 8.715 | 8.181 | 8.194 | 16.475 | 6.871 | 8.216 | 8.493 | 16.475 |
| AT28305 | TOP-HAT | Arena | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 2.304 | 13.144 | 12.239 | 16.009 | 31.730 | 11.875 | 14.192 | 16.945 | 31.730 |
| AJ28307 | JONSWAP | Arena | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 0.135 | 8.703 | 8.028 | 8.317 | 20.569 | 8.693 | 7.104 | 9.792 | 20.569 |
| AT28307 | TOP-HAT | Arena | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 1.365 | 13.342 | 12.588 | 17.865 | 31.763 | 11.995 | 15.437 | 18.415 | 31.763 |
| AJ28309 | JONSWAP | Arena | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.845 | 8.266 | 7.393 | 8.468 | 19.805 | 10.685 | 6.689 | 11.551 | 19.805 |
| AT28309 | TOP-HAT | Arena | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.719 | 13.505 | 14.349 | 15.821 | 28.175 | 11.216 | 14.444 | 18.474 | 28.175 |
| AJ30303 | JONSWAP | Arena | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 1.003 | 8.931 | 8.183 | 7.664 | 14.063 | 8.299 | 8.805 | 6.953 | 14.063 |
| AT30303 | TOP-HAT | Arena | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 1.693 | 14.154 | 13.587 | 12.508 | 26.782 | 14.333 | 13.109 | 16.908 | 26.782 |
| AJ30305 | JONSWAP | Arena | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 1.113 | 8.510 | 7.884 | 4.122 | 0.000 | 1.520 | 0.000 | 0.000 | 8.510 |
| AT30305 | TOP-HAT | Arena | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 2.187 | 12.957 | 12.235 | 16.618 | 30.997 | 14.416 | 15.475 | 16.435 | 30.997 |
| AJ30307 | JONSWAP | Arena | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 0.274 | 8.712 | 7.959 | 8.380 | 18.953 | 8.902 | 8.538 | 8.923 | 18.953 |
| AT30307 | TOP-HAT | Arena | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 1.717 | 13.897 | 13.399 | 17.323 | 31.763 | 12.844 | 14.146 | 17.694 | 31.763 |
| AJ32303 | JONSWAP | Arena | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 1.427 | 8.553 | 7.928 | 7.674 | 15.688 | 7.939 | 9.466 | 7.628 | 15.688 |
| AT32303 | TOP-HAT | Arena | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 1.447 | 13.362 | 14.053 | 13.209 | 31.192 | 12.871 | 11.898 | 15.386 | 31.192 |
| AJ32305 | JONSWAP | Arena | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 0.841 | 8.913 | 7.746 | 8.684 | 18.113 | 8.089 | 8.518 | 8.635 | 18.113 |
| AT32305 | TOP-HAT | Arena | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 1.570 | 13.906 | 12.762 | 16.479 | 35.525 | 13.165 | 13.242 | 16.322 | 35.525 |
| VJ26203 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 0.853 | 9.024 | | 8.976 | 18.559 | 16.458 | 19.042 | 15.262 | 19.042 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------|----|-----|---|----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| VT26203 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.0 | 3 | 29 | 1.918 | 11.8298 | 13.7068 | 13.6435 | 27.2597 | 25.2446 | 26.5905 | 32.7263 | 32.726 |
| VJ26205 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 0.518 | 8.511 | 6.991 | 8.299 | 19.134 | 15.653 | 16.770 | 18.472 | 19.134 |
| VT26205 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.0 | 5 | 31 | 2.069 | 13.7267 | 11.3534 | 14.4161 | 30.1413 | 23.0595 | 30.5683 | 30.4886 | 30.568 |
| VJ26207 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 0.405 | 8.472 | 8.252 | 7.691 | 17.562 | 9.378 | 7.964 | 10.136 | 17.562 |
| VT26207 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.0 | 7 | 33 | 1.537 | 12.9731 | 12.9188 | 14.7023 | 28.5977 | 12.4636 | 19.1504 | 15.2124 | 28.598 |
| VJ26209 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 0.146 | 6.842 | 6.974 | 6.522 | 15.390 | 8.953 | 5.794 | 9.181 | 15.390 |
| VT26209 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.0 | 9 | 35 | 0.611 | 10.6263 | 11.5809 | 12.6318 | 26.1660 | 10.2197 | 14.9289 | 16.9824 | 26.166 |
| VJ28203 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 0.636 | 7.540 | 6.731 | 7.942 | 18.354 | 16.222 | 15.843 | 17.079 | 18.354 |
| VT28203 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.0 | 3 | 31 | 1.365 | 11.9171 | 9.8968 | 11.6977 | 25.3481 | 17.0790 | 24.4849 | 31.7797 | 31.780 |
| VJ28205 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 0.559 | 8.429 | 7.553 | 7.988 | 17.485 | 8.396 | 7.439 | 8.806 | 17.485 |
| VT28205 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.0 | 5 | 33 | 1.808 | 13.436 | 11.872 | 15.196 | 32.597 | 12.791 | 15.009 | 16.741 | 32.597 |
| VJ28207 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 0.213 | 8.887 | 8.051 | 8.907 | 19.271 | 10.625 | 7.430 | 10.814 | 19.271 |
| VT28207 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.0 | 7 | 35 | 1.208 | 12.896 | 14.474 | 15.235 | 28.595 | 12.507 | 16.478 | 19.341 | 28.595 |
| VJ28209 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.381 | 8.435 | 7.677 | 8.087 | 20.298 | 10.020 | 5.916 | 11.732 | 20.298 |
| VT28209 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.0 | 9 | 37 | 0.789 | 13.687 | 14.718 | 16.816 | 26.682 | 12.049 | 17.727 | 17.658 | 26.682 |
| VJ30203 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 0.818 | 9.082 | 8.781 | 8.487 | 16.558 | 8.265 | 8.385 | 8.024 | 16.558 |
| VT30203 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.0 | 3 | 33 | 1.365 | 13.598 | 14.256 | 14.171 | 28.305 | 13.036 | 14.726 | 16.872 | 28.305 |
| VJ30205 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 0.701 | 9.414 | 8.283 | 9.052 | 17.436 | 8.565 | 9.717 | 8.515 | 17.436 |
| VT30205 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.0 | 5 | 35 | 1.835 | 13.320 | 13.266 | 14.968 | 34.140 | 12.647 | 15.295 | 18.756 | 34.140 |
| VJ30207 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 0.667 | 8.510 | 7.996 | 7.269 | 18.981 | 10.162 | 7.655 | 10.575 | 18.981 |
| VT30207 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.0 | 7 | 37 | 1.742 | 13.774 | 14.208 | 17.067 | 28.943 | 12.775 | 15.501 | 20.930 | 28.943 |
| VJ32203 | JONSWAP | Verde | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 0.677 | 8.126 | 7.851 | 8.117 | 17.093 | 7.779 | 8.866 | 7.877 | 17.093 |
| VT32203 | TOP-HAT | Verde | 32 | 2.0 | 3 | 35 | 1.786 | 12.881 | 13.563 | 13.072 | 30.417 | 12.315 | 11.968 | 16.731 | 30.417 |
| VJ32205 | JONSWAP | Verde | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 0.518 | 9.774 | 8.572 | 8.238 | 17.017 | 8.751 | 9.017 | 8.301 | 17.017 |
| VT32205 | TOP-HAT | Verde | 32 | 2.0 | 5 | 37 | 1.862 | 13.249 | 13.372 | 15.631 | 33.683 | 12.214 | 15.698 | 21.772 | 33.683 |
| VJ26253 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 0.448 | 8.400 | 8.518 | 8.722 | 16.968 | 16.443 | 18.008 | 13.480 | 18.008 |
| VT26253 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.5 | 3 | 29 | 0.851 | 12.359 | 13.451 | 12.645 | 26.040 | 24.551 | 24.093 | 29.565 | 29.565 |
| VJ26255 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 0.792 | 8.572 | 7.087 | 8.290 | 16.674 | 14.826 | 16.625 | 15.770 | 16.674 |
| VT26255 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.5 | 5 | 31 | 1.581 | 12.853 | 10.623 | 14.748 | 32.630 | 23.679 | 28.523 | 34.870 | 34.870 |
| VJ26257 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 0.409 | 8.763 | 8.732 | 8.240 | 19.117 | 9.840 | 7.448 | 9.444 | 19.117 |
| VT26257 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.5 | 7 | 33 | 1.360 | 14.172 | 11.065 | 14.825 | 27.166 | 12.541 | 15.435 | 16.285 | 27.166 |
| VJ26259 | JONSWAP | Verde | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.281 | 9.016 | 8.161 | 8.388 | 20.062 | 10.404 | 7.463 | 11.320 | 20.062 |
| VT26259 | TOP-HAT | Verde | 26 | 2.5 | 9 | 35 | 0.782 | 13.159 | 14.410 | 14.874 | 26.945 | 12.446 | 16.693 | 19.503 | 26.945 |
| VJ28253 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 0.711 | 8.487 | 7.391 | 8.520 | 16.837 | 16.216 | 16.342 | 16.592 | 16.837 |
| VT28253 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.5 | 3 | 31 | 1.788 | 13.306 | 11.385 | 12.833 | 26.594 | 24.220 | 27.733 | 34.658 | 34.658 |
| VJ28255 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 0.095 | 4.873 | 6.004 | 6.813 | 14.135 | 5.985 | 6.854 | 7.161 | 14.135 |
| VT28255 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.5 | 5 | 33 | 2.054 | 12.933 | 11.412 | 15.001 | 31.768 | 12.748 | 14.868 | 16.902 | 31.768 |
| VJ28257 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 0.072 | 8.665 | 7.472 | 6.815 | 16.559 | 10.084 | 6.813 | 7.588 | 16.559 |
| VT28257 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.5 | 7 | 35 | 1.890 | 12.672 | 12.563 | 12.611 | 27.866 | 12.524 | 12.222 | 15.241 | 27.866 |
| VJ28259 | JONSWAP | Verde | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.259 | 9.222 | 7.209 | 8.505 | 19.711 | 10.774 | 7.684 | 12.056 | 19.711 |
| VT28259 | TOP-HAT | Verde | 28 | 2.5 | 9 | 37 | 0.596 | 13.608 | 14.130 | 17.764 | 27.506 | 12.827 | 16.352 | 18.595 | 27.506 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-------|----|-----|---|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VJ30253 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 0.536 | 8.876 | 8.277 | 8.073 | 15.104 | 8.290 | 8.489 | 7.226 | 15.104 |
| VT30253 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.5 | 3 | 33 | 1.800 | 13.336 | 13.679 | 13.321 | 27.007 | 13.622 | 13.105 | 15.894 | 27.007 |
| VJ30255 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 0.700 | 8.786 | 7.997 | 8.463 | 16.894 | 8.533 | 9.375 | 8.170 | 16.894 |
| VT30255 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.5 | 5 | 35 | 2.469 | 12.977 | 13.436 | 13.640 | 31.000 | 12.162 | 13.254 | 17.158 | 31.000 |
| VJ30257 | JONSWAP | Verde | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 0.230 | 8.349 | 8.004 | 7.760 | 18.988 | 9.074 | 7.859 | 9.698 | 18.988 |
| VT30257 | TOP-HAT | Verde | 30 | 2.5 | 7 | 37 | 2.121 | 13.683 | 14.035 | 17.122 | 29.390 | 12.521 | 14.624 | 18.352 | 29.390 |
| VJ32253 | JONSWAP | Verde | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 0.785 | 9.065 | 8.104 | 8.241 | 18.304 | 9.046 | 8.570 | 7.047 | 18.304 |
| VT32253 | TOP-HAT | Verde | 32 | 2.5 | 3 | 35 | 1.068 | 13.230 | 14.727 | 12.354 | 28.230 | 12.797 | 12.744 | 15.699 | 28.230 |
| VJ32255 | JONSWAP | Verde | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 0.526 | 9.091 | 8.078 | 7.993 | 15.257 | 8.858 | 7.940 | 8.072 | 15.257 |
| VT32255 | TOP-HAT | Verde | 32 | 2.5 | 5 | 37 | 2.263 | 14.671 | 12.463 | 14.528 | 24.500 | 10.771 | 13.900 | 17.179 | 24.500 |
| VJ26303 | JONSWAP | Verde | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 0.525 | 9.488 | 8.718 | 8.590 | 16.485 | 18.682 | 18.532 | 15.853 | 18.682 |
| VT26303 | TOP-HAT | Verde | 26 | 3.0 | 3 | 29 | 0.946 | 14.217 | 14.455 | 13.486 | 26.983 | 27.773 | 27.742 | 29.647 | 29.647 |
| VJ26305 | JONSWAP | Verde | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 0.672 | 9.045 | 7.468 | 8.441 | 15.726 | 17.971 | 18.128 | 14.831 | 18.128 |
| VT26305 | TOP-HAT | Verde | 26 | 3.0 | 5 | 31 | 1.459 | 12.703 | 11.847 | 14.498 | 32.388 | 24.171 | 26.806 | 34.703 | 34.703 |
| VJ26307 | JONSWAP | Verde | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 1.923 | 8.363 | 8.107 | 8.141 | 17.560 | 9.181 | 6.499 | 9.471 | 17.560 |
| VT26307 | TOP-HAT | Verde | 26 | 3.0 | 7 | 33 | 1.082 | 12.853 | 12.664 | 15.565 | 29.689 | 12.563 | 15.197 | 16.818 | 29.689 |
| VJ26309 | JONSWAP | Verde | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.406 | 8.474 | 7.923 | 8.063 | 19.056 | 9.216 | 6.502 | 10.043 | 19.056 |
| VT26309 | TOP-HAT | Verde | 26 | 3.0 | 9 | 35 | 0.579 | 12.864 | 13.331 | 16.380 | 30.125 | 11.758 | 16.056 | 20.452 | 30.125 |
| VJ28303 | JONSWAP | Verde | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 0.992 | 8.289 | 6.966 | 8.351 | 16.630 | 15.679 | 17.708 | 13.069 | 17.708 |
| VT28303 | TOP-HAT | Verde | 28 | 3.0 | 3 | 31 | 1.863 | 13.312 | 11.687 | 12.838 | 27.147 | 24.955 | 25.924 | 33.310 | 33.310 |
| VJ28305 | JONSWAP | Verde | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 1.110 | 9.035 | 8.636 | 8.577 | 17.516 | 8.183 | 8.467 | 9.055 | 17.516 |
| VT28305 | TOP-HAT | Verde | 28 | 3.0 | 5 | 33 | 2.786 | 13.768 | 13.073 | 14.331 | 31.183 | 12.733 | 14.862 | 17.398 | 31.183 |
| VJ28307 | JONSWAP | Verde | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 0.225 | 9.187 | 7.198 | 8.953 | 18.614 | 8.496 | 8.713 | 8.830 | 18.614 |
| VT28307 | TOP-HAT | Verde | 28 | 3.0 | 7 | 35 | 1.027 | 12.928 | 11.666 | 14.865 | 30.479 | 12.624 | 13.919 | 17.708 | 30.479 |
| VJ28309 | JONSWAP | Verde | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.376 | | 7.228 | 8.391 | 18.144 | 10.908 | 7.241 | 10.607 | 18.144 |
| VT28309 | TOP-HAT | Verde | 28 | 3.0 | 9 | 37 | 0.834 | | 12.653 | 17.743 | 28.795 | 12.598 | 15.929 | 19.140 | 28.795 |
| VJ30303 | JONSWAP | Verde | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 0.817 | 8.280 | 8.201 | 7.759 | 13.878 | 7.843 | 8.572 | 7.631 | 13.878 |
| VT30303 | TOP-HAT | Verde | 30 | 3.0 | 3 | 33 | 1.507 | 13.353 | 13.688 | 12.007 | 26.215 | 13.949 | 12.749 | 15.587 | 26.215 |
| VJ30305 | JONSWAP | Verde | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 0.850 | 8.218 | 8.070 | 8.185 | 18.725 | 7.753 | 7.879 | 8.885 | 18.725 |
| VT30305 | TOP-HAT | Verde | 30 | 3.0 | 5 | 35 | 1.783 | 12.792 | 13.162 | 13.657 | 31.974 | 12.354 | 12.628 | 15.679 | 31.974 |
| VJ30307 | JONSWAP | Verde | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 0.183 | 8.465 | 7.850 | 8.021 | 18.042 | 9.080 | 7.474 | 9.446 | 18.042 |
| VT30307 | TOP-HAT | Verde | 30 | 3.0 | 7 | 37 | 1.297 | 13.506 | 14.031 | 16.605 | 29.917 | 12.718 | 14.067 | 17.407 | 29.917 |
| VJ32303 | JONSWAP | Verde | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 1.126 | 8.329 | 8.384 | 8.114 | 15.663 | 8.351 | 9.211 | 7.381 | 15.663 |
| VT32303 | TOP-HAT | Verde | 32 | 3.0 | 3 | 35 | 0.808 | 13.118 | 14.567 | 12.448 | 27.885 | 13.238 | 13.313 | 15.178 | 27.885 |
| VJ32305 | JONSWAP | Verde | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 0.500 | 9.559 | 8.533 | 8.557 | 15.163 | 9.493 | 9.007 | 7.253 | 15.163 |
| VT32305 | TOP-HAT | Verde | 32 | 3.0 | 5 | 37 | 1.824 | 13.573 | 13.135 | 16.208 | 30.092 | 14.157 | 13.176 | 16.392 | 30.092 |

ANEXO B

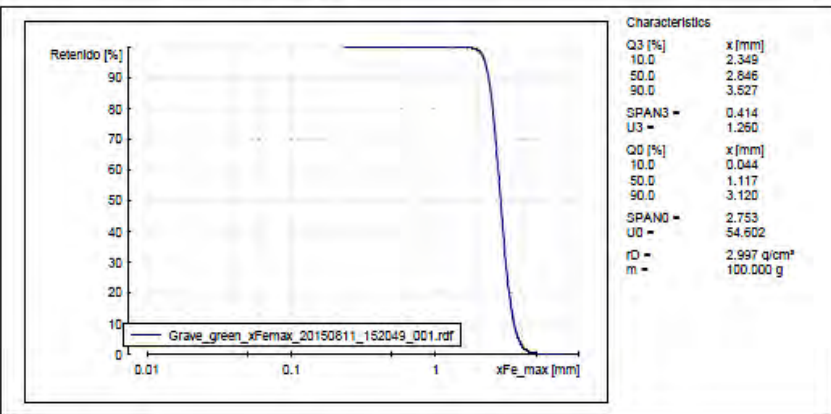


ANALISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

| | |
|-------------------|---|
| Company: | INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM |
| User: | DRV |
| Result file: | C:\CAMSIZER\CAMDAT\Grave_green\Grave_green_xFemax_20150811_152049_001.rdf |
| Task file: | C:\CAMSIZER\CAMSYS\Grave_green.afq |
| Time: | 11.08.2015, 15:20, duration 1 min 24 s at 1.0 % covered area, image rate 1:1 and 60 mm feeder |
| Particle model: | xFe_max |
| No. of particles: | CCD-B = 17743, CCD-Z = 1589 |
| Fitting: | no |
| Material: | GRAVE GREEN |
| Comment: | ANALISIS FRANCISCO GTZ |

| Size class | [mm] | ASTM(+) | N _o (-) | Retenido [%] | SPHT3 | bl3 | PDN |
|------------|-------|------------|--------------------|--------------|-------|-------|-------|
| 0.000 - | 0.077 | PAN | 0.00304* | 100.00 | 0.907 | 0.869 | 10334 |
| 0.077 - | 0.154 | 0.00304* | 0.00608* | 100.00 | 0.878 | 0.750 | 2487 |
| 0.154 - | 0.232 | 0.00608* | 0.00911* | 100.00 | 0.852 | 0.706 | 888 |
| 0.232 - | 0.309 | 0.00911* | 0.01215* | 99.99 | 0.858 | 0.696 | 508 |
| 0.309 - | 0.386 | 0.01215* | 0.01519* | 99.99 | 0.845 | 0.654 | 216 |
| 0.386 - | 0.463 | 0.01519* | 0.01823* | 99.99 | 0.817 | 0.626 | 120 |
| 0.463 - | 0.540 | 0.01823* | 0.02127* | 99.98 | 0.880 | 0.714 | 70 |
| 0.540 - | 0.617 | 0.02127* | 0.02431* | 99.98 | 0.860 | 0.523 | 53 |
| 0.617 - | 0.695 | 0.02431* | 0.02735* | 99.98 | 0.864 | 0.757 | 36 |
| 0.695 - | 0.772 | 0.02735* | 0.03039* | 99.98 | 0.827 | 0.622 | 39 |
| 0.772 - | 0.849 | 0.03039* | #20 | 99.97 | 0.734 | 0.596 | 27 |
| 0.849 - | 0.926 | #20 | 0.03646* | 99.97 | 0.885 | 0.728 | 9 |
| 0.926 - | 1.003 | 0.03646* | #18 | 99.97 | 0.740 | 0.701 | 19 |
| 1.003 - | 1.081 | #18 | 0.04254* | 99.96 | 0.811 | 0.638 | 13 |
| 1.081 - | 1.158 | 0.04254* | #16 | 99.96 | 0.838 | 0.692 | 14 |
| 1.158 - | 1.235 | #16 | 0.04861* | 99.95 | 0.881 | 0.711 | 8 |
| 1.235 - | 1.312 | 0.04861* | 0.05165* | 99.94 | 0.877 | 0.745 | 14 |
| 1.312 - | 1.389 | 0.05165* | #14 | 99.92 | 0.868 | 0.739 | 19 |
| 1.389 - | 1.466 | #14 | 0.05773* | 99.90 | 0.888 | 0.750 | 17 |
| 1.466 - | 1.544 | 0.05773* | 0.06077* | 99.86 | 0.898 | 0.764 | 29 |
| 1.544 - | 1.621 | 0.06077* | 0.06381* | 99.83 | 0.885 | 0.735 | 22 |
| 1.621 - | 1.698 | 0.06381* | #12 | 99.79 | 0.864 | 0.731 | 23 |
| 1.698 - | 1.775 | #12 | 0.06988* | 99.72 | 0.861 | 0.723 | 27 |
| 1.775 - | 1.852 | 0.06988* | 0.07292* | 99.60 | 0.872 | 0.767 | 48 |
| 1.852 - | 1.929 | 0.07292* | 0.07596* | 99.34 | 0.882 | 0.761 | 71 |
| 1.929 - | 2.007 | 0.07596* | #10 | 98.88 | 0.882 | 0.765 | 140 |
| 2.007 - | 2.084 | #10 | 0.08204* | 98.07 | 0.889 | 0.772 | 186 |
| 2.084 - | 2.161 | 0.08204* | 0.08507* | 96.72 | 0.881 | 0.769 | 317 |
| 2.161 - | 2.238 | 0.08507* | 0.08811* | 94.61 | 0.874 | 0.736 | 487 |
| 2.238 - | 2.315 | 0.08811* | #8 | 91.61 | 0.877 | 0.739 | 642 |
| 2.315 - | 2.392 | #8 | #8 | 87.71 | 0.875 | 0.739 | 767 |
| 2.392 - | 2.470 | #8 | 0.09723* | 82.85 | 0.868 | 0.718 | 882 |
| 2.470 - | 2.547 | 0.09723* | 0.10027* | 77.02 | 0.866 | 0.715 | 1063 |
| 2.547 - | 2.624 | 0.10027* | 0.10331* | 70.40 | 0.863 | 0.706 | 1126 |
| 2.624 - | 2.701 | 0.10331* | 0.10634* | 63.38 | 0.859 | 0.696 | 1075 |
| 2.701 - | 2.778 | 0.10634* | #7 | 56.22 | 0.850 | 0.681 | 1039 |
| 2.778 - | 2.855 | #7 | #7 | 49.17 | 0.850 | 0.678 | 1020 |
| 2.855 - | 2.933 | #7 | 0.11545* | 42.38 | 0.843 | 0.658 | 691 |
| 2.933 - | 3.010 | 0.11545* | 0.11850* | 36.10 | 0.840 | 0.655 | 775 |
| 3.010 - | 3.087 | 0.11850* | 0.12154* | 30.38 | 0.836 | 0.646 | 694 |
| > 3.087 | | > 0.12154* | | 0.00 | 0.791 | 0.581 | 3103 |

| | |
|--------------|---|
| Result file: | C:\CAMSIZER\CAMDAT\Grave_green\Grave_green_xFemax_20150811_152049_001.rdf |
| Task file: | C:\CAMSIZER\CAMSYS\Grave_green.afq |



| | |
|------------------------|--------------------------|
| Q3 (SPHT=0.9) = 69.8 % | Mean value SPHT3 = 0.855 |
| Q3 (Symm=0.9) = 60.2 % | Mean value Symm3 = 0.886 |
| Q3 (bl=0.9) = 96.5 % | Mean value bl3 = 0.696 |



INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CAMSIZER

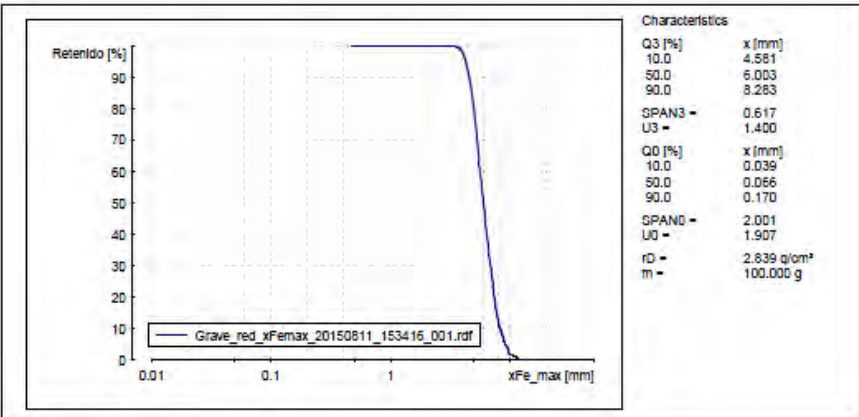


ANÁLISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

| | |
|-------------------|---|
| Company: | INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM |
| User: | DRV |
| Result file: | C:\CAMSIZER\CAMDAT\Grave red\Grave_red_xFemax_20150811_153416_001.rdf |
| Task file: | C:\CAMSIZER\CAMSYS\Grave_red.afg |
| Time: | 11.08.2015 , 15:34 , duration 0 min 56 s at 1.0 % covered area, image rate 1:1 and 60 mm feeder |
| Particle model: | xFe max |
| No. of particles: | CCD-B = 9654 , CCD-Z = 2700 |
| Fitting: | no |
| Material: | GRAVE RED |
| Comment: | MUESTRA FRANCISCO GTZ |

| Size class | [mm] | ASTM(+) | No(-) | Retenido [%] | SPHT3 | b/3 | PDN |
|------------|-------|------------|----------|--------------|-------|-------|-------|
| 0.000 - | 0.182 | PAN | #80 | 99.99 | 0.884 | 0.799 | 42577 |
| 0.182 - | 0.364 | #80 | 0.01433" | 99.98 | 0.840 | 0.687 | 2050 |
| 0.364 - | 0.546 | 0.01433" | 0.02150" | 99.98 | 0.807 | 0.679 | 243 |
| 0.546 - | 0.728 | 0.02150" | 0.02866" | 99.98 | 0.940 | 0.846 | 13 |
| 0.728 - | 0.910 | 0.02866" | 0.03583" | 99.97 | 0.876 | 0.646 | 9 |
| 0.910 - | 1.092 | 0.03583" | 0.04299" | 99.97 | | | 0 |
| 1.092 - | 1.274 | 0.04299" | 0.05016" | 99.97 | | | 0 |
| 1.274 - | 1.456 | 0.05016" | 0.05732" | 99.97 | 0.720 | 0.439 | 2 |
| 1.456 - | 1.638 | 0.05732" | 0.06449" | 99.97 | | | 0 |
| 1.638 - | 1.820 | 0.06449" | 0.07165" | 99.97 | 0.721 | 0.642 | 1 |
| 1.820 - | 2.002 | 0.07165" | #10 | 99.97 | | | 0 |
| 2.002 - | 2.184 | #10 | 0.08598" | 99.97 | 0.881 | 0.765 | 1 |
| 2.184 - | 2.366 | 0.08598" | #8 | 99.97 | | | 0 |
| 2.366 - | 2.548 | #8 | 0.10031" | 99.97 | | | 0 |
| 2.548 - | 2.730 | 0.10031" | 0.10748" | 99.96 | 0.811 | 0.697 | 1 |
| 2.730 - | 2.912 | 0.10748" | 0.11465" | 99.96 | 0.844 | 0.630 | 1 |
| 2.912 - | 3.094 | 0.11465" | 0.12181" | 99.94 | 0.931 | 0.781 | 2 |
| 3.094 - | 3.276 | 0.12181" | 0.12898" | 99.91 | 0.854 | 0.755 | 2 |
| 3.276 - | 3.458 | 0.12898" | 0.13614" | 99.87 | 0.895 | 0.790 | 2 |
| 3.458 - | 3.640 | 0.13614" | 0.14331" | 99.88 | 0.890 | 0.772 | 9 |
| 3.640 - | 3.822 | 0.14331" | 0.15047" | 99.09 | 0.669 | 0.770 | 27 |
| 3.822 - | 4.004 | 0.15047" | #5 | 98.08 | 0.879 | 0.753 | 46 |
| 4.004 - | 4.186 | #5 | 0.16480" | 96.26 | 0.872 | 0.741 | 71 |
| 4.186 - | 4.368 | 0.16480" | 0.17197" | 93.56 | 0.871 | 0.744 | 94 |
| 4.368 - | 4.550 | 0.17197" | 0.17913" | 90.65 | 0.854 | 0.693 | 111 |
| 4.550 - | 4.732 | 0.17913" | #4 | 86.97 | 0.857 | 0.708 | 103 |
| 4.732 - | 4.914 | #4 | 0.19346" | 82.51 | 0.853 | 0.696 | 127 |
| 4.914 - | 5.096 | 0.19346" | 0.20063" | 76.93 | 0.853 | 0.688 | 148 |
| 5.096 - | 5.278 | 0.20063" | 0.20780" | 71.72 | 0.842 | 0.671 | 126 |
| 5.278 - | 5.460 | 0.20780" | 0.21496" | 65.87 | 0.833 | 0.660 | 130 |
| 5.460 - | 5.642 | 0.21496" | #3.5 | 59.62 | 0.846 | 0.685 | 125 |
| 5.642 - | 5.824 | #3.5 | 0.22929" | 54.62 | 0.827 | 0.654 | 94 |
| 5.824 - | 6.006 | 0.22929" | 0.23646" | 49.92 | 0.824 | 0.643 | 87 |
| 6.006 - | 6.188 | 0.23646" | 0.25" | 45.50 | 0.826 | 0.635 | 67 |
| 6.188 - | 6.370 | 0.25" | 0.25" | 40.94 | 0.831 | 0.660 | 75 |
| 6.370 - | 6.552 | 0.25" | 0.25795" | 36.84 | 0.849 | 0.679 | 46 |
| 6.552 - | 6.734 | 0.25795" | 0.265" | 32.39 | 0.852 | 0.700 | 56 |
| 6.734 - | 6.916 | 0.265" | 0.27228" | 29.40 | 0.825 | 0.668 | 31 |
| 6.916 - | 7.098 | 0.27228" | 0.27945" | 25.79 | 0.832 | 0.653 | 40 |
| 7.098 - | 7.280 | 0.27945" | 0.28661" | 21.98 | 0.825 | 0.651 | 40 |
| > 7.280 | | > 0.28661" | | 0.00 | 0.806 | 0.618 | 156 |

| | |
|--------------|---|
| Result file: | C:\CAMSIZER\CAMDAT\Grave red\Grave_red_xFemax_20150811_153416_001.rdf |
| Task file: | C:\CAMSIZER\CAMSYS\Grave_red.afg |



| | |
|------------------------|--------------------------|
| Q3 (SPHT=0.9) = 79.5 % | Mean value SPHT3 = 0.841 |
| Q3 (Symm=0.9) = 59.3 % | Mean value Symm3 = 0.888 |
| Q3 (b/3=0.9) = 58.0 % | Mean value b/3 = 0.677 |