



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

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/072/15

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

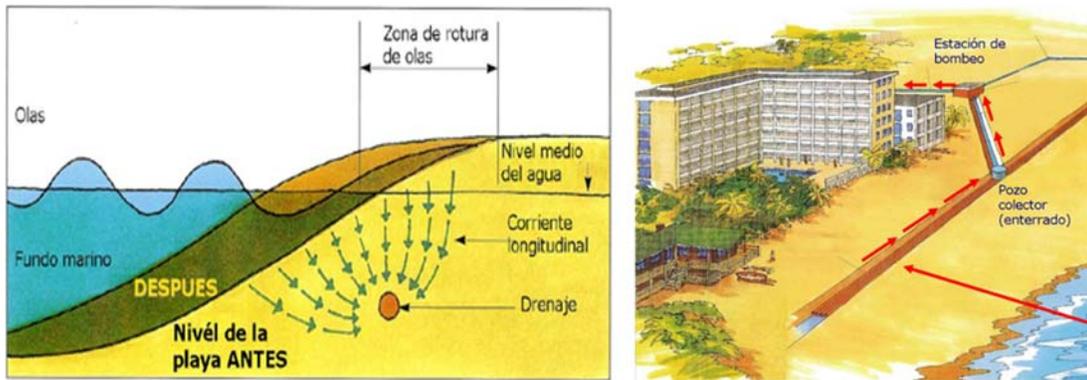


Figura 1. 1 Dren de playa



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 remplazo 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

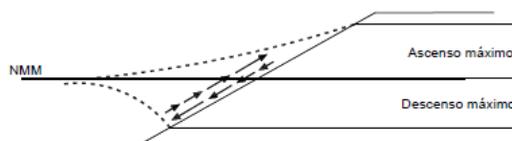


Figura 1. 14 Ascenso máximo y Descenso mínimo

- 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

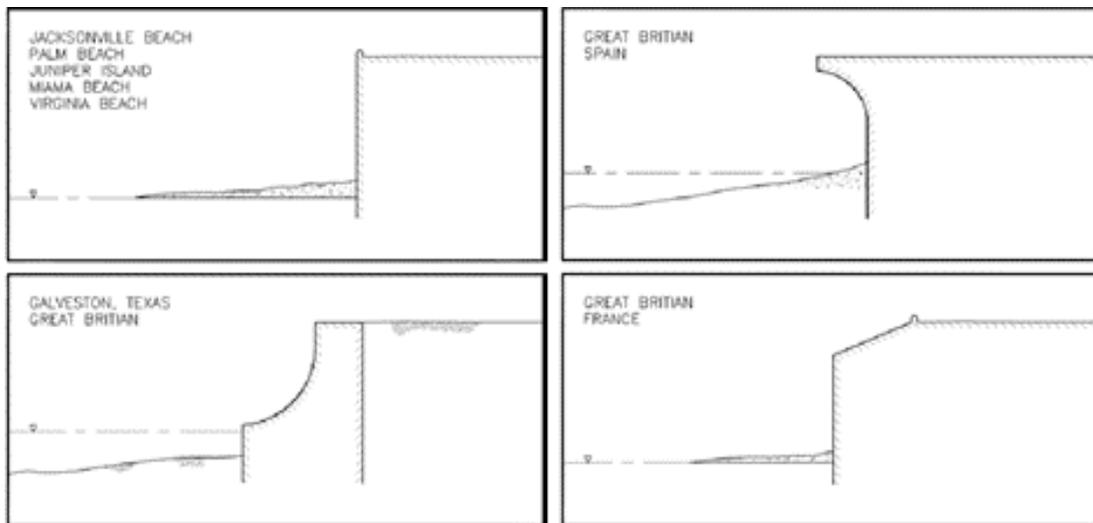


Figura 1. 15 Configuración de muro

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

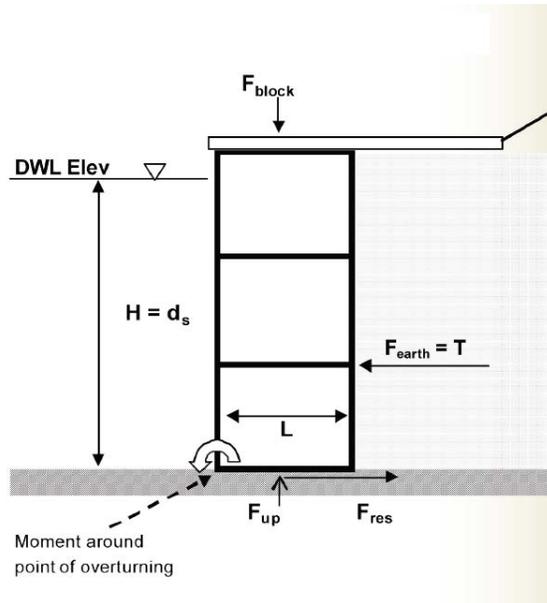


Figura 1. 16 Análisis mecánico

f. DISEÑO DE CIMENTACIÓN

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

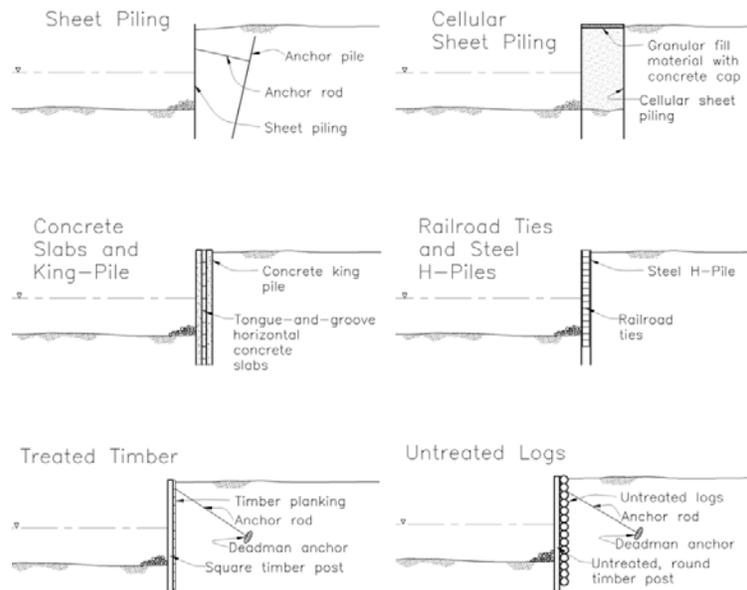


Figura 1. 17 Tipos de cimentación para muros

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

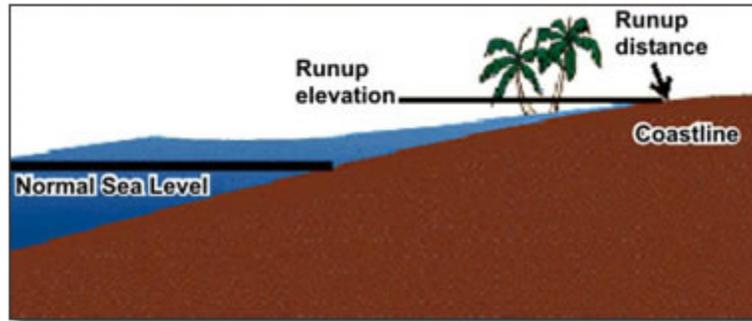


Figura 1.18 Ascenso máximo

- 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)

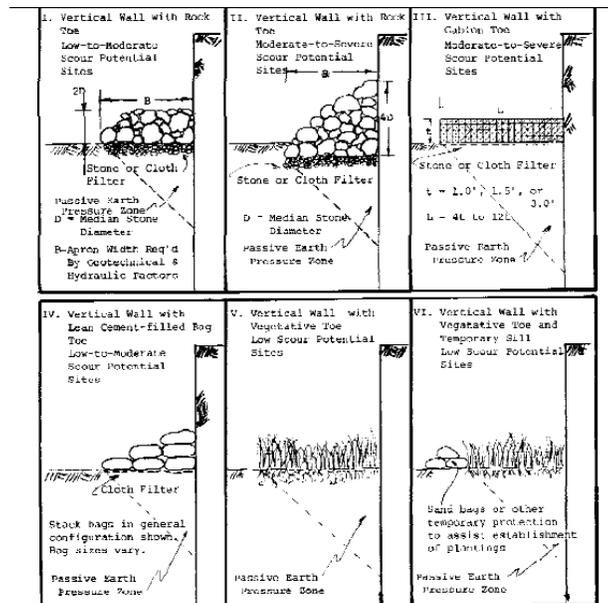


Figura 1.19 Tipos de protección contra la socavación

- 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.

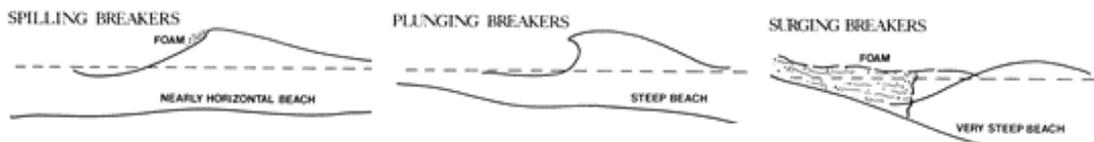


Figura 2.1 Tipo de rotura de ola

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

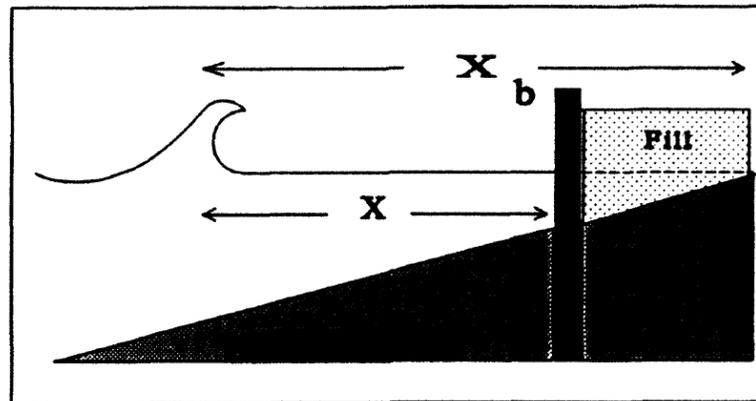


Figura 2. 2 Parámetro X_s de Jones

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

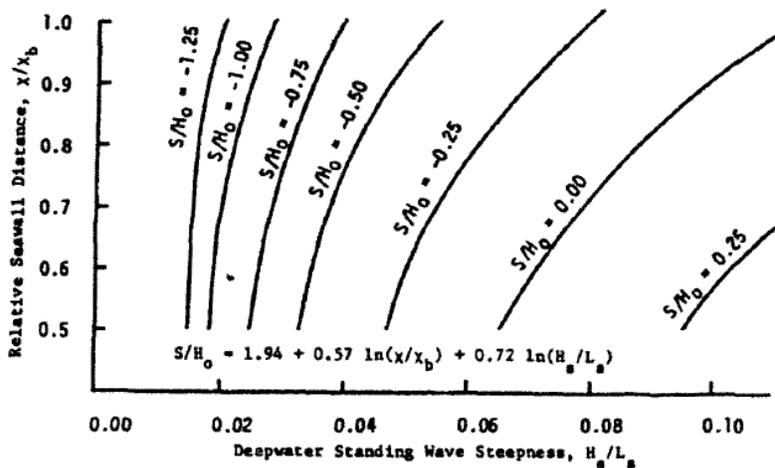


Figura 2. 3 Relación entre la profundidad de socavación, altura de ola y distancia relativa al muro (SCHILLER)

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	Coefficiente de fricción interna del material
C_D	Coefficiente 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.

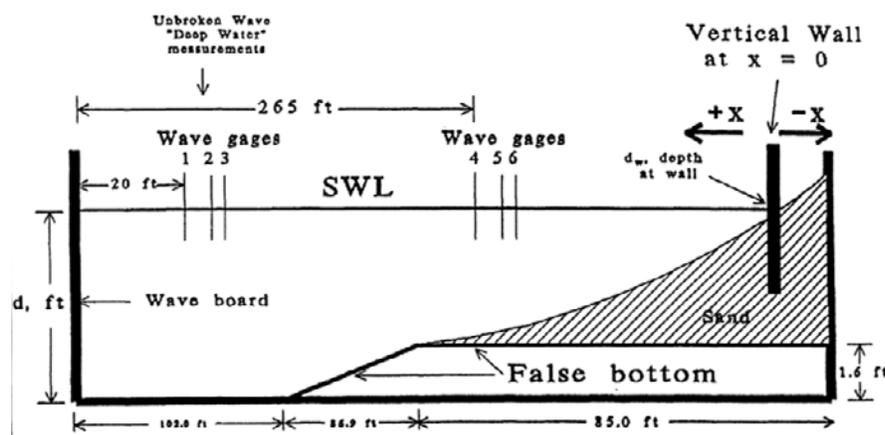


Figura 2.4 Configuración del experimento de FOWLER 1992

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.

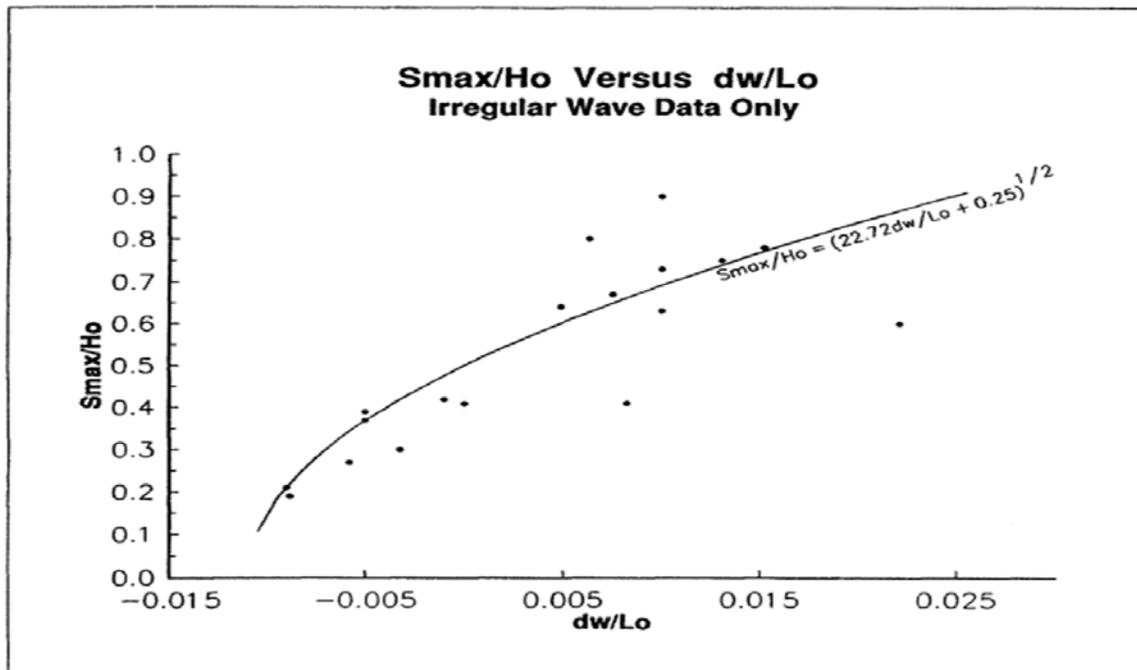


Figura 2. 5 Profundidad de socavación relativa máxima contra profundidad relativa frente a muro

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.

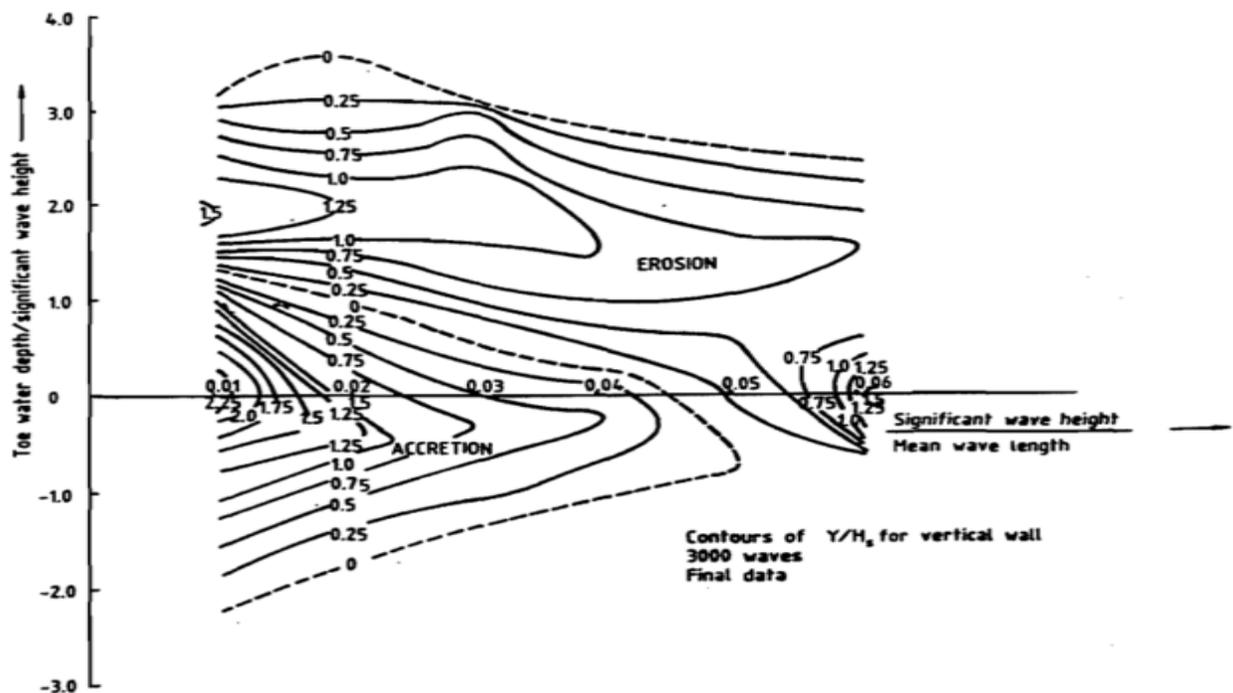


Figura 2. 6 Predicción de la profundidad de socavación frente a muro POWELL

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, resultado 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.

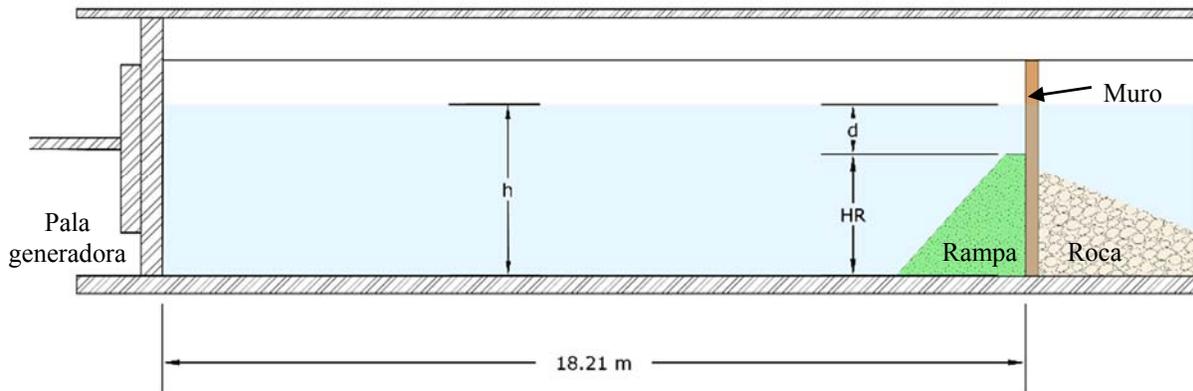


Figura 3. 3 Esquema de la prueba

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.

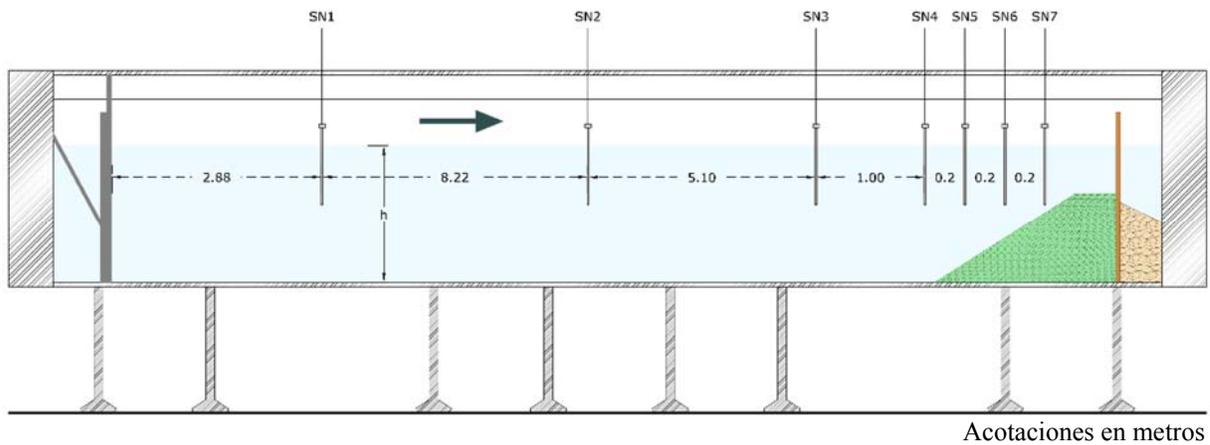


Figura 3. 4 Terminal para los sensores de nivel



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

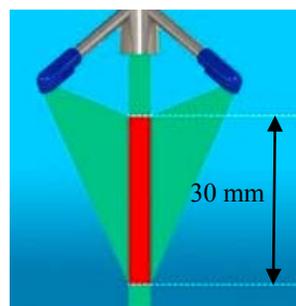


Figura 3.8 Perfil de Velocidad



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

Hasselmann en 1793 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 $f_p = \frac{1}{T_p}$

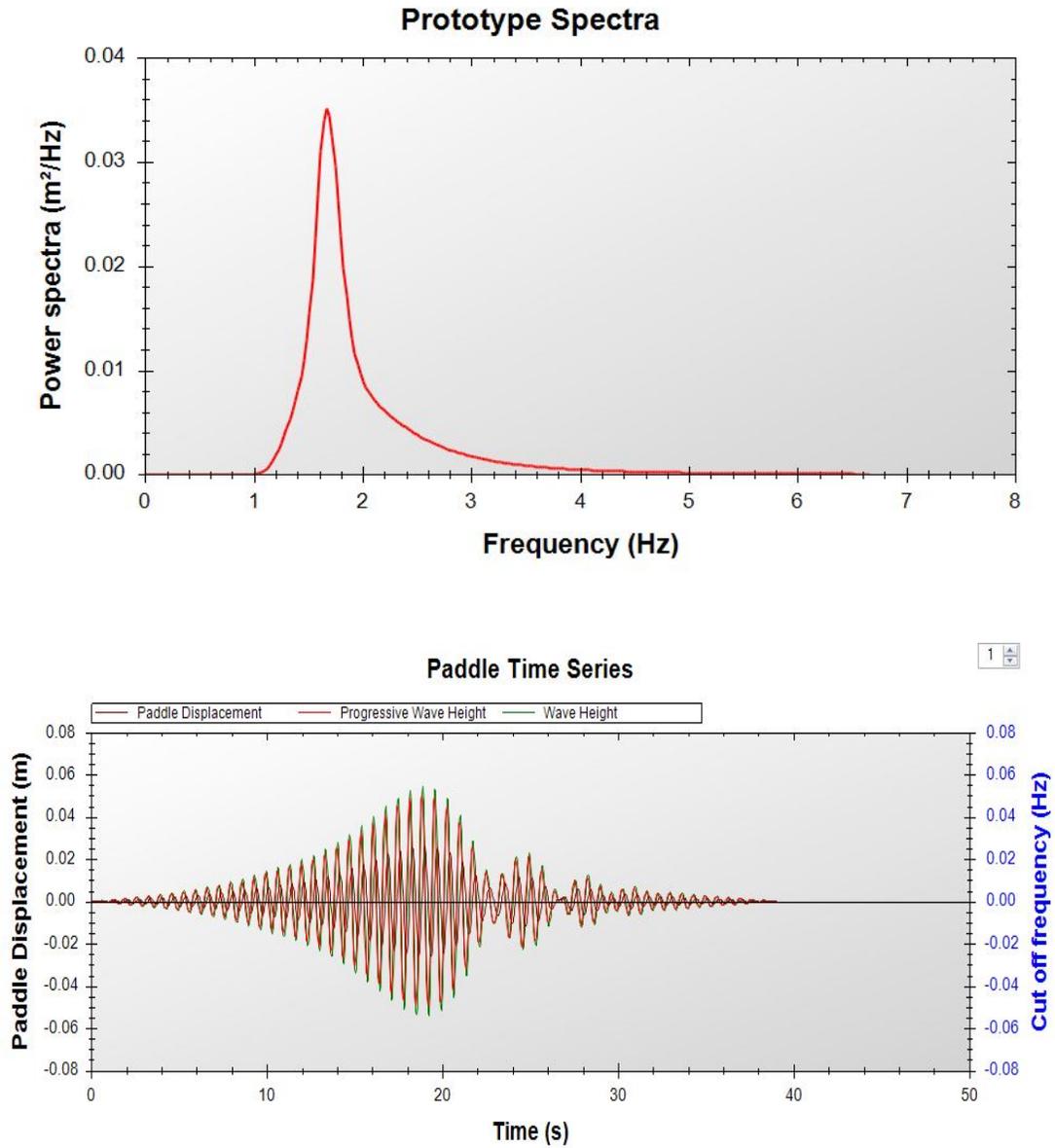


Figura 3. 11 Espectro JONSWAP

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.

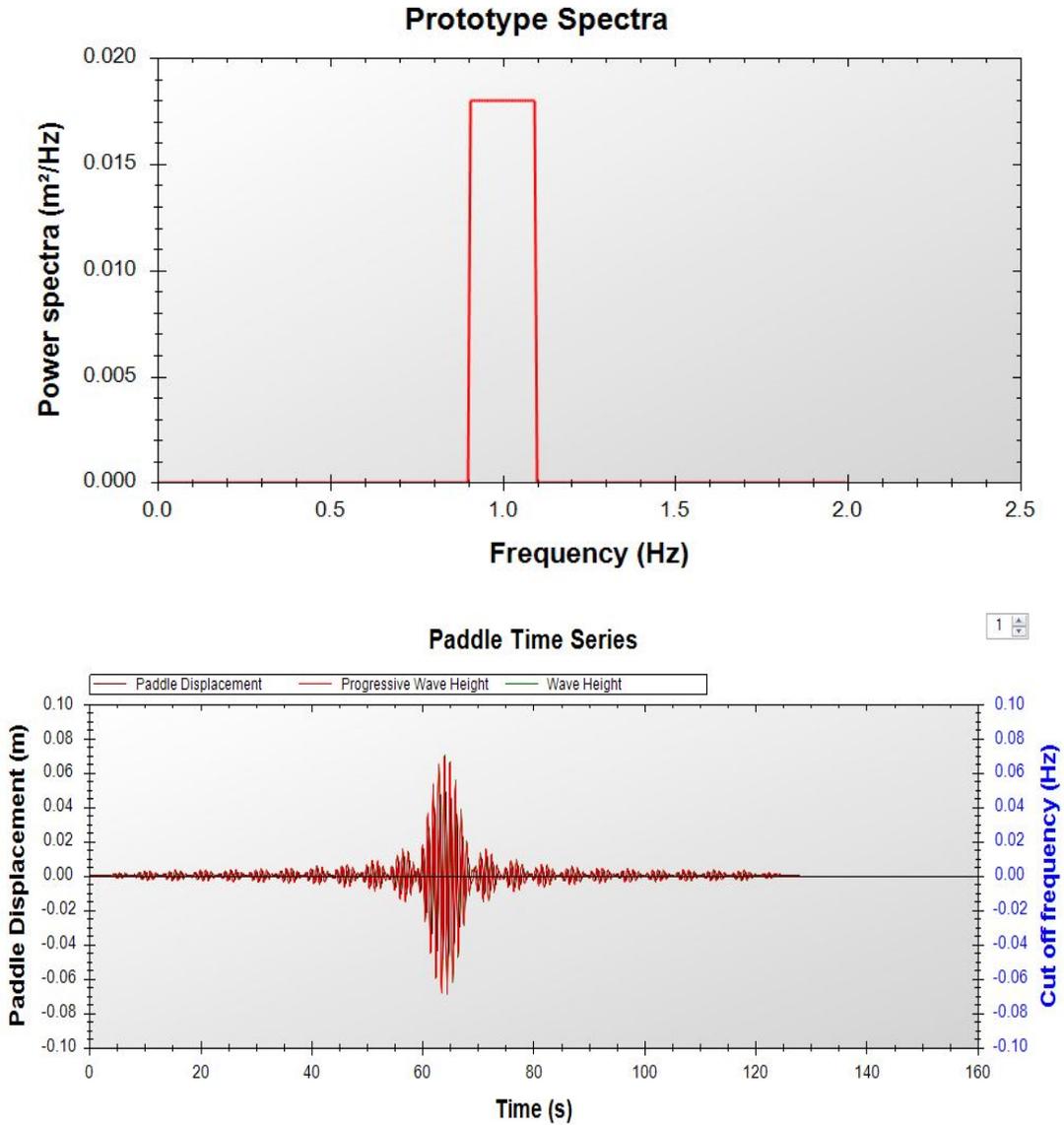


Figura 3. 12 Espectro Top-Hat

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.

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

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

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

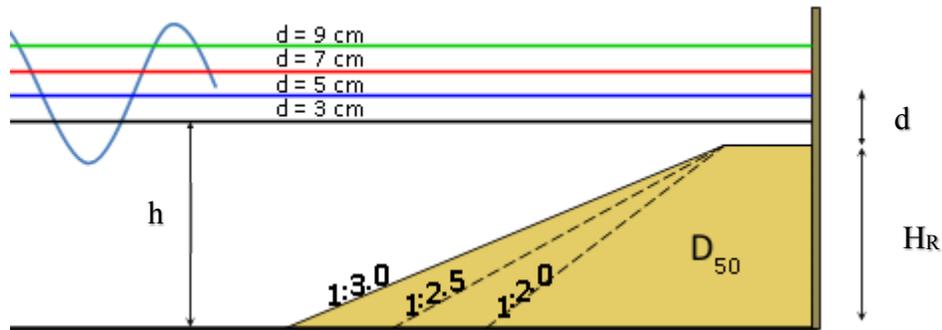


Figura 3. 14 Esquema de altura de estructura, tirante de agua y pendiente

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.

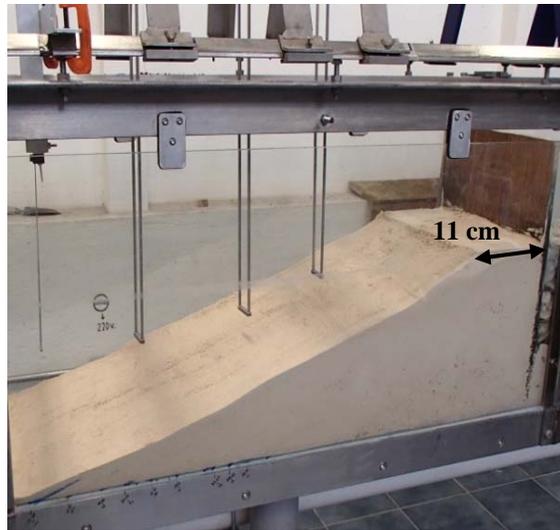


Figura 3.15 Ancho de Berma

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 .

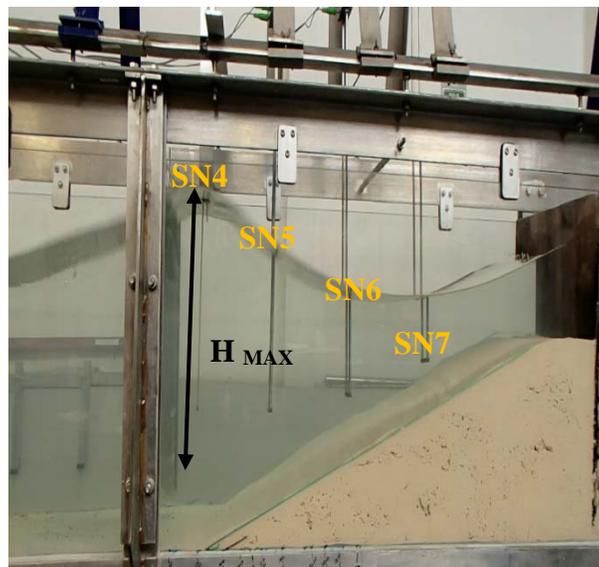


Figura 3.16 Ubicación de sensores de nivel sobre la rampa

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

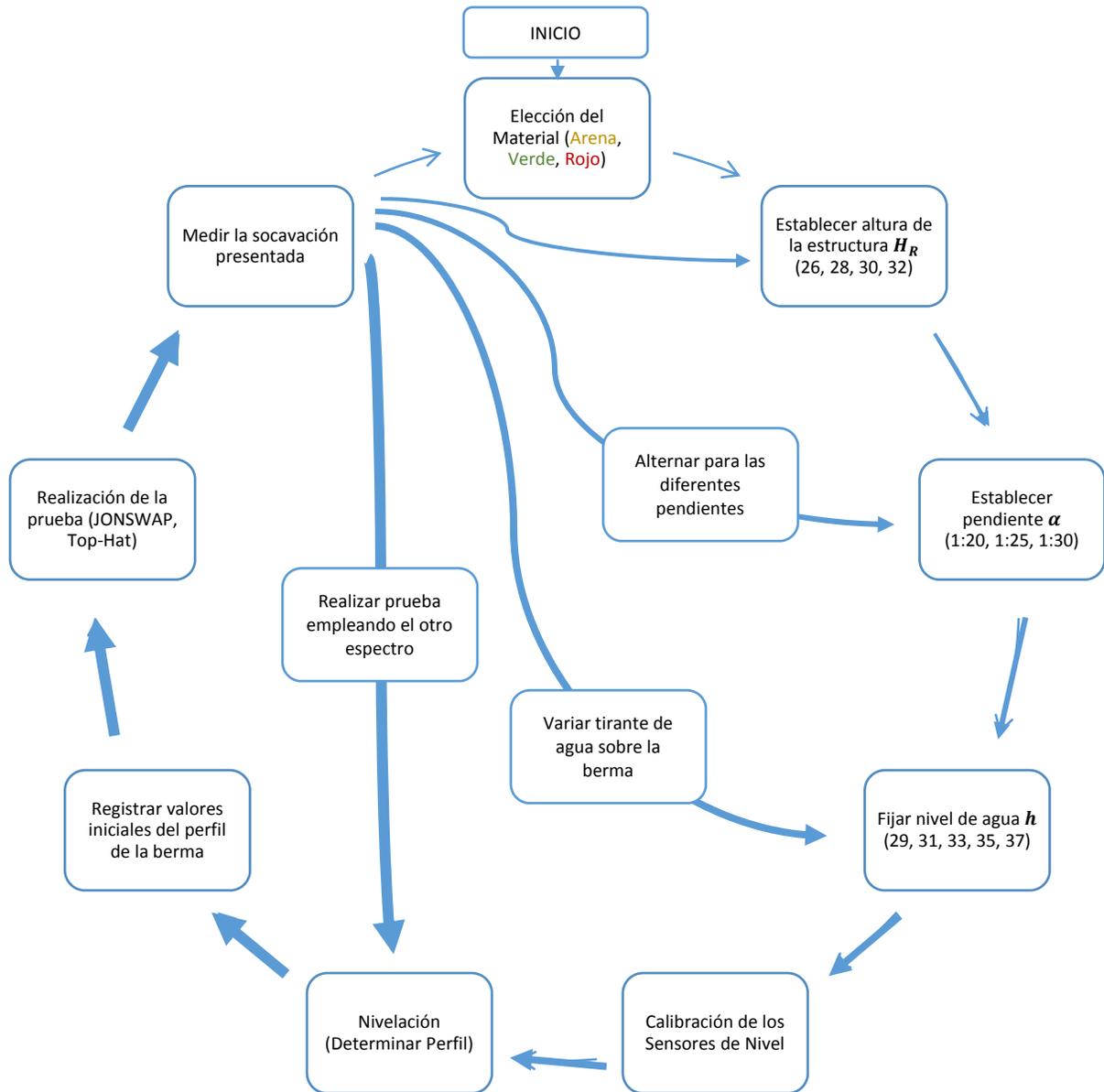
La realización de los ensayos siguió la metodología que se describe a continuación. El proceso fue cíclico variando los grados de libertad mencionados.

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.

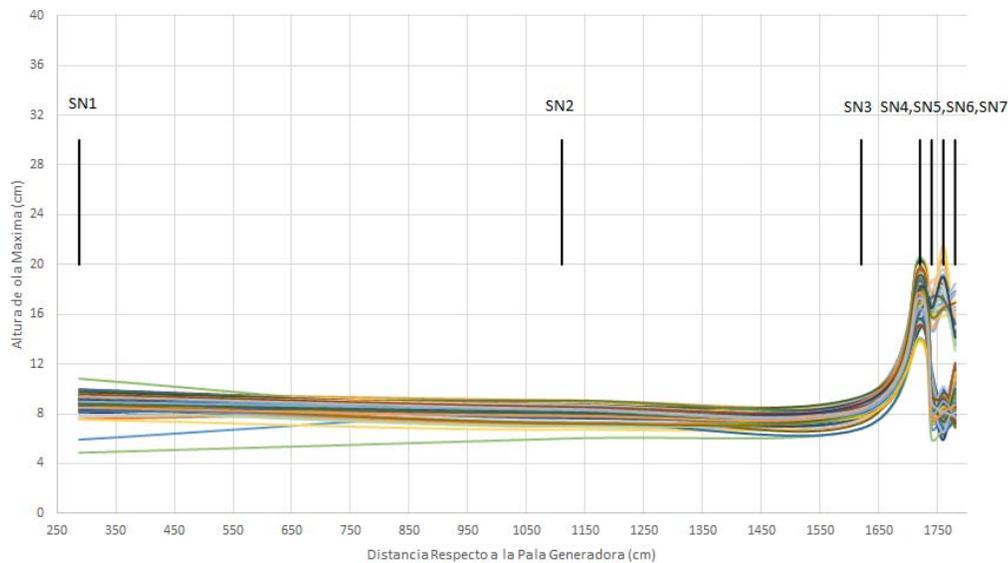


Figura 4. 1 Perfil de superficie libre del agua (H_{MAX}) para espectro Jonswap

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.

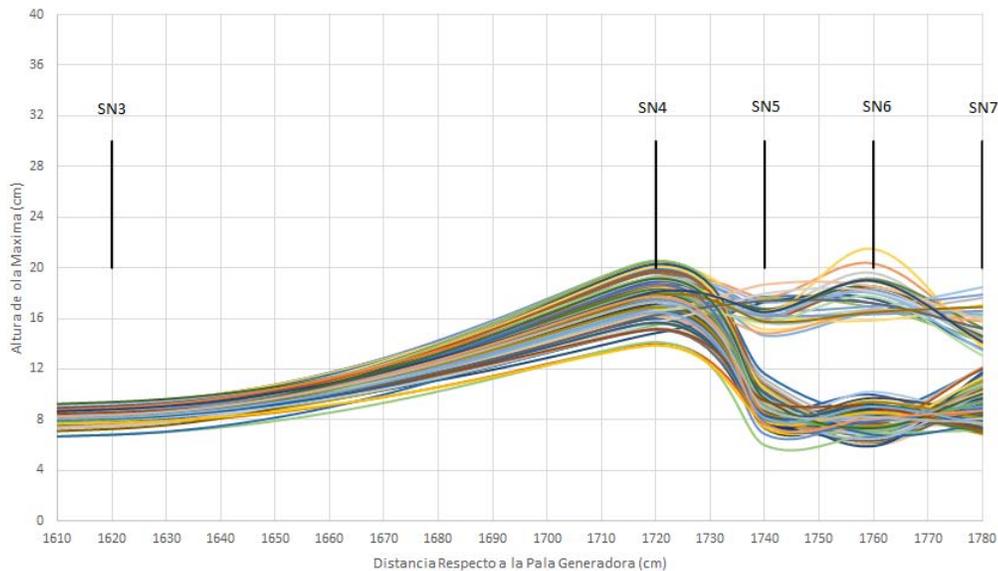


Figura 4. 2 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Jonswap)

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.

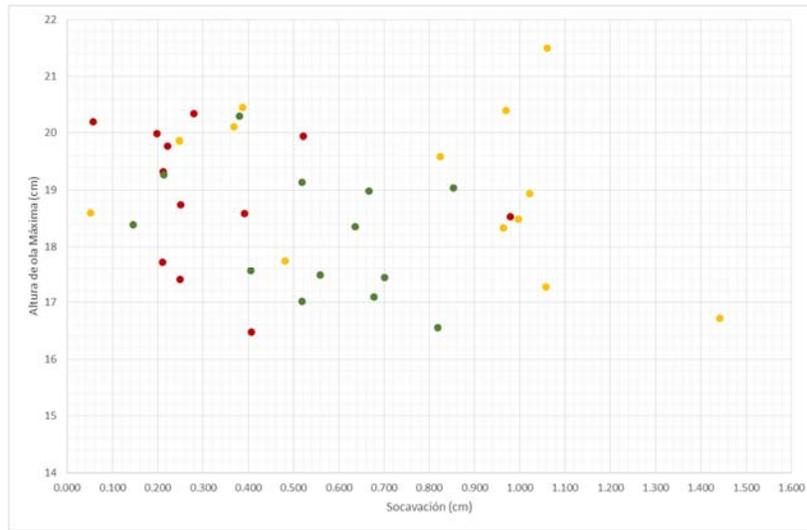


Figura 4. 3 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:2.0

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.

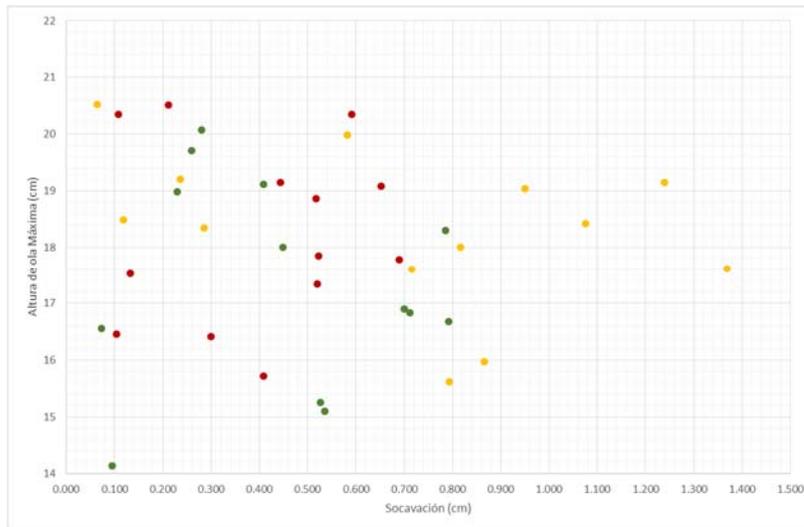


Figura 4. 4 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:2.5

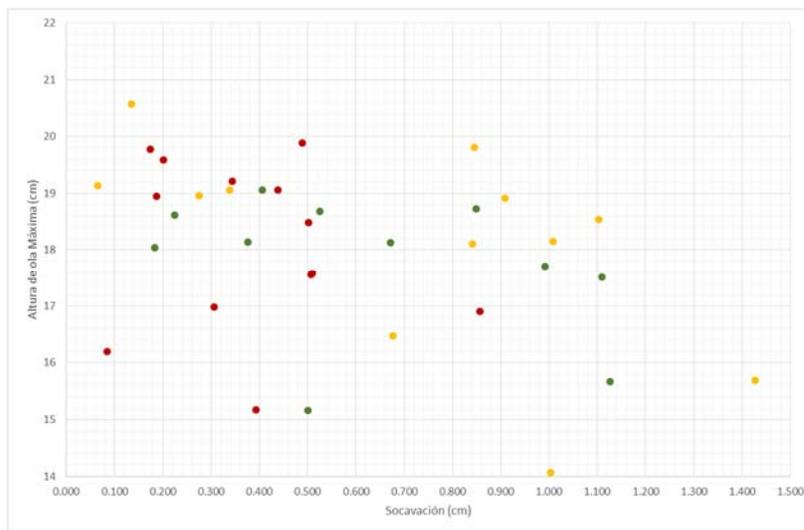


Figura 4. 5 Relación entre altura de ola máxima y socavación para talud 1:3.0

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.

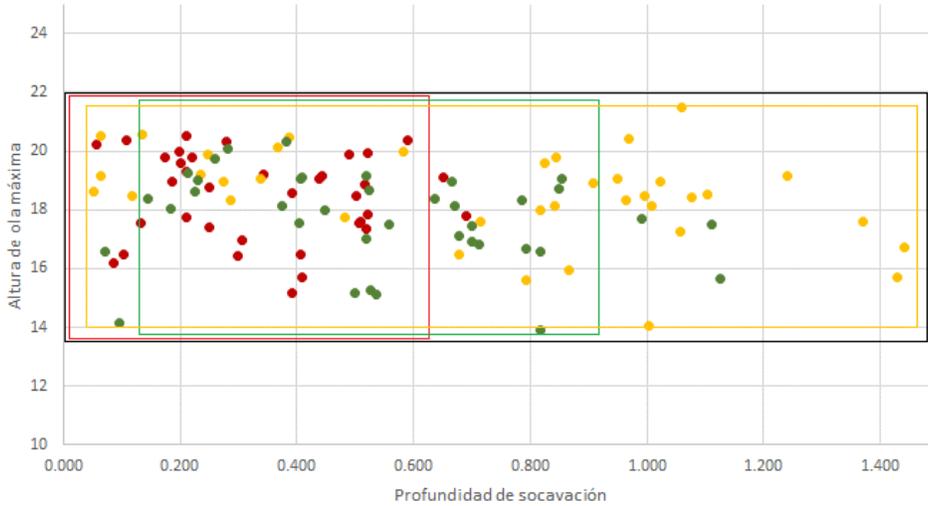


Figura 4. 6 Esquema de agrupación de los ensayos para espectro Jonswap y todas las pendientes

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

$$L = \frac{g T^2}{2 \pi} \tag{IV.1}$$

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:

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

$$L = 0.5621 m \tag{IV.3}$$

$$L = 56.207 cm \tag{IV.4}$$

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.

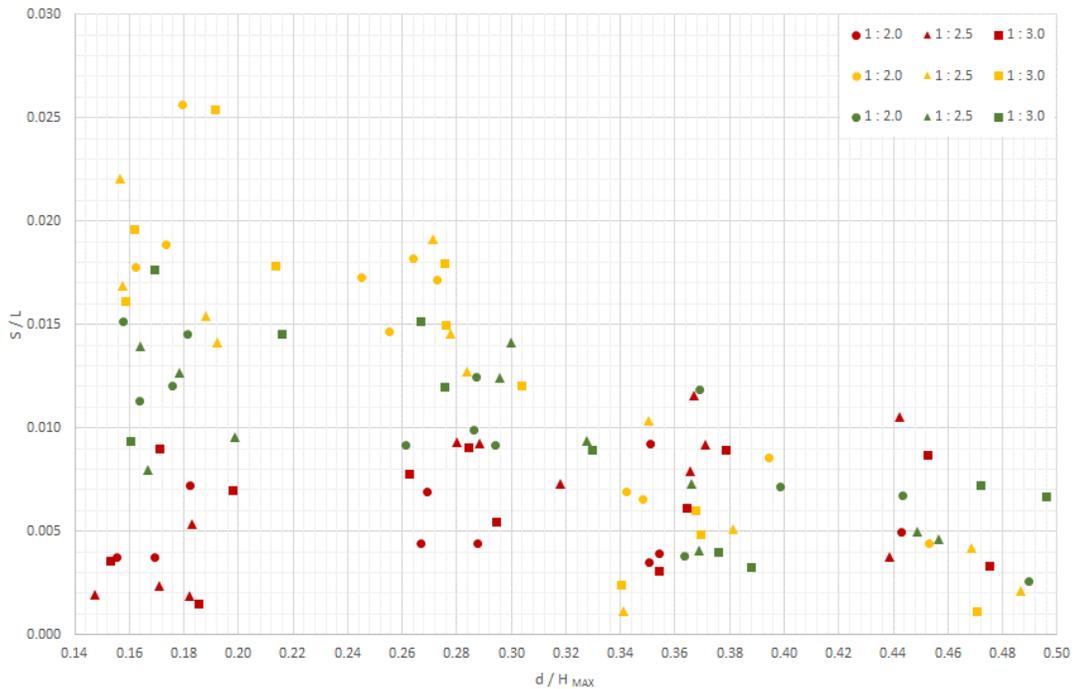


Figura 4. 7 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos para espectro Jonswap

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.

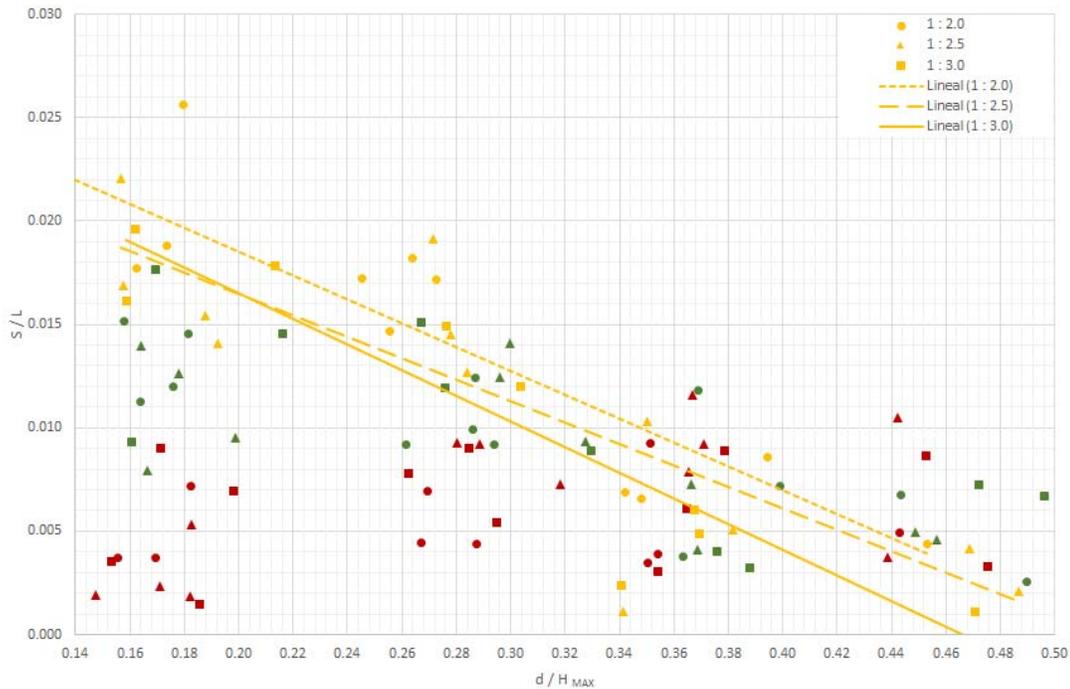


Figura 4. 8 Regresión lineal para arena y pendiente específica (Jonswap)

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

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.0576 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0288 \tag{IV.5}$$

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

$$\frac{S_{MAX}}{L} = -0.027 \frac{d}{H_{MAX}} + 0.0177 \tag{IV.6}$$

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.

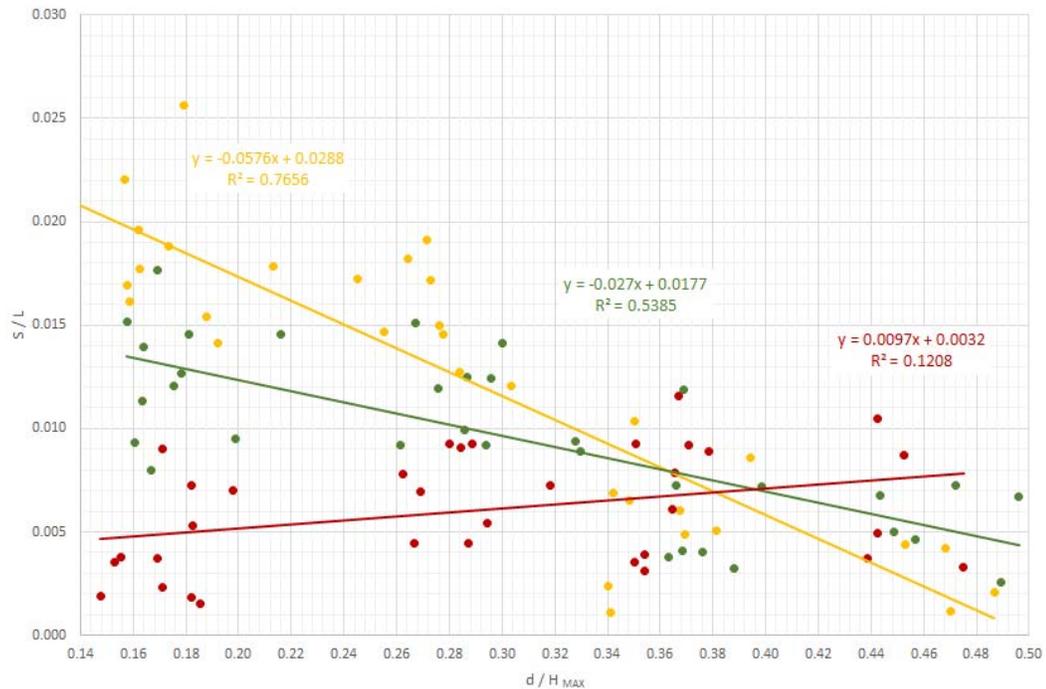


Figura 4. 9 Representación del modelo de predicción de la socavación para cada material (Jonswap)

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:

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

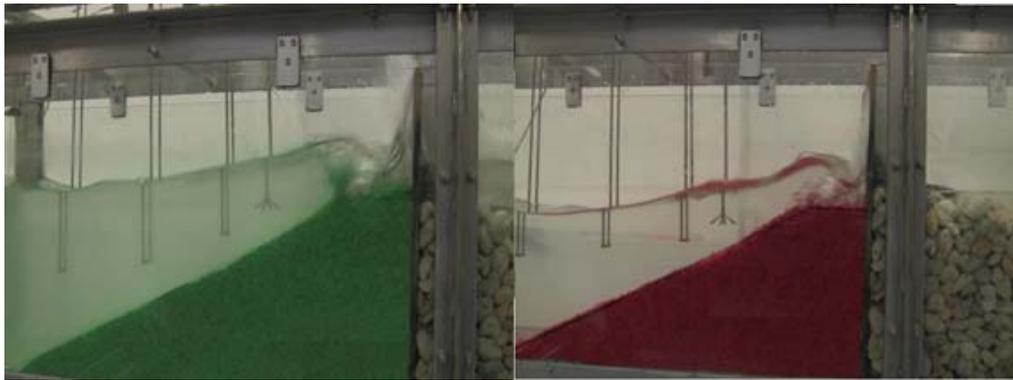


Figura 4. 10 Rotura de ola sobre la berma en forma de voluta para espectro Jonswap

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.

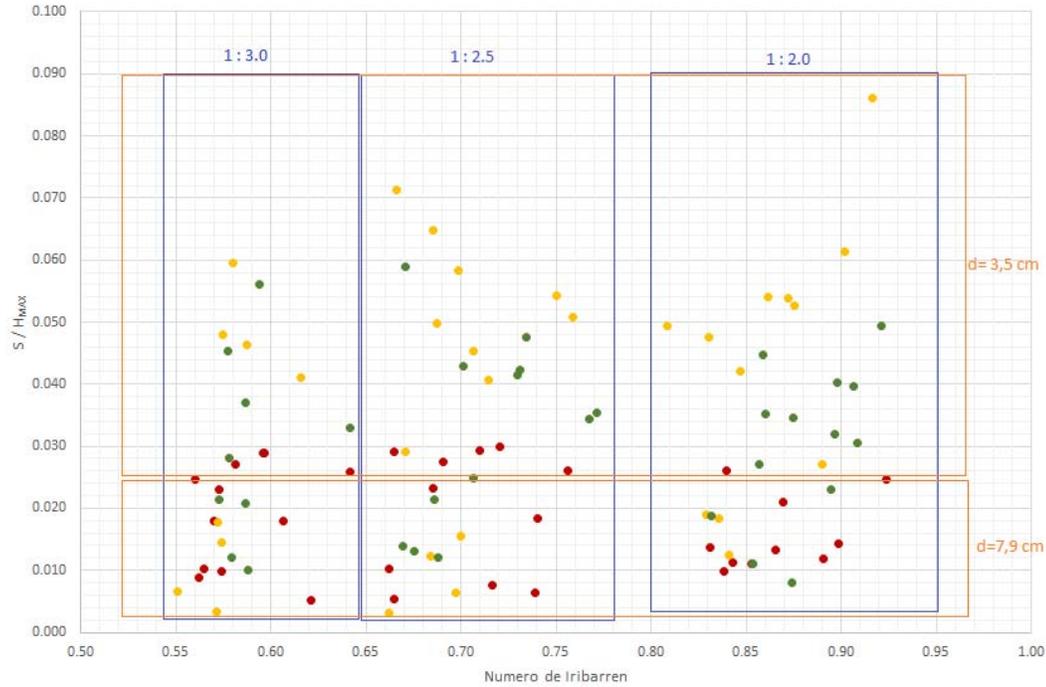


Figura 4. 11 Socavación relativa contra número de Iribarren para espectro Jonswap

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.

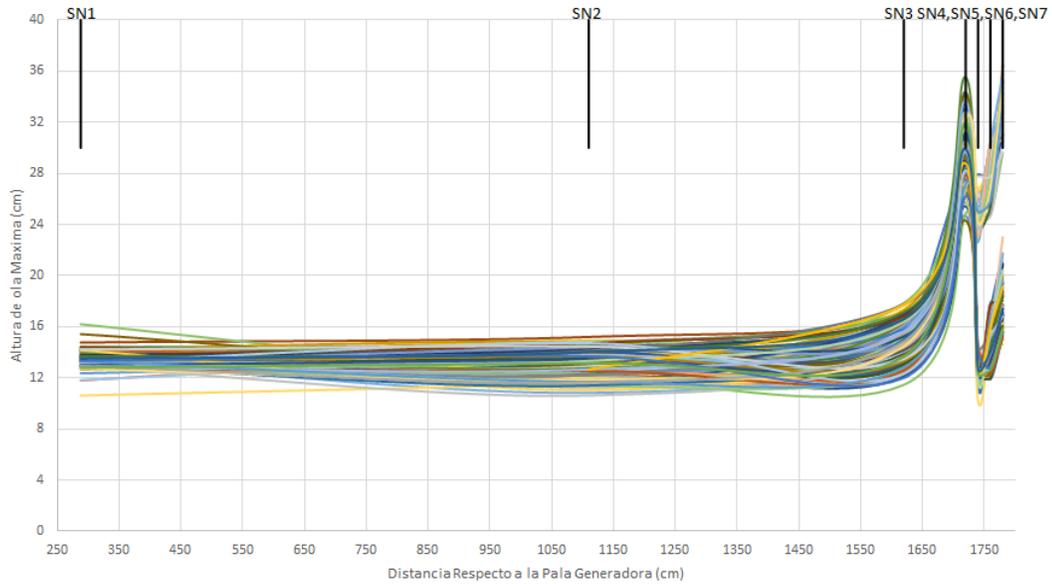


Figura 4. 12 Perfil de superficie libre del agua (H_{MAX}) espectro Top-Hat

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.

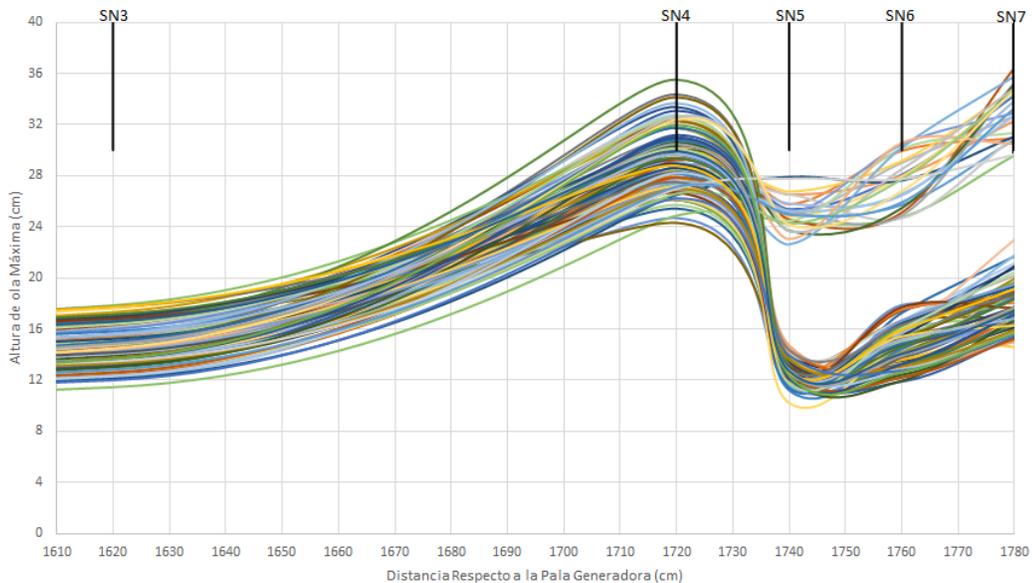


Figura 4. 13 Altura de ola máxima próxima a la rampa (Top-Hat)

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.

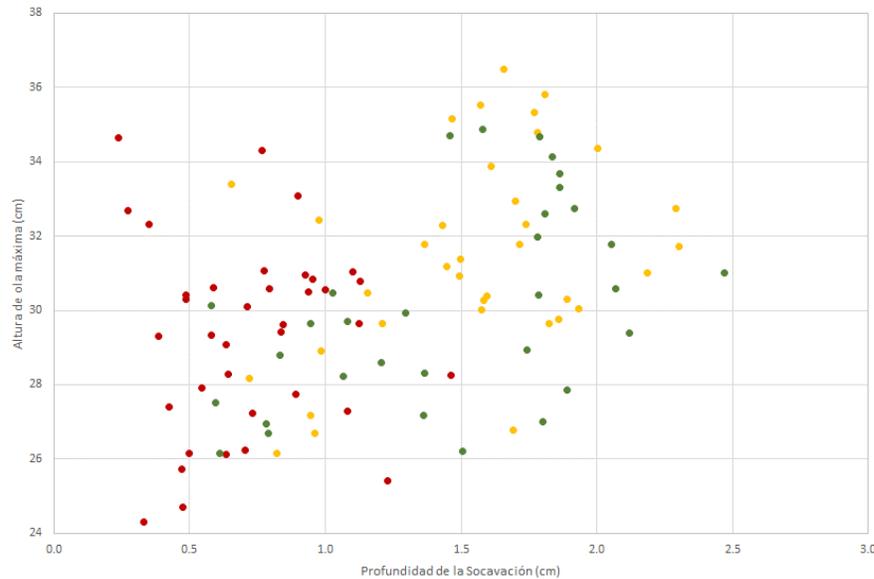


Figura 4. 14 Altura de ola máxima contra socavación para espectro Top-Hat

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.

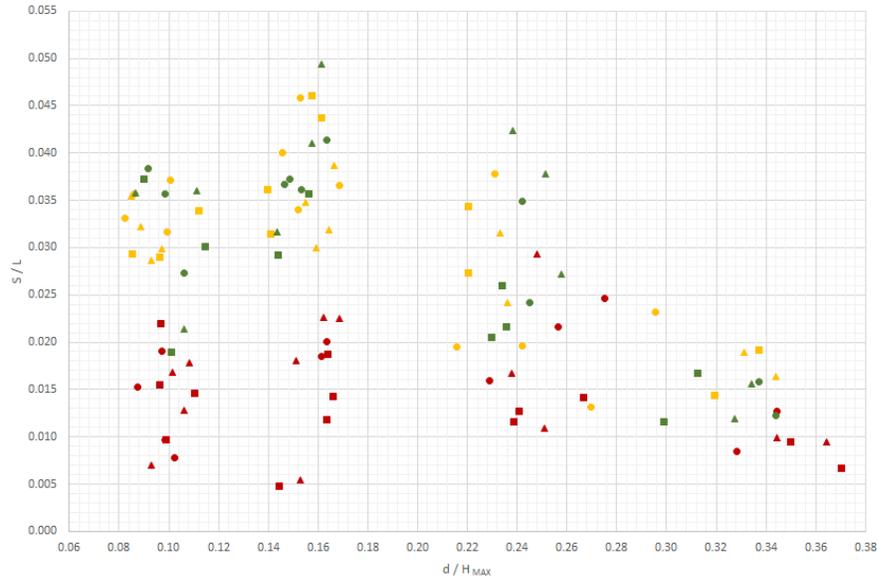


Figura 4. 15 Relación entre profundidad de socavación y parámetros hidráulicos (Top-Hat)

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.

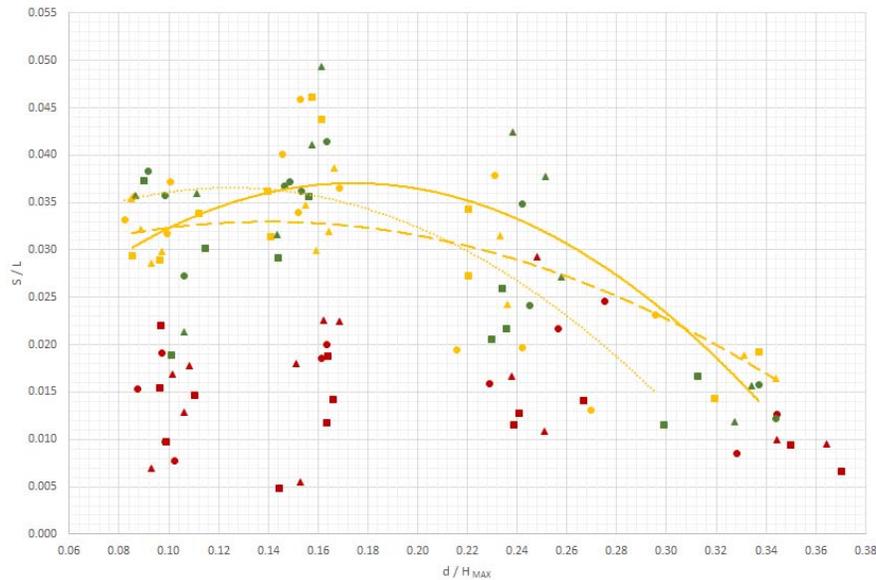


Figura 4. 16 Análisis de regresión cuadrática para arena y pendiente específica (Top-Hat)

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:

$$0.13 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.18 \tag{IV.12}$$

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:

$$0.05 < \frac{d}{H_{MAX}} < 0.35 \tag{IV.12}$$

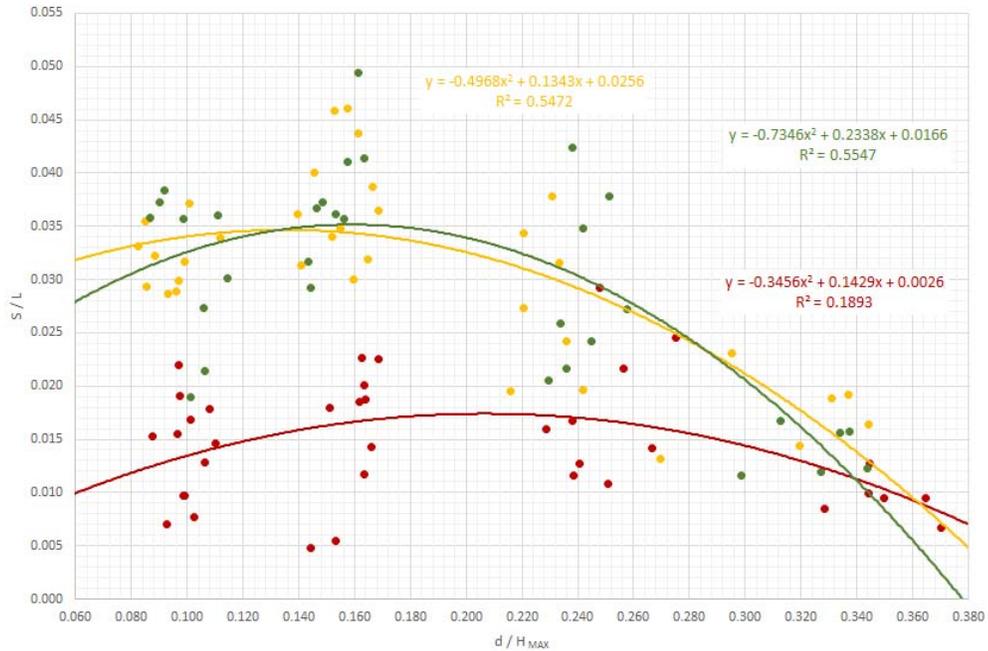


Figura 4. 17 Representación del modelo de predicción de la socavación para espectro Top-Hat

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.

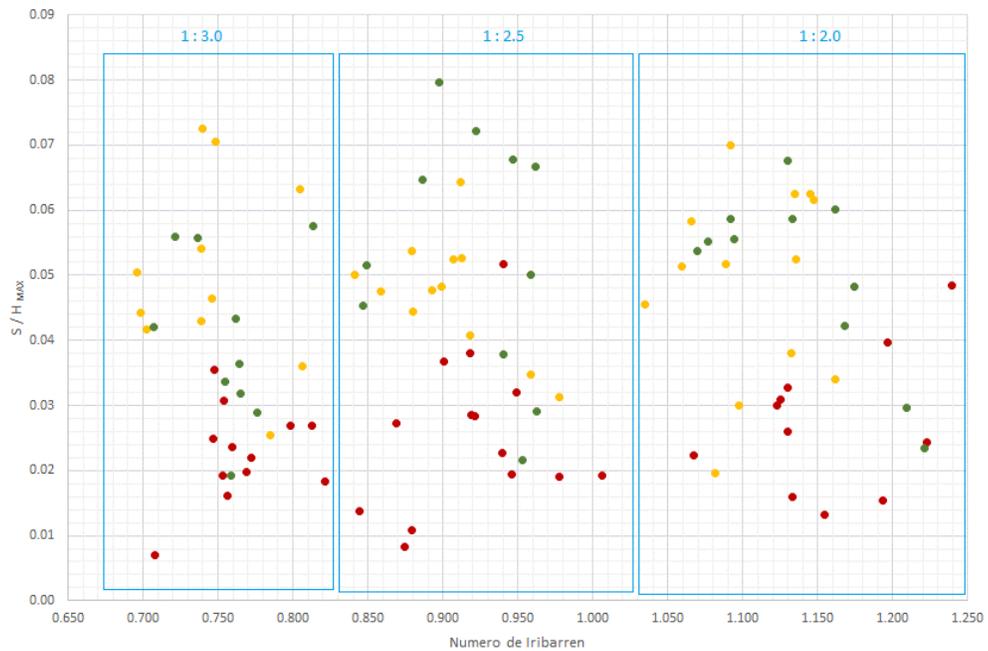


Figura 4. 18 Socavación relativa contra número de Iribarren para espectro Top-Hat

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.

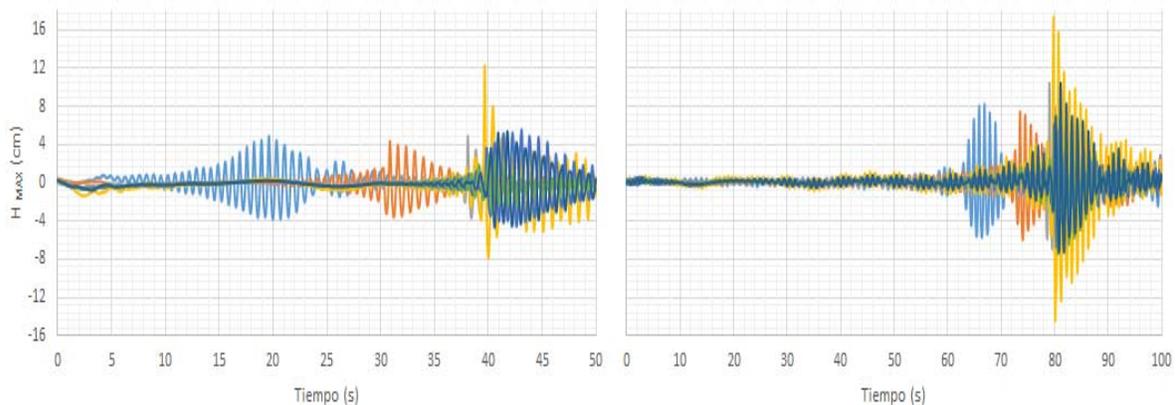


Figura 5.1 Condiciones Hidrodinámicas para ambos espectros

- 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



INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CAMSIZER®

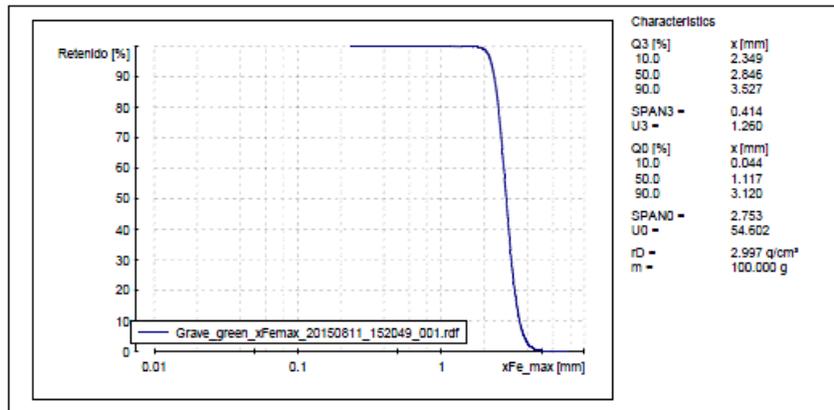


ANÁLISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	DRV
Result file:	C:\CAMSIZE\CAMDAT\Grave_green\Grave_green_xFemax_20150811_152049_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\CAMSYS\Grave_green.afg
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:	ANÁLISIS FRANCISCO GTZ

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	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	0.854	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	0.784	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	0.854	0.731	23
1.698 -	1.775	#12	0.06988*	99.72	0.851	0.723	27
1.775 -	1.852	0.06988*	0.07592*	99.60	0.872	0.767	48
1.852 -	1.929	0.07592*	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	0.759	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	0.11546*	42.39	0.843	0.658	891
2.933 -	3.010	0.11546*	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:\CAMSIZE\CAMDAT\Grave_green\Grave_green_xFemax_20150811_152049_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\CAMSYS\Grave_green.afg



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

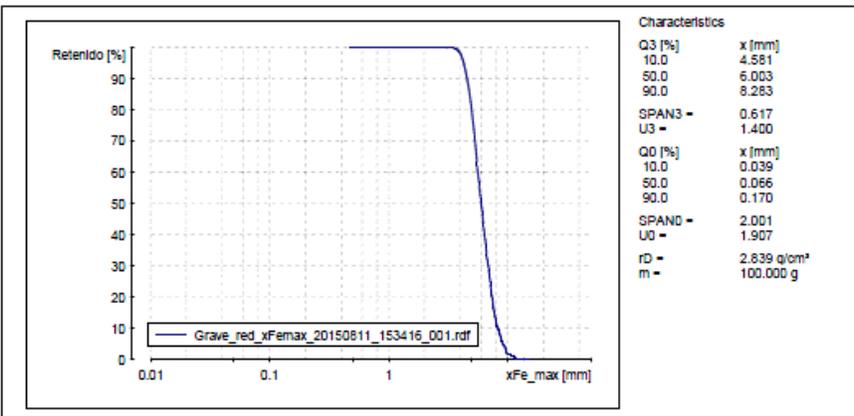


ANÁLISIS DE ARENA DE COSTAS MEXICANAS

Company:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM
User:	DRV
Result file:	C:\CAMSIZE\CAMDAT\Grave_red\Grave_red_xFemax_20150811_153416_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\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 = 9854, CCD-Z = 2700
Fitting:	no
Material:	GRAVE RED
Comment:	MUESTRA FRANCISCO GTZ

Size class	[mm]	ASTM(+)	No(-)	Retenido [%]	SPHT3	b/13	PDN
0.000 -	0.182	PAN	#60	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	0.889	0.770	27
3.822 -	4.004	0.15047*	#5	98.06	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*	90.55	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	158

Result file:	C:\CAMSIZE\CAMDAT\Grave_red\Grave_red_xFemax_20150811_153416_001.rdf
Task file:	C:\CAMSIZE\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 (b1=0.9) = 98.0 %	Mean value b13 = 0.677