



Universidad  
Nacional  
de Córdoba

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FISICAS Y NATURALES**

## **PRÁCTICA SUPERVISADA**

**“MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE OLEAJES Y DEL RUN-UP EN  
MODELO FÍSICO DE LA PRESA GOBERNADOR JORGE  
CEPERNIC”**

**CARRERA:** INGENIERIA CIVIL

**ALUMNO:** REYNA IGLESIAS, LEANDRO RAUL

**TUTOR INTERNO:** DR. ING. GYSSELS, PAOLO

**TUTOR EXTERNO:** DR. ING. TARRAB, LETICIA

**AÑO 2017**

## AGRADECIMIENTOS

---

Antes que nada, quisiera agradecerle a mi tutor Paolo Gyssels por darme la oportunidad de trabajar con él en este proyecto, por el tiempo y dedicación que invirtió para que esta Práctica Supervisada fuese una experiencia provechosa para mí, tanto en lo académico como en lo laboral. También quiero agradecer al resto del equipo del Laboratorio de Hidráulica por su buena predisposición ante las dudas y consultas que surgían a medida que se iba trabajando.

También quisiera agradecerle a todos los que me acompañaron en este largo camino que emprendí hace años:

- A mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron durante la carrera, siempre con palabras de aliento y tirando para adelante.
- A mis hermanas Mariana y Daniela que al igual que mis padres fueron un gran apoyo.
- A mi novia Celeste por la buena onda y la contención en mi último año de carrera.
- A mi segunda familia (MLCM), con quienes pase horas, días, años estudiando. Sin ellos esto no hubiese sido posible, todos juntos nos pusimos la meta de alcanzar el título y de a poco vamos cumpliendo. Así que gracias Colo, Santi, Yami, Aima, Hector, Toro, Caty, Facu, Dai y Marian.

## RESUMEN

---

Este informe es el resultado de un estudio experimental del modelado físico del Run Up por oleaje, sobre el talud liso e impermeable de la presa “Gobernador Jorge Cepernic”. Esta presa va a ser construida en el macro del proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz. Esta presa va a contar con una capacidad instalada de 600mw y 45 metros de altura.

La cuantificación del Run Up en la presa es de vital importancia para poder fijar las cotas de diseño, condiciones de diseño, etc. Los valores de Run Up fueron medidos en primera instancia de manera experimental, con técnicas de video en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN, de la UNC, donde se recrearon escenarios de oleaje sobre un modelo de la presa. La bibliografía sobre el tema resulta escasa, por lo que la modelación física resulta vital para la determinación del Run Up como para el ajuste de las formulaciones existentes.

En este trabajo se verifican y comparan los ajustes de los datos experimentales obtenidos con ensayos en el canal de oleaje, para un talud liso e impermeable de pendiente 1:1,5 con las principales formulaciones existentes. Los resultados se obtuvieron inicialmente con la función de absorción dinámica desactivada. En una segunda fase del trabajo se realizaron los mismos ensayos con absorción dinámica activada en la pala y se compararon los resultados obtenidos en las dos modalidades de funcionamiento.

El objetivo principal de este trabajo fue obtener datos experimentales de Run-Up ( $Ru_{2\%}$ ) procedentes de valores diferentes de altura de ola significativa  $H_s$  (entre 0.03m y 0.09m) y 2 periodos de pico  $T_p$  (1.1s y 1.3s). Se realizaron ensayos en una primera etapa sin absorción dinámica y en una segunda etapa con absorción dinámica y luego se efectuó una repetición de ambas etapas. En total se realizaron 56 ensayos.

Los datos obtenidos experimentalmente se compararon con formulaciones específicas para el cálculo del Run-Up en taludes impermeables de fuerte pendiente. Las formulaciones para la estimación del Run Up se basan en el cálculo del ascenso vertical del agua sobre el talud correspondiente al valor que representa el nivel vertical desde la línea del agua en reposo excedidos por el 2% de las olas incidentes ( $Ru_{2\%}$ ).

Finalmente se realizaron comparaciones entre los valores obtenidos con absorción dinámica activada y desactivada, y sacamos conclusiones acerca de las formulaciones utilizadas para calcular el  $Ru_{2\%}$ .

En esta Práctica Supervisada se llegó a la conclusión que las formulaciones de CEM y Ahrens son las que mejor se ajustan a los valores de Run Up obtenidos mediante ensayos experimentales y que la utilización de la Absorción Dinámica no produce cambios significativos en los valores de Run Up obtenidos en los ensayos realizados.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

INDICE DE FIGURAS .....	6
INDICE DE TABLAS .....	8
CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL.....	9
1.1. INTRODUCCIÓN:.....	9
1.2. ÁMBITO DE DESARROLLO DE LA PS .....	9
1.3. COMPLEJO HIDROELÉCTRICO “PRESIDENTE NESTOR KIRCHNER, GOBERNADOR JORGE CEPERNIC”.....	10
1.4. OBJETIVOS GENERALES .....	12
1.4.1. Objetivos Generales .....	12
1.4.2. Objetivos Específicos .....	13
1.4.3. Objetivos Personales .....	13
1.5. ALCANCE DE LA PS .....	13
1.6. PLAN DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS .....	15
CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE .....	15
2.1. MECANICA DE ONDAS .....	15
2.1.1. Introducción .....	15
2.1.2. Movimiento oscilatorio, Magnitudes características de las ondas .....	17
2.1.3. Régimen y teoría de ondas (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	22
2.1.4. Teoría lineal de ondas.....	24
2.2. ANALISIS DE OLEAJE .....	26
2.2.1. Descripción estadística .....	26
2.2.2. Parámetros del oleaje .....	27
2.2.3. Espectros de oleaje .....	30
2.2.4. Separación del oleaje incidente y reflejado.....	36
2.3. TRANSFORMACION DEL OLEAJE EN CANAL 2D .....	37
2.3.1. Asomeramiento .....	37
2.3.2. Rotura.....	38
2.3.3. Ascenso-descenso (Run-Up) .....	40
2.3.4. Reflexión .....	40

2.3.5. Transmisión .....	42
CAPITULO 3: ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	43
3.1. EL CANAL DE OLEAJE DEL LH.....	43
3.2. INSTRUMENTAL Y SOFTWARE DE ANÁLISIS.....	45
3.3. METODOLOGÍA .....	45
3.4. ENSAYOS A REALIZAR .....	48
CAPITULO 4: ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	52
4.1. FORMULACIONES UTILIZADAS PARA CÁLCULO DEL RUN UP .....	52
4.2. RESULTADOS.....	56
4.2.1. Resultados de las formulaciones Teóricas.....	56
4.2.2. Propagaciones: oleaje y Run-Up.....	64
4.2.3. Análisis de los resultados .....	66
4.2.4. Discusión sobre los valores medidos y obtenidos con formulaciones.....	72
CAPITULO 5: CONCLUSIONES .....	75
5.1. CONCLUSIONES .....	75
5.2. CONCLUSIONES SOBRE LA PRACTICA SUPERVISADA .....	75
BIBLIOGRAFIA.....	77

## INDICE DE FIGURAS

---

Fig. 1 Esquema de la Represa Presidente Néstor Kirchner .....	11
Fig. 2 Esquema de la Represa Gobernador Jorge Cepernic .....	11
Fig. 3 Ubicación de las represas .....	12
Fig. 4 Distribución energética de las ondas de superficie .....	16
Fig. 5 Definición de parámetros asociados a la onda (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	18
Fig. 6 Ondas de crestas largas. Parámetros (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	19
Fig. 7 Definición de ejes y parámetros. Incidencia oblicua. (Dinámicas Vol. 1, 2010).....	20
Fig. 8 Perfiles de la onda de acuerdo a las diferentes teorías. (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	24
Fig. 9 Diferencia entre oleaje y onda (Paolo Gyssels,2015) .....	27
Fig. 10 Error cometido en la estimación del estado del mar con cada parámetro estadístico. (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015) .....	29
Fig. 11 Serie temporal con su dominio en el tiempo. ....	31
Fig. 12 Espectro correspondiente a la serie temporal representada en la fig. 11.....	31
Fig. 13 Superposición de estados del mar (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015) .....	33
Fig. 14 Comparación de los espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan para condiciones de fetch limitado .....	35
Fig. 15 Comparación de los espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan para oleaje totalmente desarrollado .....	36
Fig. 16 Aguas profundas y aguas someras .....	37
Fig. 17 Tipos de rotura de olas (Dinámicas Vol. 1, 2010).....	39
Fig. 18 Run up y Run down (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	40
Fig. 19 Reflexión de olas. (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015) .....	41
Fig. 20 Canal de oleaje del LH.....	43
Fig. 21 Canal de oleaje del LH.....	44
Fig. 22 Sensores sobre el Canal de Oleaje .....	44
Fig. 23 Corte transversal de Canal de Oleaje .....	45
Fig. 24 Esquema del Canal de oleaje con la estructura instalada. ....	46
Fig. 25 Estructura lisa de acrílico de pendiente 1V:1,5H. ....	47
Fig. 26 Canal con la estructura instalada. ....	47
Fig. 27 Estructura acrílica durante la realización de un ensayo. ....	48
Fig. 28 Esquema de oleaje con Absorción Dinámica.....	48
Fig. 29 Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica. ....	49
Fig. 30 Definición del ángulo de ataque. ....	55
Fig. 31 Hs en la pala con respecto a los valores obtenidos a pie de estructura utilizando playa disipativa con la estructura puesta, con absorción dinámica activada y sin absorción para el periodo T1=1.1s. ....	67

Fig. 32 Hs en la pala con respecto a los valores obtenidos a pie de estructura utilizando playa  
disipativa con la estructura puesta, con absorción activada y sin absorción para el periodo  $T1=1.3s$ .  
.....68

Fig. 33 Ru2% medido, con respecto a los valores de Hs en input (Hspala), para el periodo  $T1=1.1s$ .  
.....69

Fig. 34 Ru2% medido, con respecto a los valores de Hs en input (Hspala), para el periodo  $T2=1.3s$ .  
.....70

Fig. 35 Ru2% medido con respecto a la altura de ola espectral  $H_{mo}$  a pie de dique, para el periodo  
 $T1=1.1s$ .....71

Fig. 36 Ru2% medido con respecto a la altura de ola espectral  $H_{mo}$  a pie de dique, para el periodo  
 $T1=1.3s$ .....71

Fig. 37 Grafico que refleja el ajuste de los datos experimentales con las formulaciones de CEM y  
EUROTOP .....72

Fig. 38 Datos experimentales medidos y calculados con las formulaciones teóricas analizadas. ....73

## INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Magnitudes características de las Ondas (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	17
Tabla 2 División según la profundidad relativa. (Dinámicas Vol. 1, 2010) .....	23
Tabla 3 Clasificación según el régimen de ondas largas. (Dinámicas Vol. 1, 2010).....	23
Tabla 4 Combinación de parámetros para la realización de ensayos .....	49
Tabla 5 Valores de $\gamma_f$ para tener en cuenta la rugosidad de la superficie de la estructura. ....	54
Tabla 6 Resultados Formulación CEM .....	57
Tabla 7 Resultados formulación Hughes .....	59
Tabla 8 Resultado Formulación EUROTOP .....	61
Tabla 9 Resultados formulación Ahrens .....	63
Tabla 10 Resultados de las mediciones del Ru2% para un periodo de pico $T_p= 1.1s$ .....	65
Tabla 11 resultados de las mediciones del Ru2% para un periodo de pico $T_p= 1.3s$ .....	66
Tabla 12 Valores del coeficiente de correlación para las diferentes formulaciones.....	74



## CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN:

En este trabajo se realizó un estudio experimental de Run-Up debido a oleaje sobre un talud liso e impermeable con pendiente característica del paramento interior de una presa en hormigón de un embalse artificial. El oleaje que se propaga hacia la presa, genera un movimiento de ascenso-descenso (*Run-Up* y *Run-Down* en inglés) cuando alcanza su talud interno. El diseño de la cota del coronamiento de la presa depende del valor del ascenso sobre el talud en cuanto se quiere evitar el sobrepaso de caudales líquidos (*Overtopping*). En literatura es escasa la información sobre ensayos realizados en taludes lisos de elevada pendiente típicos de las presas.

Respecto a la metodología utilizada para llevar a cabo las mediciones, el oleaje fue simulado con el generador de oleaje bidimensional adquirido de HR Wallingford. Los ensayos fueron realizados en el canal de oleaje vidriado de 23 m de largo, 50 cm de ancho y 90 cm de alto. Se utilizó una estructura lisa de acrílico de pendiente 1V:1.5H. Las mediciones del Run Up sobre la estructura se realizaron utilizando una técnica de video de alta definición que describiremos más en profundidad en capítulos más avanzados.

### 1.2. ÁMBITO DE DESARROLLO DE LA PS

La Práctica Profesional Supervisada se realizó en el marco de la asignatura homónima de la carrera Ingeniería Civil, siendo una asignatura más para acceder al título de grado. Por parte de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba se asignó como tutor interno para la misma a Dr. Ing. Paolo Gyssels, Ingeniero Ambiental experto en ingeniería costera y marítima. Experto en modelos físicos y numéricos tanto en ámbito marítimo (experto en el uso del canal de oleaje del laboratorio), fluvial (experiencia con numerosos modelos físicos y aplicaciones numéricas 2D y 3D) y de obras hidráulicas.

Esta Práctica Supervisada se llevó a cabo bajo la responsabilidad del tutor externo Dra. Ing. Leticia Tarrab, que se desempeña como Profesora Adjunta del Laboratorio de Hidráulica.

Esta práctica se inserta en el proyecto de construcción del “Complejo Hidroeléctrico Presidente Néstor Kirchner, Gobernador Jorge Cepernic”. El trabajo se desarrolló dentro del convenio “Hidráulica contratación- Modelación bidimensional del clima de olas y evaluación de Run-Up por oleaje en el parámetro en escollera de la presa

Cepernic”. La medición del Run-Up sirve para poder definir la altura de coronamiento de la presa.

### **1.3. COMPLEJO HIDROELÉCTRICO “PRESIDENTE NESTOR KIRCHNER, GOBERNADOR JORGE CEPERNIC”**

La construcción de la represa “*Presidente Néstor Kirchner*” y la represa “*Gobernador Jorge Cepernic*” fue prevista en el marco del proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz.

Se encuentran ubicadas sobre este importante curso de agua de alta potencialidad hidroenergética, aprovechada por primera vez a partir de esta obra. Los estudios preliminares de los proyectos se remontan a 1970.

Las represas tendrán una potencia instalada de 1740 megawatts lo que representa el 8 % del máximo consumo nacional en punta. Permitirá una generación media anual de 5300 gigawatts.

El proyecto, tanto la ingeniería como el desarrollo de las obras ha sido licitado a la UTE (Unión Transitoria de Empresas) conformada por Electro Ingeniería S.A. y por la empresa china Gezhouba Group. El mismo tendrá financiamiento con capitales extranjeros, realizado por inversores chinos.

El proyecto de la “*Presidente Néstor Kirchner*” se encuentra ubicada a 130 kilómetros de la localidad de El Calafate. Tiene una potencia de 1140 mW y una altura de 70 metros. Está compuesta por 6 turbinas Francis con una generación anual de 3380 Gw/h. La longitud del muro será de 1900 metros y la superficie del embalse tendrá 250 kilómetros cuadrados.

La represa “*Gobernador Jorge Cepernic*” está prevista que sea construida a 170 kilómetros de la ciudad de Comandante Luis Piedra Buena. Cuenta con una capacidad instalada de 600 mw y 45 metros de altura. La extensión del muro es de 2700 metros. La casa de máquinas está compuesta por 5 turbinas Kaplan y producirá 1866 Gw/h al año. La superficie del embalse será de 200 kilómetros cuadrados.

En la Fig. 1 y en la Fig. 2 puede apreciarse como quedarían las represas una vez terminadas las obras.



*Fig. 1 Esquema de la Represa Presidente Néstor Kirchner*



*Fig. 2 Esquema de la Represa Gobernador Jorge Cepernic*

Respecto a la ubicación de ambas represas, las mismas se van a construir sobre el río Santa Cruz. Se adjunta un mapa en la Fig. 3 a fines de poder observar donde se van a emplazar:



Fig. 3 Ubicación de las represas

En la actualidad los trabajos se encuentran frenados por decisión del Máximo Tribunal de Justicia hasta que se realice el proceso de evaluación de impacto ambiental en Santa Cruz.

## 1.4. OBJETIVOS GENERALES

### 1.4.1. Objetivos Generales

El objetivo general de esta práctica supervisada ha sido estimar las diferencias entre los valores de Run-Up calculados con las diversas formulaciones teóricas y los valores obtenidos mediante las mediciones en el canal del Laboratorio de Hidráulica con y sin la absorción dinámica activada.

Las formulaciones para la estimación del Run-Up se basan en el cálculo del ascenso vertical del agua sobre el talud correspondiente al valor que representa el nivel vertical desde la línea del agua en reposo excedido por el 2% de las olas incidentes ( $R_{up2\%}$ ). Además, se busca saber si el uso de la absorción dinámica aporta mejoras con respecto al ajuste de los datos con las formulaciones existente.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

Realizar en análisis de todos los ensayos, en particular:

- Verificar la dispersión de los valores de Run-Up calculados con las diferentes formulaciones teóricas para saber al cual se ajustan mejor los datos obtenidos con las mediciones.
- Comparar valores de Run-Up obtenidos con y sin absorción dinámica para sacar conclusiones acerca de los beneficios de utilizar esta función del sistema generador de olas.

### 1.4.3. Objetivos Personales

Los objetivos personales que me propuse durante el desarrollo de la práctica supervisada fueron los siguientes:

- Aprender más sobre hidráulica de presas y oleaje, ya que me pareció un tema muy interesante y poco desarrollado durante el cursado de las materias de hidráulica durante la carrera.
- Compartir un ambiente de trabajo con diversos profesionales en un ámbito académico y aprender a trabajar en equipo para lograr metas en común.
- Poder aplicar lo aprendido durante el cursado en la carrera de Ingeniería Civil y profundizar dichos conocimientos para comprender mejor los fenómenos estudiados.

## 1.5. ALCANCE DE LA PS

Los trabajos realizados se agrupan en 3 fases diferentes:

- **FASE 1: Primer escenario sin absorción dinámica**

Esta fase prevé la realización del primer escenario (E1) que se compone de 4 ensayos, relativos a un periodo constante ( $T_p=1.1s$ ) y distintas alturas de ola significativa, con una repetición, lo que da un total de 8 ensayos de 1000 olas cada uno.

- **FASE 2: Segundo escenario sin absorción dinámica**

Esta fase prevé la realización del segundo escenario (E2) que se compone de 4 ensayos, relativos a un periodo constante ( $T_p=1.3s$ ) y distintas alturas de ola significativa, con una repetición, lo que da un total de 8 ensayos de 1000 olas cada uno.

- **FASE 3: Realización de los escenarios anteriores (E1 y E2) con absorción dinámica activada**

En esta tercera y última fase se repitieron los ensayos E1 y E2 activando la absorción dinámica en la pala y se efectuó una repetición completa de todos los ensayos por un total de 16 ensayos. Adicionalmente se realizaron tres ensayos más para cada periodo con tres alturas de olas entre 0.07 y 0.09 m. para estos últimos ensayos también se activó la absorción dinámica. En esta fase también se efectuaron todos los ensayos sin estructura y con una playa disipativa al final del canal para calibrar la absorción dinámica.

La práctica supervisada tiene como alcance el análisis de los valores de Run-Up obtenidos luego de realizar los ensayos correspondientes a cada una de las fases antes descriptas. Dicho análisis se llevó a cabo mediante la comparación de valores de Run-Up obtenidos con diversas formulaciones teóricas, para así poder luego sacar conclusiones entre lo calculado y lo medido en el laboratorio.

La cátedra de la materia “Practica Supervisada” requiere una determinada carga horaria tanto en trabajo experimental como en ejecución de los informes pertinentes. Respecto al trabajo experimental, se participó de manera activa en la ejecución de los ensayos en el canal del LH de todas las fases y en el cálculo de Run-Up con las diversas formulaciones.

## 1.6. PLAN DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS

- Estudio de antecedentes y análisis de trabajos realizados anteriormente sobre modelación física del Run-Up por oleaje sobre diques en talud impermeables.
- Preparación de la estructura de ensayo y preparación de los ensayos en el canal.
- Realización de ensayos experimentales con el canal de oleaje.
- Análisis y tratamiento de los resultados: separación de señales incidentes y reflejas, análisis espectral del oleaje, análisis del Run-Up.
- Elaboración del informe final.

## CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE

---

### 2.1. MECANICA DE ONDAS

#### 2.1.1. Introducción

En el océano siempre existe algún tipo de onda que pone de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interface agua-atmosfera que constituye la superficie del mar. Los mecanismos que aportan esta energía son de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc. Como consecuencia de la variabilidad en las características de los distintos forzamientos mencionados, las características de las ondas-respuesta difieren tanto en su periodo como en su mecanismo de control. La *Fig. 4* muestra, de forma esquemática, la energía de las ondas de superficie asociada a cada frecuencia. Como puede observarse, el tipo de ondas superficiales abarca desde ondas capilares con periodos inferiores a 1 s hasta oscilaciones inducidas por la marea con períodos del orden de horas e incluso días.

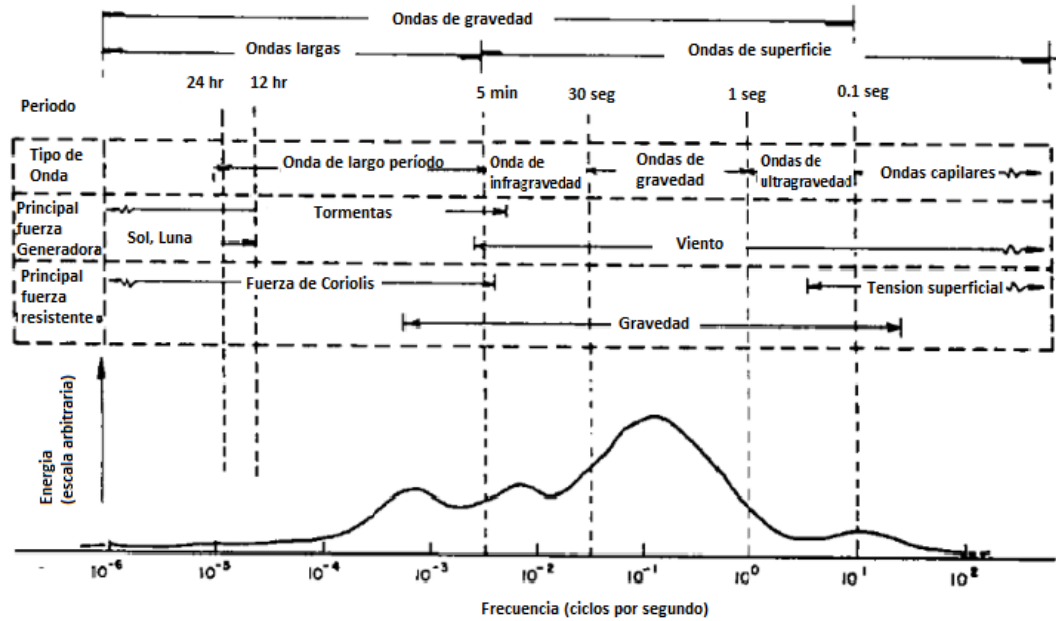


Fig. 4 Distribución energética de las ondas de superficie

En la Tabla 1 se muestra una clasificación los diferentes tipos de onda con sus mecanismos generadores, periodos y longitudes características, así como fuerzas de control.

Para los problemas de interés en ingeniería litoral las ondas más importantes son fundamentalmente las ondas de viento con periodos entre 3 y 30 s y, por ello, de ahora en adelante nos referiremos especialmente a ellas.



Tabla 1 Magnitudes características de las Ondas (Dinámicas Vol. 1, 2010)

Movimiento	Periodo o Long.	Fuerzas generadoras	Fuerzas de control	Ejemplos
Corrientes oceánicas	$10^6$ m	grad. de densidad; viento	fricción; Coriolis; gravedad	corriente del golfo
Corrientes costeras	$10^5$ m	viento y corrientes oceánicas	fricción; Coriolis; gravedad	afloramientos
Corrientes de rotura	$10^2$ m	ondas gravitatorias	fricción; gravedad	rip-currents
Corrientes de marea	$10^3$ m	marea astronómica	fricción; gravedad	bahías y estuarios
Ondas capilares	$0.1 \text{ s}/10^{-2} \text{ m}$	viento	tensión superficial; gravedad	rizado del viento
Ondas ultragravitatorias	$0.1-1 \text{ s}/100 \text{ m}$	viento	gravedad	ondas de viento en una charca
Ondas gravitatorias	$1-30 \text{ s}/1-10^3 \text{ m}$	viento y oleaje de viento	gravedad; fricción	sea y swell
Ondas infragravitatorias	$30 \text{ s}-5 \text{ min}/10^3-10^5 \text{ m}$	viento y ondas gravitatorias	gravedad; Coriolis; fricción	surf-beat, ondas de borde
Ondas largas	$5 \text{ min}/10^5-10^6 \text{ m}$	borrascas y terremotos	gravedad; Coriolis; fricción	Tsunamis
Ondas de mareas astronómica	$12-24 \text{ h}/10^7 \text{ m}$	rotación Tierra/atraccción Luna, Sol	gravedad; Coriolis; fricción	marea astronómica
Ondas transmareales	$24 \text{ h}/10^7 \text{ m}$	orbita solar/gravit.	gravedad; Coriolis; fricción	marea meteorológica
Ondas internas	$4 \text{ min}-25 \text{ h}/10-10^5 \text{ m}$	borrascas, ondas de gravedad	gravedad; Coriolis; fricción	ondas de densidad en la pycnoclina

### 2.1.2. Movimiento oscilatorio, Magnitudes características de las ondas

La descripción matemática de las ondas considera, en general, que estas son oscilaciones uniformes y periódicas de las superficies del agua. Es decir, se asume que estas ondas se repiten una y otra vez distinguiendo entre dos tipos de oscilaciones: las ondas progresivas y las ondas estacionarias. Las ondas progresivas se propagan en una profundidad constante manteniendo su forma, mientras que las ondas estacionarias no se propagan. Al desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto a un nivel medio de referencia NM (MWL) del fluido, se le denomina *desplazamiento de la superficie libre*,  $\eta$ .

Si se observa el paso de una onda por una referencia fija a lo largo del tiempo, se puede definir como *periodo de la onda*,  $T$ , al tiempo que transcurre hasta que se observa un punto idéntico de la superficie libre. Si se toma una imagen de la

superficie libre en un instante determinado, se puede definir *la longitud de onda L* como la distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos sucesivos de la superficie libre. En la Fig. 5 se pueden apreciar los parámetros antes mencionados de las ondas.

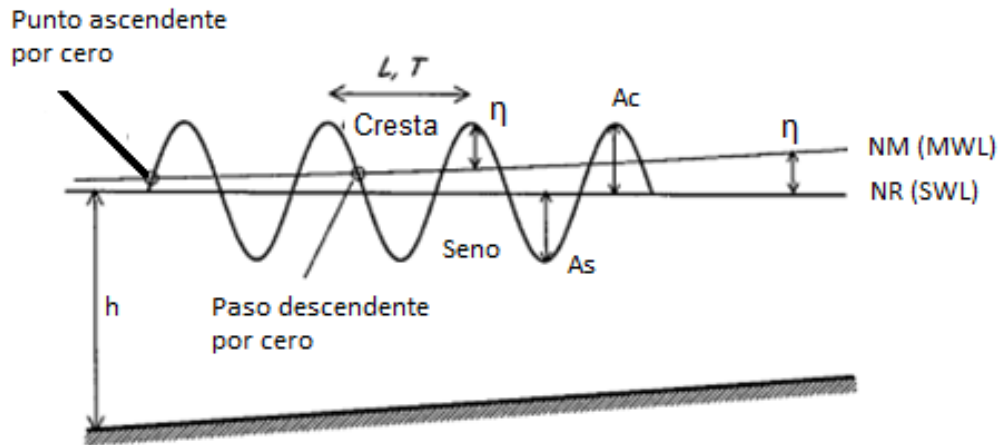


Fig. 5 Definición de parámetros asociados a la onda (Dinámicas Vol. 1, 2010)

La distancia vertical total entre la cresta y el seno de la onda se denomina *altura de la onda H*. La *amplitud de la cresta*,  $A_c$  es la distancia vertical máxima entre el nivel de reposo y la cresta. Análogamente, se puede definir una *amplitud del seno*,  $A_s$ . Por lo tanto, la ecuación encontrada es:

$$H = A_c + A_s$$

Dada la periodicidad temporal y espacial de las ondas, el movimiento oscilatorio es en general simétrico respecto a un eje vertical. Sin embargo, el movimiento oscilatorio no suele ser simétrico respecto al nivel en reposo, y entonces,  $A_c \neq A_s$ . Solamente para una teoría de ondas determinada, en concreto la teoría lineal que se presentara más adelante existe un eje horizontal de simetría que es el nivel de reposo. Por tanto, para esta teoría  $A_s = A_c = A$  y se cumple que  $H = 2A$ .

La magnitud  $A$  se denomina simplemente magnitud. Obsérvese que  $\eta$ ,  $A_s$ ,  $A_c$  y  $A$  se definen siempre respecto a un cierto nivel de referencia. El *nivel en reposo NR (SWL)*

correspondiente al nivel del fluido en ausencia de ondas. A la distancia entre el fondo y el NR se llama *profundidad* o *calado*,  $h$ . por el contrario, en presencia de ondas o una corriente la referencia es el *nivel medio NM (MWL)* que generalmente no coincide con el nivel en repodo. La altura de la onda,  $H$  presenta la ventaja de ser una distancia definida sin necesidad de un nivel de referencia.

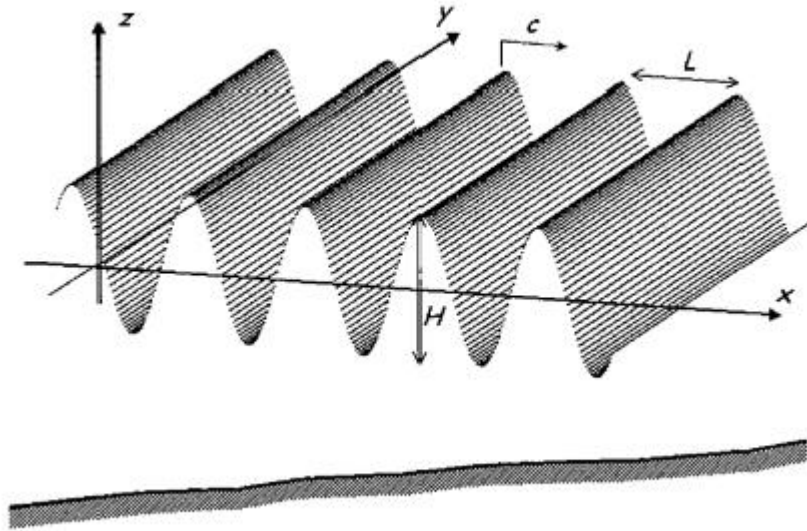


Fig. 6 Ondas de crestas largas. Parámetros (Dinámicas Vol. 1, 2010)

Asimismo, y dada su aplicación posterior, es necesario introducir algunas otras definiciones como el *número de onda*,  $k$ :

$$k = \frac{2\pi}{L} \text{ (1/m)}$$

y la *frecuencia angular*,  $\omega$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (1/s)}$$

En algunas ocasiones, especialmente en la descripción espectral del oleaje es necesario utilizar la *frecuencia cíclica*,  $f$

$$f = \frac{1}{T} \text{ (ciclos por segundo=Hz (Hertz))}$$

En general, se suele hacer uso de un sistema de referencia cartesiano  $(x,y,z)$  tal que el eje  $x$  define la dirección de propagación, el eje  $z$  tiene su origen en el nivel de reposo y se considera positivos por encima de dicho nivel y el eje  $y$  es ortogonal a

los ejes  $x$  y  $z$ . la onda de la Fig. 6 progresa en el sentido positivo del eje  $x$  y por tanto, las crestas, se extienden en la dirección del eje  $y$  sin variación hasta el infinito. Este tipo de ondas suele denominarse ondas de crestas largas. De una forma más precisa, este tipo de movimiento puede definirse como aquel en el que las variaciones en la dirección del eje  $y$  son despreciables en comparación con las que se producen en la dirección del eje  $x$ .

La velocidad a la que se propagan las ondas en el fluido es fácil de establecer se conoce la longitud y periodo de la onda. Esta velocidad de propagación llamada generalmente *celeridad* o *velocidad de fase* se define como

$$C = \frac{L}{T} \text{ (m/s)}$$

Donde  $L$  es la *longitud de onda* y  $T$  es el *periodo de la onda*.

Teniendo en cuenta las definiciones en las ecuaciones anteriores, la ecuación anterior se puede expresar como

$$C = \frac{\omega}{k} \text{ (m/s)}$$

Siendo  $\omega$  la *frecuencia angular* y  $k$  el *número de onda*.

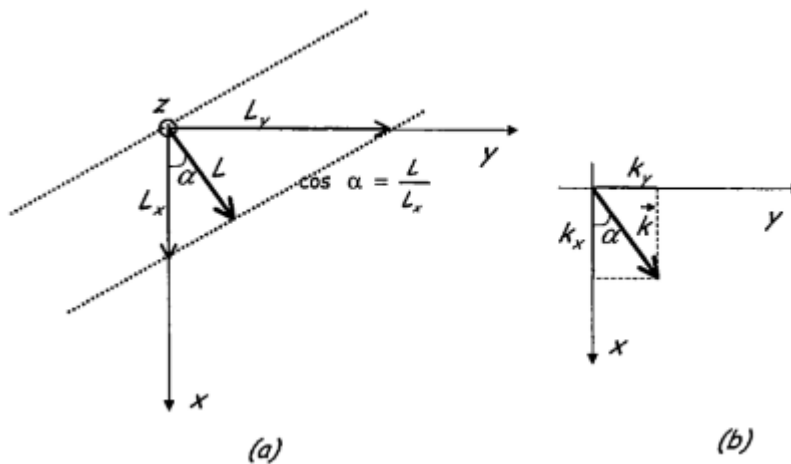


Fig. 7 Definición de ejes y parámetros. Incidencia oblicua. (Dinámicas Vol. 1, 2010)

Uno de los primeros objetivos de cualquiera de las teorías de ondas existentes, es determinar  $C$  cuando las magnitudes  $H$ ,  $L$  y  $h$  son conocidas. Una vez conocida la celeridad la descripción de la cinemática de las partículas (velocidad, aceleraciones

y desplazamientos) así como el campo de presiones bajo el paso de las ondas es el siguiente objetivo.

Si las ondas se propagan formando un ángulo  $\alpha$  respecto al eje  $x$ , será necesario introducir algunas modificaciones que tengan en cuenta la oblicuidad en la incidencia de las ondas. Dado que la longitud de onda,  $L$  se había definido como la distancia más corta entre dos crestas sucesivas, la proyección de dicha distancia sobre los ejes coordenados será según la Fig. 7.

$$Lx = \frac{L}{\cos\alpha} \quad Ly = \frac{L}{\sin\alpha}$$

definiéndose, asimismo

$$k_x = \frac{2\pi}{Lx}$$

$$k_y = \frac{2\pi}{Ly}$$

donde

$$k_x = k \cos\alpha$$

$$k_y = k \sin\alpha$$

Por tanto, se puede definir un vector número de onda,  $\vec{k}$ , cuya dirección coincide con la dirección de propagación de las ondas, cuyas componentes son  $k_x$  y  $k_y$  tal que

$$\vec{k} = k_x \vec{i} + k_y \vec{j}$$

$$|\vec{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{k_x}{k_y}\right)$$

A partir de estos parámetros se puede definir dos tipos de ondas características. Las ondas estacionarias cuya superficie libre se expresa como

$$\eta(x, t) = A \cos kx \cos \omega t$$

se caracterizan por tener su evolución espacial y temporal desacoplada. Como se verá más adelante, este tipo de ondas no progresa en el espacio oscilando verticalmente entre puntos fijos llamados nodos.

A diferencia de estas, las ondas progresivas tienen su movimiento espacial y temporal acoplado, siendo su superficie libre

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

y propagándose manteniendo su forma en la dirección positiva del eje  $x$  a una velocidad  $C$ .

### 2.1.3. Régimen y teoría de ondas (Dinámicas Vol. 1, 2010)

Hasta ahora se ha visto que existe una serie de parámetros adimensionales que sirven para clasificar las ondas. En función del valor de dichos parámetros se pueden definir dos regímenes bien diferenciados: el régimen de Stokes y el régimen de onda larga; a cada uno de los cuales le corresponde un conjunto de ecuaciones distintas y soluciones con diferentes características. El correcto modelado de las ondas demandará la utilización de unas u otras teorías y soluciones en función del valor de los parámetros que serán determinantes a la hora de establecer el rango de validez de las teorías.

Más aun, desde el punto de vista matemático las ecuaciones generales que gobiernan la mecánica de ondas pueden ser adimensionalizadas de tal forma que los parámetros  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\mu$  queden aparentes. En función del valor que tomen estos parámetros puede realizarse la manipulación de las ecuaciones más generales, llegándose a expresiones de las ecuaciones más simples a través de las que pueden obtener soluciones analíticas especialmente utilizando teoría de las perturbaciones cuando alguno de estos parámetros es pequeño.

Como se ha comentado anteriormente puede hacerse una primera clasificación en régimen de Stokes y régimen de onda larga. El régimen de Stokes corresponde a problemas en los que la longitud de onda no es muy grande en comparación con la profundidad, es decir,  $h/L$  no es muy pequeño, correspondiéndose con profundidades indefinidas e intermedias.

El régimen de onda larga, por el contrario, considera el caso en que la longitud de onda es grande en comparación con la profundidad y, por lo tanto, se corresponde con profundidades reducidas. En general, nos referimos a ondas largas siempre que  $h/L \ll 1$ .

Por tanto, expresado en términos del parámetro profundidad relativa se puede hacer una primera división (Tabla 2), tal que

Tabla 2 División según la profundidad relativa. (Dinámicas Vol. 1, 2010)

Régimen	$kh$ o $h/L$
Stokes	$\geq 1$
Onda larga	$\ll 1$

Además, dentro de cada uno de estos regímenes pueden hacerse nuevas subdivisiones de acuerdo a los otros parámetros definidos.

Por ejemplo, en el régimen de Stokes, si las ondas son de pequeña amplitud, es decir  $\delta \ll 1$  o  $\varepsilon \ll 1$ , la teoría correspondiente es la teoría lineal de ondas, teoría de ondas de pequeña amplitud, teoría de Airy o teoría de Stokes de 1er orden, donde todos los nombres corresponden a la misma teoría. Esta teoría es la más simple de todas y de gran aplicación.

A medida que el valor de  $\varepsilon$  aumenta, aumenta también el carácter no lineal de la onda y dentro del régimen de Stokes es necesaria la aplicación de otras teorías como son Stokes II, Stokes III, y órdenes superiores. Es decir, a medida que se aumenta el orden de la solución y la no linealidad aumenta, la solución obtenida mediante el 1er orden o teoría lineal se va corrigiendo con nuevos términos.

Dentro del régimen de ondas largas la clasificación es más compleja. En este régimen pueden considerarse tres casos diferentes y siempre con  $\mu^2 \ll 1$ :

Tabla 3 Clasificación según el régimen de ondas largas. (Dinámicas Vol. 1, 2010)

	$Ur$	Teoría
$\delta \ll \mu^2$	$\ll 1$	Onda larga lineal
$\delta \approx O^*(\mu^2)$	$O(1)$	Boussinesq
$\delta \gg \mu^2$	$\gg 1$	Onda larga no lineal

En el primer caso  $\delta \ll \mu^2$  la teoría que se obtiene es la correspondiente a ondas de muy pequeña amplitud y, por tanto, se denomina teoría lineal para ondas largas.

Cuando el término de dispersión es tan importante como el de no linealidad,  $\delta \approx O^*(\mu^2)$  da lugar a la teoría de Boussinesq. Las ondas solución de la teoría de Boussinesq se consideran débilmente no lineales, puesto que  $\delta \approx O^*(\mu^2) \ll 1$  y

débilmente dispersivas, dado que la celeridad de la onda depende débilmente de la longitud y periodo de la onda.

Además, a partir de las ecuaciones de Boussinesq y su relación con la ecuación de la KdV (Korteweg-de Vries) se puede obtener soluciones analíticas. Estas soluciones son la onda solitaria y la onda cnoidal ,Fig. 8.

El tercer caso,  $\delta \gg \mu^2$  da lugar a la teoría no lineal de ondas largas y puede aproximarse a la teoría lineal de ondas largas correspondiente al primer caso si se deprecian los términos no lineales.

La Fig. 8 presenta la superficie libre correspondiente a las ondas más comúnmente empleadas con el fin de mostrar las diferencias. A la hora de exponer cada una de las teorías se presentarán sus características particulares con más detalle.

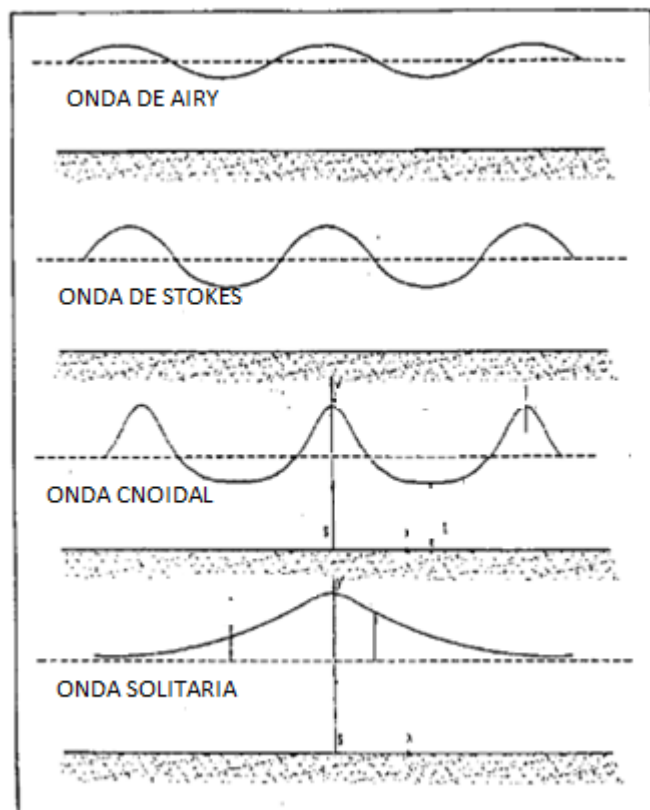


Fig. 8 Perfiles de la onda de acuerdo a las diferentes teorías. (Dinámicas Vol. 1, 2010)

#### 2.1.4. Teoría lineal de ondas.

Esta teoría representa una primera aproximación al problema general de las ondas planteado a partir de las siguientes ecuaciones:



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq L \\ -\infty < y < \infty \\ -h(x, y) \leq z \leq \eta(x, y, t) \end{array} \right.$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} ; \text{ en } z = -h(x, y)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} ; z = \eta(x, y, t)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = C(t) ; z = \eta(x, y, t)$$

$$\phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z, t + T)$$

$$\phi(x, y, z, t) = \phi(x + L, y, z, t)$$

Donde:

- $\phi$  es una función escalar llamada *potencial de velocidades*;
- $g$  es la fuerza de gravedad;
- $C$  es la celeridad;
- $L$  es la *longitud de onda*;
- $T$  es el *periodo de onda*;
- $\eta$  representa el desplazamiento de la superficie respecto a un plano horizontal  $z=0$ ;
- $h$  es la altura del fondo;

A dichas ecuaciones se llega asumiendo las siguientes hipótesis:

- Se considera el fluido un medio continuo, homogéneo, incompresible y no viscoso
- Se desprecia los efectos de Coriolis

- Se desprecia los efectos de la tensión superficial
- Se considera la presión en la superficie uniforme y constante
- Se considera flujo irrotacional
- Inicialmente se considera el fondo variable e impermeable

Las ventajas de hacer dicha aproximación son las múltiples ventajas que representa: 1) es la más simple de las teorías posibles; 2) el nivel de reposo coincide con el nivel medio; 3) su carácter lineal posibilita la eliminación de los términos no lineales facilitando la obtención de soluciones analíticas sencillas y 4) la solución es lineal y, por tanto, puede utilizarse como base para encontrar otras soluciones posibles por superposición.

## **2.2. ANALISIS DE OLEAJE**

### **2.2.1. Descripción estadística**

Antes de empezar la descripción estadística me gustaría definir al *Oleaje* como un movimiento oscilatorio aleatorio (con periodos entre 2 y 20 segundos aprox. para ondas de gravedad) generado por el viento (en una tormenta, por ejemplo), que se propaga de su área de generación hasta la costa perdiendo lentamente su energía por fricción con la atmosfera y viscosidad molecular hasta disiparse totalmente en la costa por procesos de rotura (Fig. 9).

Uno de los objetivos fundamentales de la realización de un análisis estadístico de la señal es obtener una serie de parámetros que sean representativos del estado de mar y que, a introducirlos en las funciones de distribución teóricas permitan la definición probabilística del parámetro y, en su caso, la recomposición, mediante simulación, de una muestra temporal del proceso.

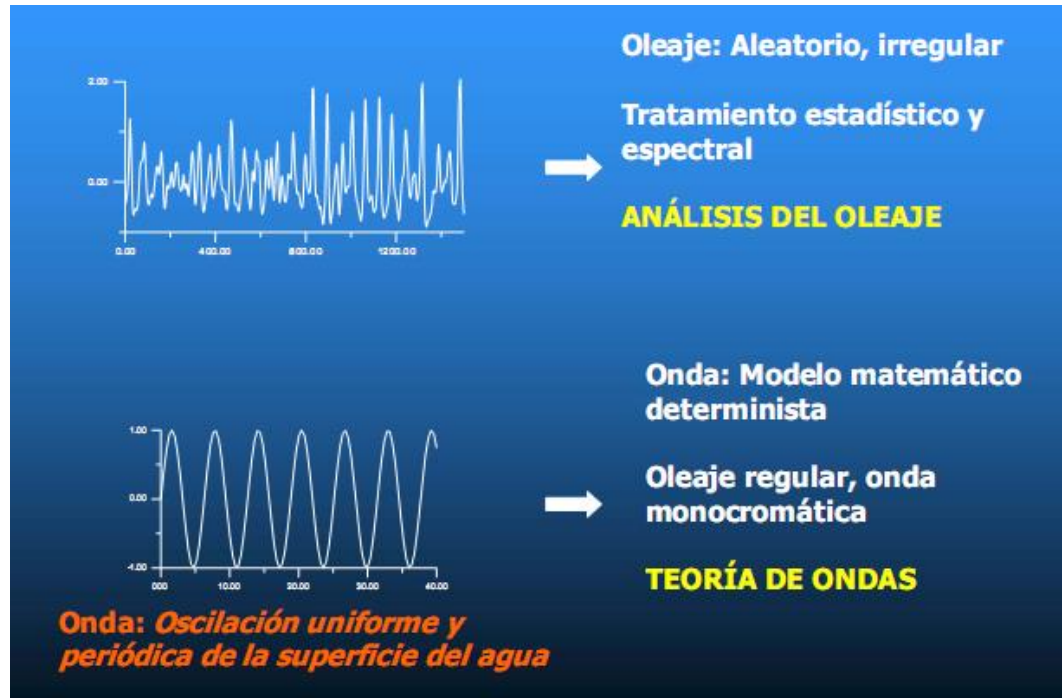


Fig. 9 Diferencia entre oleaje y onda (Paolo Gyssels,2015)

### 2.2.2. Parámetros del oleaje

Dado que se asume que una variable del oleaje en un estado de mar es un proceso estacionario ergódico gaussiano, dos parámetros son suficientes para caracterizar probabilísticamente el proceso. Los parámetros estadísticos más empleados son un parámetro de altura de ola y uno de periodo. Si no se especifica otra cosa, se suele asumir que las olas individuales del registro se han determinado por el método de los pasos ascendentes por el NMA. Estos parámetros estadísticos se pueden definir de diferentes maneras. Entre ellos, los más utilizados se describen a continuación:

- Altura de ola significativa,  $H_s$

La altura de ola significativa,  $H_s$  o  $H_{1/3}$ , es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar. Fue presentado por primera vez por Sverdrup and Munk (1947) y surgió de la necesidad de establecer un parámetro estadístico que relacionara las alturas de ola obtenidas en el registro instrumental del oleaje y las establecidas a través de observación visual de un estado de mar.

A partir de un registro de oleaje del desplazamiento vertical de la superficie libre, la altura de ola significativa se define, como la media aritmética del tercio de olas de mayor altura del registro, es decir:

$$H_{1/3} = \sum_{i=1}^{N/3} \frac{H_i}{N/3}$$

Donde  $H_i$  es la serie de alturas de ola individuales del registro, ordenada de mayor a menor, ( $H_1$  es la altura de ola máxima y  $H_n$  es la altura de ola mínima) y  $N$  es el número total de olas individuales del registro.

- Altura de ola media  $H_m$

Es la media aritmética de todas las olas de  $n$  registro

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

- Altura de ola media cuadrática  $H_{rms}$

Es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola del registro

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2}$$

- Altura de ola máxima  $H_{max}$

Es la altura de ola correspondiente a la mayor ola que se encuentra en un registro de  $N$  olas.

- Altura de ola media de las  $1/n$  mayores olas  $H_{1/n}$

Corresponde a la media aritmética de las  $N/n$  alturas de ola mayores del registro. La altura significativa es  $H_{1/3}$ .

- Periodo medio  $\bar{T}_z$

Es la media aritmética de los periodos  $T_z$  del registro.

- Periodo significativo  $T_{1/3}$

Es la media aritmética de los  $N/3$  periodos mayores del registro de  $N$  olas.

De la misma manera que  $H_{1/3}$  se puede definir otras alturas de ola, como  $H_{1/10}$ ,  $H_{1/100}$ ,  $H_{1/x}$ , etc., de forma análoga (ordenado de mayor a menor el registro de oleaje).

En la Fig. 10 se puede ver los errores cometidos al escoger uno u otro parámetro para describir el estado del mar.

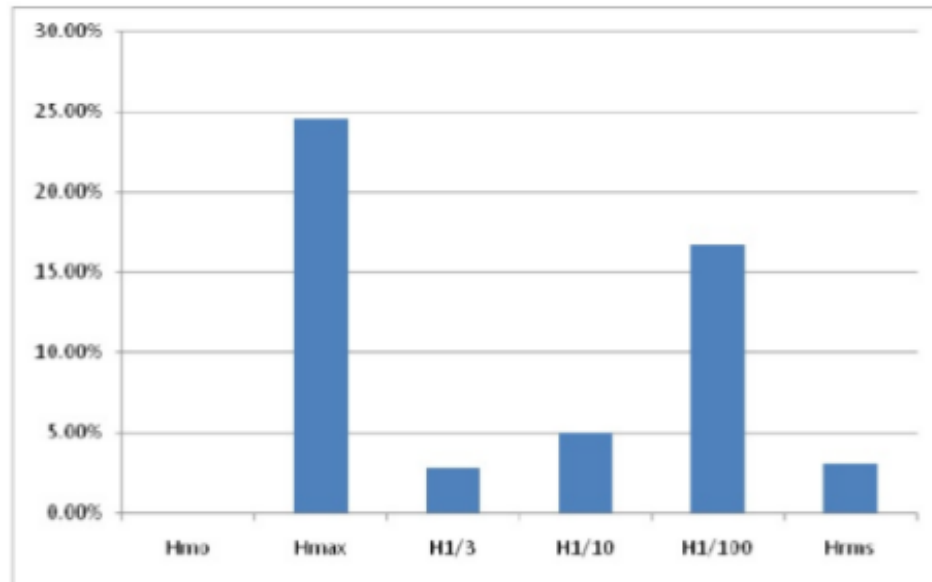


Fig. 10 Error cometido en la estimación del estado del mar con cada parámetro estadístico. (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015)

Los momentos espectrales se designan como  $m_i$ , donde  $i$  es su orden, y se definen como:

$$m_i = \int_0^{\infty} f^i S(d) df$$

De los cuatro primeros momentos se pueden aproximar numerosos datos estadísticos del registro de oleaje:

$$H_{m_0} = 3.8 \sqrt{m_0}$$

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} = 1.416 \cdot H_{rms}$$

$$H_{1/10} = 5.1 \sqrt{m_0}$$

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

$$T_z = \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$$

$$\bar{\eta} = \sqrt{m_0}$$

Es fácil entender que  $m_0$  representa la energía total del registro de oleaje, pues constituye el área que encierra el espectro. Así, mediante el análisis espectral de diferentes series de oleaje de un mismo temporal mientras se propaga hacia la costa, puede calcularse la reducción de energía en el mismo.

### 2.2.3. Espectros de oleaje

El análisis en dominio de la frecuencia o *análisis espectral* tiene como objetivo la obtención de la función de densidad espectral, que representa la energía total asociada a cada una de los trenes de onda en que se puede descomponer un registro de oleaje en función de la frecuencia y la dirección de propagación. Es una técnica más adecuada para el análisis direccional, con respecto al estudio del oleaje en el dominio de la probabilidad. La descripción espectral del oleaje es muy útil para comprender y sintetizar determinadas características. A partir de esas series temporales discretas ( $\eta$ ,  $t$ ) de superficie del mar y tiempo (Fig. 11), obtenidas de sensores de oleaje dispuestos en el mar, podemos hallar el espectro energético del mismo. Cabe destacar que los sensores de oleaje van obteniendo puntos cada cierto tiempo, los cuales se unen en los gráficos, pero no significa que sean funciones continuas.

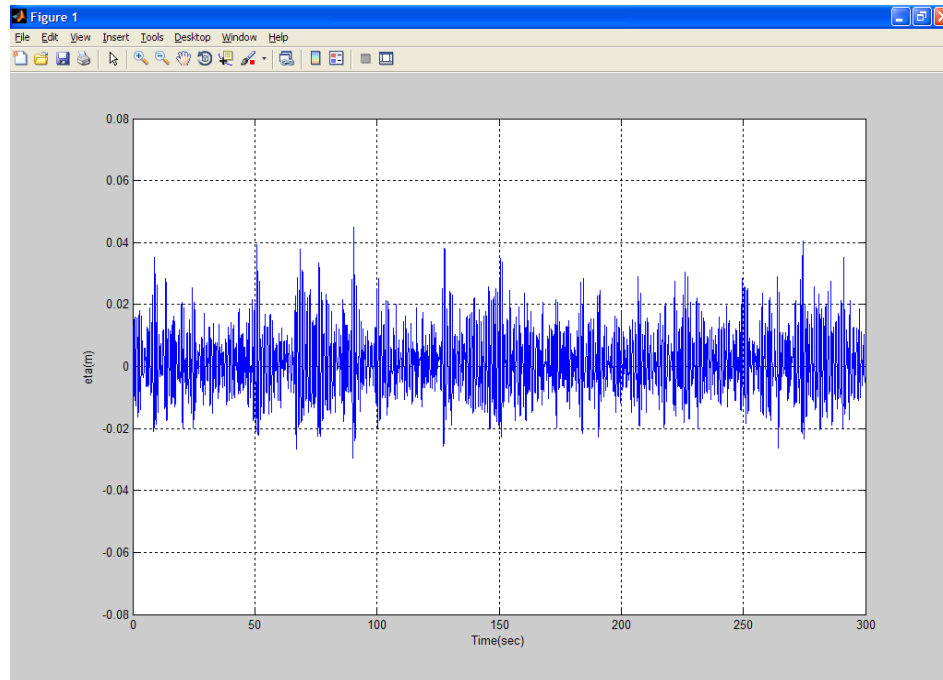


Fig. 11 Serie temporal con su dominio en el tiempo.

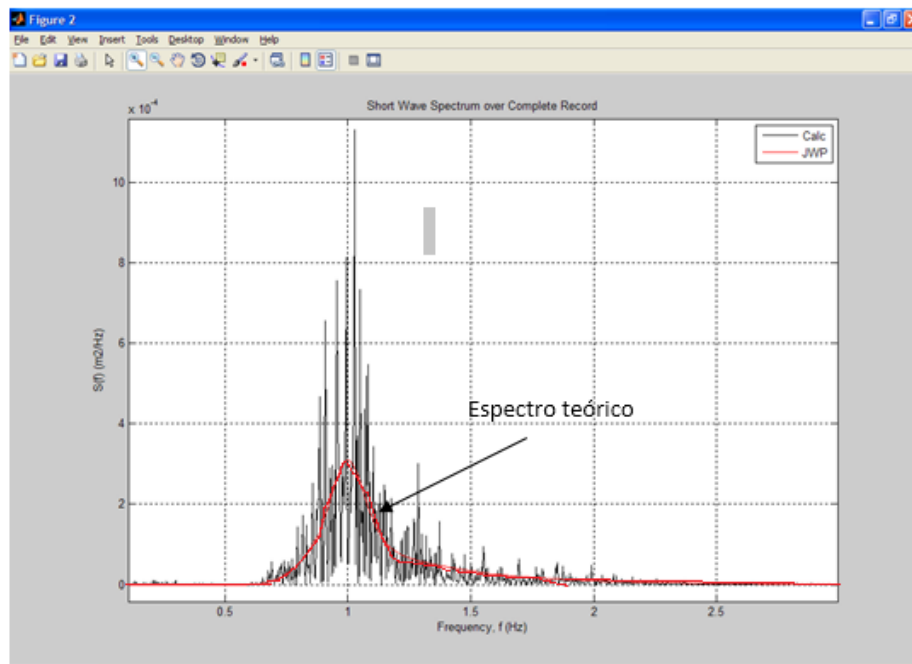


Fig. 12 Espectro correspondiente a la serie temporal representada en la fig. 11

El espectro energético representa el oleaje objeto de interés en el dominio de la frecuencia, de la misma forma que la serie temporal lo representa en el dominio del tiempo.

### 2.2.3.1. Espectros de un estado del mar

Para llevar a cabo el análisis espectral del oleaje del mar se utiliza el teorema de Fourier.

La técnica de análisis espectral se basa en descomponer el registro temporal en sus componentes de Fourier (FFT o DFT)



El teorema de Fourier dice lo siguiente: cualquier función, por complicada que sea, puede expresarse por una combinación más o menos larga, de senos y cosenos., por lo tanto, se puede descomponer la serie temporal correspondiente a un temporal, cualquiera sea esta en una suma de senos y cosenos simples, en ondas de Airy, como se puede observar en la Fig. 13. hallando y superponiendo los espectros (líneas verticales) de cada oleaje simple, se puede hallar el espectro energético del temporal.



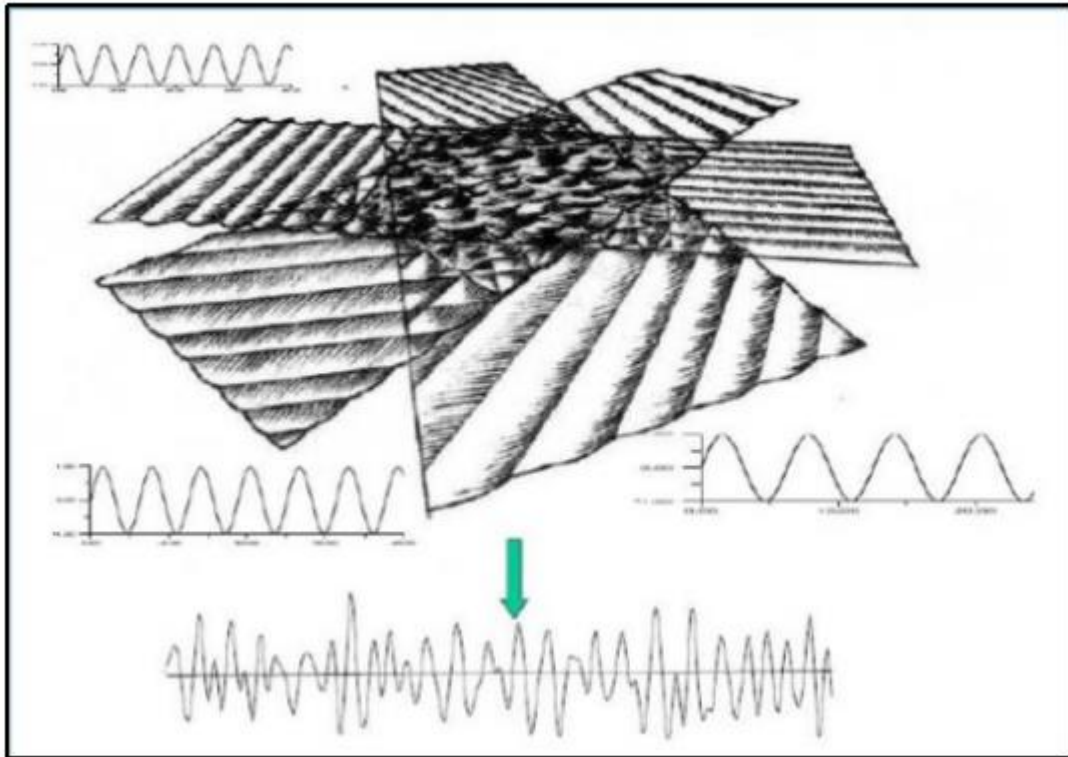


Fig. 13 Superposición de estados del mar (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015)

### 2.2.3.2. Espectros de frecuencia más utilizados

La forma del espectro de oleaje varia con la velocidad del viento, distancia de generación o fetch, duración del viento, propagación fuera de la zona de generación, entre otros factores.

El oleaje en cada frecuencia tiene una limitación en la energía que puede contener y con y con el tiempo se establece un balance equilibrado entre la energía que el viento aporta al oleaje y las perdidas por rotura, por transferencia no lineal a bajas frecuencias y por rozamiento con la atmósfera. Esta situación se denomina oleaje totalmente desarrollado y el rango de frecuencias en el que se establece este equilibrio de energías, rango de equilibrio o *rango de saturación*.

El nivel de saturación deberá por lo tanto quedar definido exclusivamente en función de los parámetros físicos locales que gobiernan la configuración de la solas, es decir, la aceleración de la gravedad,  $g$ , la velocidad del viento sobre la superficie del agua,  $u$ , y la frecuencia local,  $\omega$ . Phillips, utilizando el análisis dimensional encontró que la función de densidad espectral (espectro de frecuencias) debía ser de la forma:

$$S(\omega) = f \left( \frac{\omega u}{g} \right) g^2 \omega^{-5}$$

- *Espectro de Pierson-Moskowitz*

Es la propuesta espectral más popular, propusieron para el oleaje totalmente desarrollado:

$$S(f) = 0.0081 g^2 f^{-5} e^{-0.74 \left( \frac{g}{fU} \right)^{-4}}$$

Donde U es la velocidad del viento a una altura de 19.5 m. como puede verse, la forma del espectro está controlada únicamente por la velocidad del viento U.

- *Espectro de Jonswap y la modificación de Donelan*

El espectro de JOin North Sea Wawe Project extiende el espectro de P-M para incluir oleajes limitados por el fetch (Fig. 14). La forma espectral propuesta es, Hasselman et al.(1973);

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \gamma^\delta, \text{ con:}$$

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)^2}{e 2 \sigma_0^2 \omega_p^2} \text{ y } \sigma_0 = \begin{cases} \sigma_0^1 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_0^2 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases}$$

El término  $\gamma^\delta$  es un factor de acentuamiento del pico añadido al espectro de P-M para representar las formas espectrales, más estrechas y apuntadas, que son típicas de un oleaje parcialmente desarrollado, para oleaje totalmente desarrollado los espectros son como se ven en el Fig. 15. El parámetro  $\gamma$  describe el grado de apuntamiento del espectro y el parámetro  $\delta$  la anchura de la región cercana al pico.

Una versión modificada de espectro de Jonswap, que incluye la formulación de Toba (1973) para el rango de saturación (proporcional a  $\omega^{-4}$ ), y con cuatro parámetros, fue propuesta por *Donelan* (1985), con la forma:

$$S(\omega) = \beta g^2 \omega_p^{-1} \omega^{-4} e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}} \gamma^\delta; \text{ con:}$$

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)}{e 2 \sigma_0^2 \omega_p^2}, \text{ donde:}$$

$$\beta = 0.006 v^{0.55}; \text{ para } 0.83 < v < 5.0$$

$$\gamma = \begin{cases} 6.489 + 6 \log v & ; \text{ para } 1.0 < v < 5 \\ 1.7 & ; \text{ para } 0.83 < v < 1 \end{cases}$$

$$\varepsilon = 0.00274 v^{-3.3}$$

$$\sigma_0 = 0.08 + 0.32 v^{-3}$$

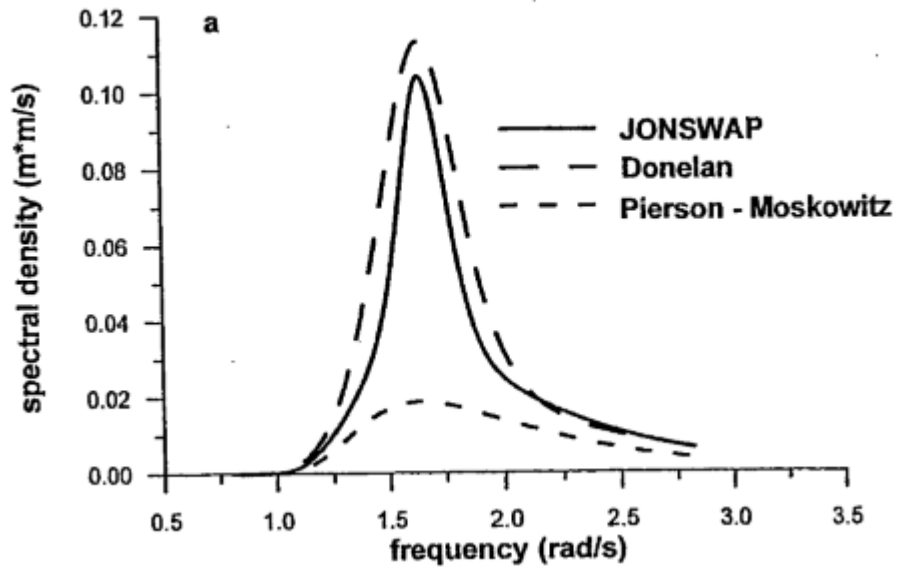


Fig. 14 Comparación de los espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan para condiciones de fetch limitado

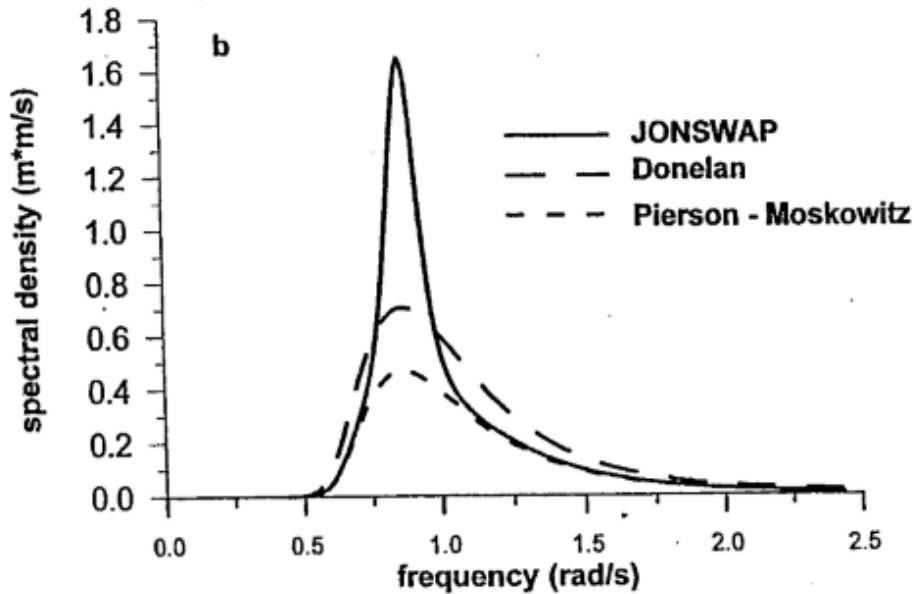


Fig. 15 Comparación de los espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan para oleaje totalmente desarrollado

#### 2.2.4. Separación del oleaje incidente y reflejado

Teniendo en cuenta que los datos de oleaje que se utilizan a la hora de dimensionar una estructura marítima son valores de altura de ola incidente (y, por lo tanto, no total), utilizar estos datos como valores en la formulación de dimensionamiento de la estructura puede provocar que se esté sobredimensionando o infravalorando el manto del dique. Para conocer la relación entre la altura de la ola total e incidente es de gran importancia la medición de la reflexión y, por tanto, la separación de la ola incidente y reflejada.

Las técnicas más utilizadas para un fondo casi horizontal y propagación en una dirección, son las técnicas de Mansard y Funke (1980), Goda y Suzuki (1976) o Frigaard y Brorsen (1995). Se basan en medir las olas en 2 o 3 puntos puestos a corta distancia entre ellos. Las técnicas descritas se aplican a fondos horizontales o casi-horizontales, donde la longitud de onda no varía de manera significativa sobre la longitud del sistema de sensores.

### 2.3. TRANSFORMACION DEL OLEAJE EN CANAL 2D

A partir de la Teoría lineal, se deduce que la onda comienza a sentir el fondo cuando la profundidad  $h < L/2$ , donde  $L$  es la longitud de onda. Esto hace que el tren de ondas se transforme.

Estos procesos de transformación se traducen en variaciones en la altura de ola, longitud de onda celeridad y dirección de propagación.

#### 2.3.1. Asomeramiento

En la naturaleza, a medida que un tren de onda se aproxima hacia la costa con la consiguiente variación en la profundidad, se observa un cambio en la altura, en la longitud de la onda y la celeridad. A este proceso de la transformación de la onda se lo llama asomeramiento (Fig. 16).

La resolución del asomeramiento requiere plantear un problema de contorno con fondo variable cuya resolución analítica es compleja especialmente si la teoría de ondas utilizada para modelar el fenómeno es no lineal.

En general, y sea cual sea la teoría escogida, el problema del asomeramiento se plantea asumiendo que el proceso es bidimensional, y que el periodo de la onda y el flujo de energía en la dirección de la propagación de la onda son constantes. Estas hipótesis requieren además que la variación del fondo sea suave con lo cual no se produce reflexión y que no se produzca disipación de energía por fricción en el fondo o aportación de energía por viento.

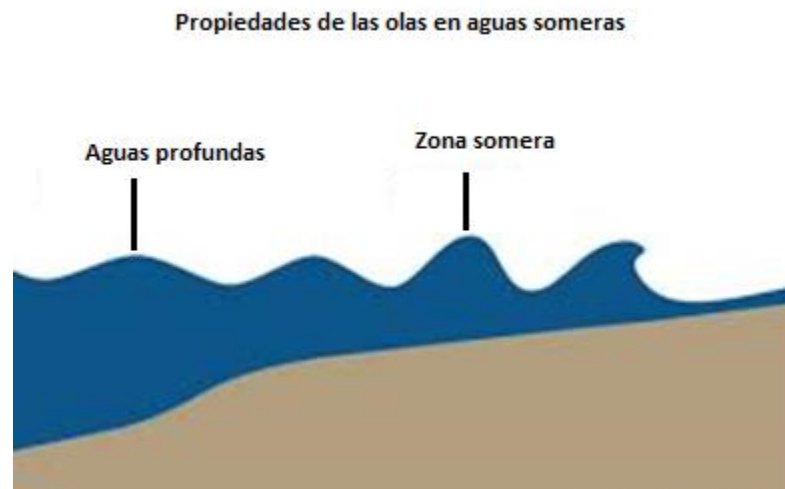


Fig. 16 Aguas profundas y aguas someras

### 2.3.2. Rotura

A medida que las ondas se propagan hacia la costa se asomeran aumentando su altura de ola progresivamente. Sin embargo, este aumento no es ilimitado, sino que, a una profundidad determinada, una onda de características dadas se vuelve inestable hasta que rompe disipando una enorme cantidad de energía en forma de turbulencia, fundamentalmente. En definitiva, las olas rompen cuando alcanzan un estado crítico en su movimiento que está afectado por la configuración del fondo, así como por otros factores.

La determinación del inicio de la rotura se ha intentado explicar con diferentes modelos matemáticos. Por ejemplo, para ondas progresivas se ha considerado que la rotura se inicia cuando:

- La velocidad de las partículas en la cresta es superior a la celeridad de la onda
- Las ondas se peraltan siendo las crestas cada vez más picuda hasta formar un Angulo máximo de 120°
- El perfil de la onda pierde su simetría y el frente se pone vertical

El tipo de rotura es función de la pendiente de la playa ( $m$ ), la relación ( $H/L$ ) y del peralte. Esta se combina en el parámetro de similaridad de surf:

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}}$$

Respecto al *tipo de rotura* (Fig. 17), las ondas rompen de manera diferente dependiendo de su altura, periodo y pendiente de la playa. Se han clasificado en los siguientes tipos:

- *Decrestamiento (spilling)*: en la cresta de la ola aparece espuma, burbujas y turbulencia y eventualmente cubre parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se decresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda.
- *Colapso (collapsing)*: la parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta truncada, ya que el punto del frente, desde donde la onda voltea o se desmorona, está delante y por debajo de la cresta de la ola.
- *Voluta (plunging)*: la mayor parte del frente de la onda adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la onda originando un salpicón y roción de agua.

- *Oscilación (surging)*: el frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia.

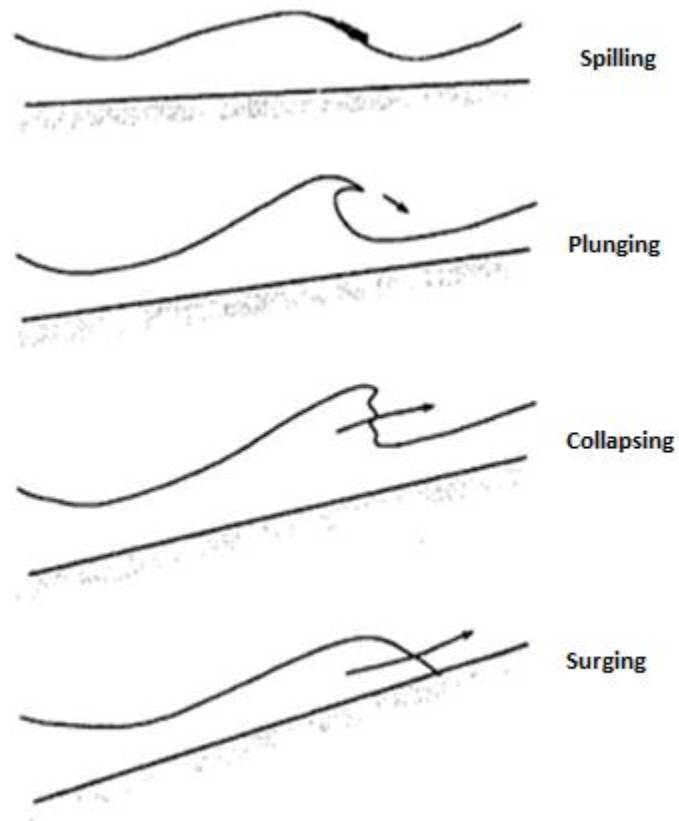


Fig. 17 Tipos de rotura de olas (Dinámicas Vol. 1, 2010)

### 2.3.3. Ascenso-descenso (Run-Up)

*Ascenso (run up)*: es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el máximo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometida a flujo oscilatorio.

*Descenso (run down)*: es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el mínimo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometida a flujo oscilatorio (Fig. 18).

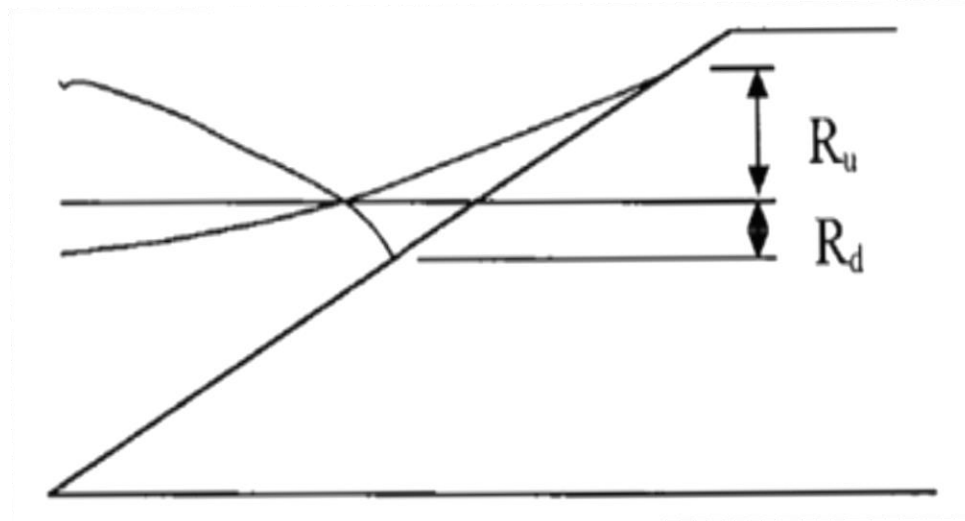


Fig. 18 Run up y Run down (Dinámicas Vol. 1, 2010)

### 2.3.4. Reflexión

La onda a medida que se aproxima hacia la costa es susceptible a verse transformada por la reflexión que tiene lugar en estructuras naturales y artificiales (Fig. 19). La reflexión en playas, acantilados y diques puede cambiar por completo el campo de ondas inducido por las ondas incidentes. En playas reflejantes, donde los efectos de la reflexión son importantes la hidrodinámica en la zona de rompientes, así como la morfo dinámica asociada pueden verse muy afectadas por efecto de la reflexión. La reflexión puede dar lugar a desplazamientos de la zona de rotura, cambios en el nivel de disipación en la playa, así como en el set up. Sistema de corrientes y el transporte de sedimentos asociado. Por lo tanto, la determinación del campo de ondas existente frente a una estructura reflejante natural o artificial será de capital importancia si se desea determinar adecuadamente los flujos en su proximidad, su morfo dinámica o su estabilidad.



Por otro lado, la reflexión tiene gran importancia dado que las ondas reflejadas, que generalmente viajan en dirección mar abierto pueden quedar atrapadas por efecto de la refracción. La presencia de ondas atrapadas puede tener consecuencias importantes sobre la morfo dinámica de playas.

El fenómeno de la reflexión es importante porque:

- La reflexión de ondas implica una reflexión de energía, opuesto a una disipación de energía.
- Múltiples reflexiones y ausencias de suficiente disipación de energía dentro de puertos o bahías, genera agitaciones y oleajes indeseables.
- Murallas, rompeolas o distintos tipos de revestimientos permiten crear estructuras de disipación eficientes.

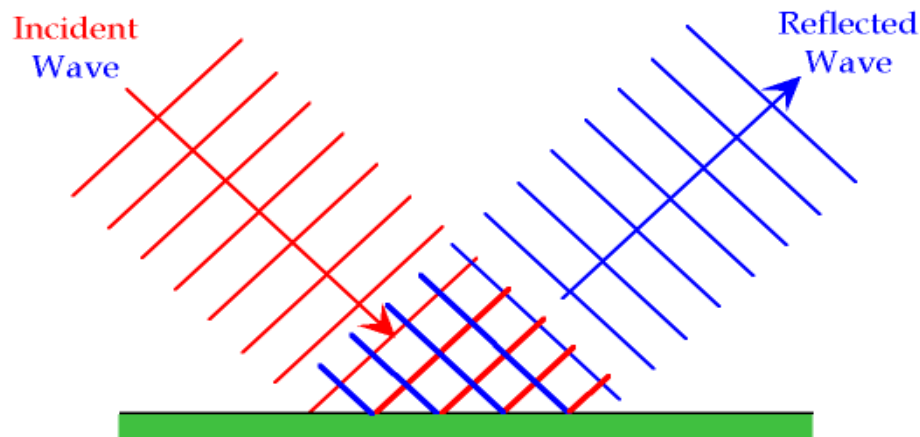


Fig. 19 Reflexión de olas. (Paolo Gyssels, Clase de Hidráulica Costera, 2015)

Cualquier barrera en el camino de propagación de una onda (inclusive una playa) puede reflejar energía, cuya cantidad depende de la pendiente de la barrera.

Por ejemplo, una playa plana reflejará poca energía, la mayor cantidad se disipa por rotura. Una estructura vertical reflejará mayor cantidad de energía.

El coeficiente de reflexión ( $r$ ) se define como la tasa de la altura de ola reflejada ( $H_r$ ) sobre la ola incidente ( $H_i$ ):

$$r = H_r/H_i$$

Este coeficiente depende de la pendiente, la rugosidad y permeabilidad de la superficie reflejante, peralte del oleaje ( $H/L$ ) y del ángulo de aproximación del oleaje.

Iribarren y Nogales (1949) propusieron el parámetro de Iribarren o parámetro de similaridad de surf:

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{gT^2}}}$$

Donde  $\beta$  es el ángulo con respecto a la horizontal. A valores bajos de pendiente de fondo, la ola tenderá a romper, mientras que a pendientes altas la ola se reflejará.

Para un valor de  $\xi=2.3$  se tiene el punto crítico entre la condición de rompiente y reflexión del oleaje. Si  $\xi < \xi_c$  sobreviene la rotura.

### 2.3.5. Transmisión

La transmisión del oleaje se define normalmente a través del *coeficiente de transmisión*,  $C_t$ , que se define en general como la raíz cuadrada del cociente entre los flujos de energía transmitida e incidente. Dado que, en el proceso de transmisión, el oleaje sufre modificaciones en su estructura espectral, un análisis preciso de la transmisión requeriría la definición de la función de transferencia espectral entre el oleaje incidente y transmitido.

## CAPITULO 3: ENSAYOS EXPERIMENTALES

---

### 3.1. EL CANAL DE OLAJE DEL LH

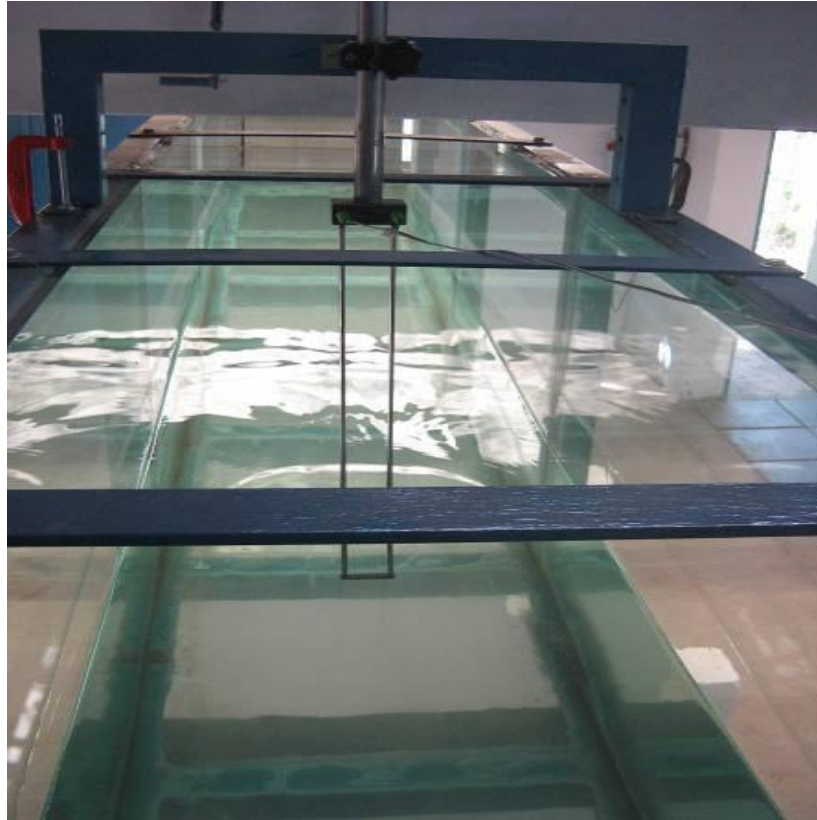
El Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC cuenta con un canal de oleaje de 23 metros de largo, 50 cm de ancho y 90 cm de alto (Fig. 20, Fig. 21). Este canal puede cumplir dos funciones: canal de pendiente variable y canal de oleaje.

Desde el año 2009 está equipado con un generador bidimensional con absorción dinámica, que permite simular curvas teóricas de oleaje regular e irregular. Cuenta con una pala vertical con desplazamiento horizontal gracias a un motor eléctrico. Una de las características más importantes es que cuenta con un *Sistema de Absorción Dinámica*.

El modelo físico que se utilizó para representar la presa constaba de una estructura lisa de acrílico de pendiente 1V:1.5H. Las mediciones del oleaje se efectuaron utilizando 3 sensores de nivel de tipo resistivos (Fig. 22). El primer sensor (S1) se colocó a poca distancia de la pala para utilizar un control sobre la propagación del oleaje, los otros dos sensores (S7 y S2) se utilizaron para poder separar la ola incidente de la reflejada (utilizando la técnica de Baldock 1999) y obtener los parámetros de la ola incidente a pie de dique.



Fig. 20 Canal de oleaje del LH



*Fig. 21 Canal de oleaje del LH*



*Fig. 22 Sensores sobre el Canal de Oleaje*

### 3.2. INSTRUMENTAL Y SOFTWARE DE ANÁLISIS

El generador de oleaje bidimensional fue adquirido a HR Wallingford. Dicho generador cuenta con una paleta vertical con desplazamiento horizontal a través de un motor eléctrico, que genera un campo de velocidades controlado, el cual a su vez deforma la superficie libre del agua, dando lugar a una serie de ondas, ondas solitarias, además de oleaje regular (es decir, con un único periodo constante y olas de igual altura), u oleaje de tipo irregular, donde tanto el periodo como las alturas cambian de ola en ola. El tren de ondas que se puede generar corresponde a espectro de energía típicos de la naturaleza (Jonswap, Pierson Moskowitz, entre otros) o a series medidas directamente por una boya de oleaje en el mar. Las olas generadas en el canal son controladas por el programa computacional *HP Wavemaker* (HR Wallingford, 2008 y 2009).

Las mediciones del Run-UP sobre la estructura se realizaron utilizando una técnica de video de alta definición. Las imágenes fueron analizadas por el programa *RIVER* (Patalano et all, 2015)

### 3.3. METODOLOGÍA

Los ensayos fueron realizados en el canal de oleaje vidriado de 23 m de largo, 50 cm de ancho y 90 cm de alto. Se utilizó una estructura lisa de acrílico de pendiente 1V:1,5H (Fig. 25).

El canal de oleaje fue subdividido en 3 tramos:

- Un primer tramo donde se va a desplazar la pala y estructura absorbente por detrás, de 1.5 m
- Un tramo plano de 18 m de largo
- Una playa disipativa parabólica de 3 m de largo

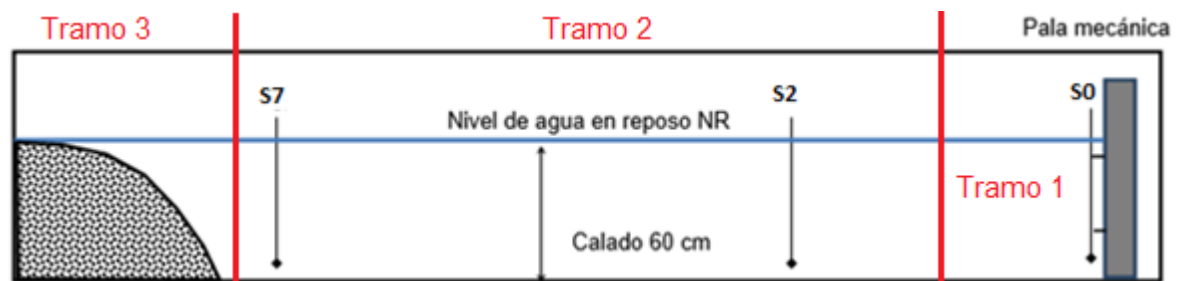


Fig. 23 Corte transversal de Canal de Oleaje

Como se comentó en los apartados previos, las mediciones de oleaje fueron realizadas con utilizando 3 sensores, el primer sensor (S0) se colocó a poca

distancia de la pala para utilizar un control sobre la propagación del oleaje, los otros dos sensores (S7 y S2) se utilizaron para poder separar la ola incidente de la reflejada (utilizando la técnica de Baldock 1999) y obtener los parámetros de la ola incidente a pie de dique, la distribución de los sensores se puede ver en la Fig. 23.

Las mediciones del Run-Up sobre la estructura se realizaron utilizando una técnica de video de alta definición. Se realizó la medición del Run-Up por procesamiento de imágenes: la cámara digital enfocando al talud de la presa permitió la adquisición de videos HD a 30 imágenes por segundos. Cada imagen ha sido analizada por segmentación para la determinación de Run-Up en pixel, luego se utilizó una implementación del programa RIVeR (Patalano et all, 2015) para la rectificación de los resultados en metros.

Para mejorar el contraste de las imágenes y poder detectar de forma óptima las oscilaciones se dispuso fluoresceína en el agua del canal y se colocaron luces led “blancas” lateralmente y una luz “negra” arriba del canal en correspondencia de la estructura. Los ensayos se realizaron en semi-oscuridad para aumentar el contraste entre la lámina de agua en movimiento y el fondo blanco de la estructura (Fig. 24, Fig. 26, Fig. 27).

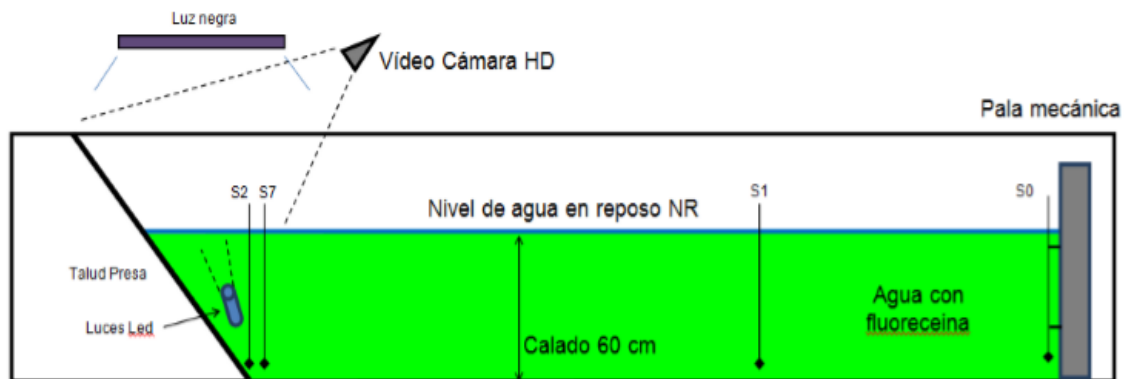


Fig. 24 Esquema del Canal de oleaje con la estructura instalada.



*Fig. 25 Estructura lisa de acrílico de pendiente 1V:1,5H.*



*Fig. 26 Canal con la estructura instalada.*

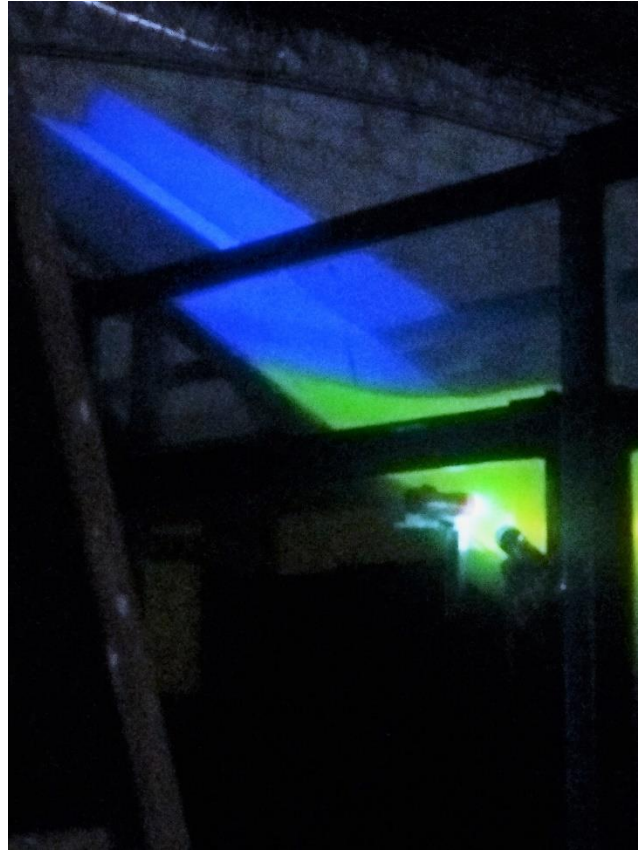


Fig. 27 Estructura acrílica durante la realización de un ensayo.

### 3.4. ENSAYOS A REALIZAR

Se realizaron dos series de ensayos por dos periodos diferentes, sin absorción dinámica y con absorción dinámica activada. La *Absorción Dinámica* funciona para corregir el oleaje generado restándoles las interferencias u ondas parasitas que se producen por reflexión en la estructura o la playa, que se vuelven a reflejar en la pala mecánica (Fig. 28).

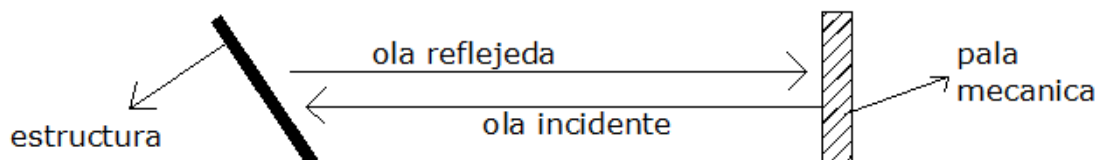


Fig. 28 Esquema de oleaje con Absorción Dinámica.



Si no se tuviese absorción dinámica se generaría el efecto de ola re-reflejada (Fig. 29).

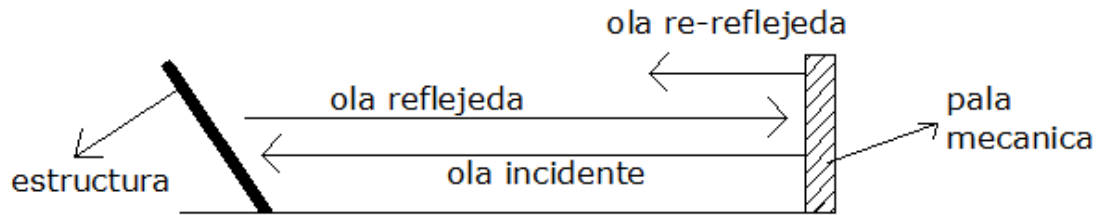


Fig. 29 Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica.

Se efectuó una repetición de cada ensayo. Las combinaciones de oleajes ensayados se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4 Combinación de parámetros para la realización de ensayos

FASE	$\xi_{op}$	h [m]	N	Hs [m]	Tp[s]	Rep.	ABS	Nº ensayos
1	3-8	0,60	1000	0,03-0,06	1,1	+1	-	8
2	3-8	0,60	1000	0,03-0,06	1,3	+1	-	8
3 <sub>PD</sub>	3-8	0,60	1000	0,03-0,09	1,1/1,3	-	-	14
3	3-8	0,60	1000	0,07-0,09	1,1/1,3	+1	Si	12
3	3-8	0,60	1000	0,03-0,09	1,1/1,3	-	Si	14

La metodología empleada fue la siguiente:

- 1) Definición de los ensayos a realizar;
- 2) Realización de los ensayos con playa disipativa y mediciones del oleaje en la posición que corresponde a pie de dique, sin estructura instalada y Sin absorción dinámica, tratamiento de la señal de oleaje a pie de dique, sin estructura colocada. Estos ensayos con playa disipativa se realizan para poder calibrar la absorción dinámica de la pala mecánica, para corregir el oleaje generado restándole las interferencias u ondas parasitas que se producen por reflexión en

la estructura, que se vuelven a reflejar en la pala mecánica. La playa disipativa tiene que disipar más del 95% de la energía de oleaje;

- 3) Realización de los ensayos con la estructura instalada y SIN absorción dinámica, tratamiento de la señal de oleaje a pie de dique (separación oleaje incidente y reflejado) y medición del Run-Up;
- 4) Calibración de la absorción dinámica;
- 5) Realización de los ensayos con la estructura instalada y CON absorción dinámica, tratamiento de la señal de oleaje a pie de dique (separación de oleaje incidente y reflejado) y medición del run up;
- 6) Comparación de las mediciones con las formulaciones que se detallaran más adelante.

Todos los ensayos fueron de una duración de 1000 olas y se realizaron por un nivel de agua (h) constante de 60 cm. Los parámetros que definen los escenarios ensayados se resumen en la Tabla 4.

Para reproducir un oleaje irregular, el espectro más utilizado es el JONSWAP (para estados de mar no completamente desarrollado) y Pierson-Moskowitz (para estados de mar de oleaje completamente desarrollado). Para estados de mar en aguas poco profundas se puede usar el espectro tipo TMA. Para el espectro JONSWAP se adopta normalmente el valor de apuntamiento  $\gamma=3.3$  y  $\sigma_a=0.07$ ,  $\sigma_b=0.09$ . Luego, el espectro de energía viene caracterizado principalmente por dos parámetros espectrales del oleaje. Los más comúnmente utilizados son la altura de la ola significativa  $H_{s0}$  del momento de orden cero del espectro,  $H_{m0}$ , y el periodo de pico  $T_p$ . Al mismo tiempo se utilizan los parámetros evaluados en la serie temporal determinados mediante análisis del tipo *zerocrossing*: la altura medio  $T_z$ , etc. En este estudio se generaron oleajes con espectros JONSWAP.

El parámetro de Iribarren se calcula con la siguiente expresión:

$$\xi_{op} = \frac{tg(\alpha)}{\sqrt{H_{mo}/L_{op}}}$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo del talud,  $H_{mo}$  la altura de ola espectral medida a pie de la estructura y  $L_{op}$  la longitud de onda equivalente en aguas profundas.  $T_p$  es el periodo pico y  $N$  el número de olas. Los tipos de rotura varían con el número de Iribarren. Valores del parámetro inferiores a 2 son raros en diques de talud, siendo más característicos de playas.

Resumiendo, el trabajo realizado podemos decir que se dividió en tres fases:

FASE 1: se realizó un primer escenario (E1) compuesto por 4 ensayos de oleajes irregulares, con duración de 1000 olas cada uno, relativos a un periodo de pico ( $T_p$ ) constante ( $T_{p1}=1.1s$ ), con una repetición, por un total de 8 ensayos. Para este escenario E1, las alturas de olas significantes ( $H_s$ ) variaron entre 0.03 m y 0.06m.

FASE 2: se realizó el segundo escenario (E2) compuesto por 4 ensayos de oleajes irregulares, con duración de 1000 olas cada uno, relativos a un periodo de pico constante ( $T_{p2}=1.3s$ ), con una repetición, por un total de 8 ensayos. Para este escenario E2, las alturas de olas significantes ( $H_s$ ) variaron entre 0.03m y 0.06m.

FASE 3: en esta tercera y última fase se repitieron los ensayos E1 y E2 activando la absorción dinámica en la pala y se efectuó una repetición completa de todos los ensayos por un total de 16 ensayos. Adicionalmente se realizaron tres ensayos más para cada periodo con tres alturas de olas entre 0.07 y 0.09 m. para estos últimos ensayos también se activó la absorción dinámica. En esta fase también se efectuaron todos los ensayos sin estructura y con una playa disipativa al final del canal para calibrar la absorción dinámica.

## CAPITULO 4: ANALISIS DE LOS RESULTADOS

---

### 4.1. FORMULACIONES UTILIZADAS PARA CÁLCULO DEL RUN UP

- **Formulación del CEM (Burchart y Hughes, 2002)**

El Coastal Engineering Manual (CEM año 2002) se presentó una serie de fórmulas para estimar el Run Up debido a oleaje irregular en pendientes suaves impermeables.

Para pendientes con un Angulo comprendido entre  $\tan \alpha = 1/1 - 1/4$  queda representado el Run Up por:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = 1.6\xi_{op} \quad \text{por} \quad (\xi_{op} \leq 2.5); \text{ y}$$

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = 4.5 - 0.2\xi_{op} \quad \text{por} \quad (2.5 < \xi_{op} < 9)$$

- **Formulación de Hughes (2004)**

Debido al mal ajuste de las formulaciones para oleaje que no rompe (que incluye también los oleajes que “rompen” por *surging/colapsing*) y para oleaje que incide en fuertes pendientes, Hughes definió un nuevo método basado en el flujo de momento del oleaje  $M_f$ .

El flujo de momento o *Momentum Flux* es el transporte de momento que actúa en una dirección perpendicular a la dirección del flujo. Puede ser considerado como la variación horizontal del momento que está atravesando un área unitaria. Se mide en fuerza por unidad de área.

En nuestro caso el cálculo del parámetro flujo de momento, responde a la ecuación empírica que estima el mismo. Las ecuaciones necesarias fueron las siguientes.

$$\left(\frac{M_F}{\rho gh^2}\right)_{\max} = A_0 \left(\frac{h}{gT^2}\right)^{-A_1}$$

Siendo

$$A_0 = 0.6392 \left(\frac{H}{h}\right)^{2.0256}$$

$$A_1 = 0.1804 \left(\frac{H}{h}\right)^{-0.391}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad. Hughes recomienda utilizar  $H_{mo}$  y  $T_p$  para oleaje irregular.

$$\frac{R_{u2\%}}{h} = 1.75(1 - e^{-1.3cot\alpha}) \left[\frac{M_F}{\rho gh^2}\right]^{1/2} \text{ por } \left(\frac{H_{mo}}{L_p} < 0.0225\right) \text{ y } \frac{1}{4} \leq \tan\alpha \leq 1$$

Y

$$\frac{R_{u2\%}}{h} = 4.4(\tan\alpha)^{0.7} \left[\frac{M_F}{\rho gh^2}\right]^{1/2} \text{ por } \left(\frac{H_{mo}}{L_p} > 0.0225\right) \text{ y } \frac{1}{5} \leq \tan\alpha \leq \frac{2}{3}$$

Donde  $h$  es la profundidad y  $M_f$  es el flujo de momento de oleaje.

- **Formulación de Eurotop (2007)**

Esta fórmula fue determinada considerando un gran volumen de datos internacionales y es válida en el rango  $0.5 < \xi_{m-1,0} \leq 8$  a 10. Sin embargo, es necesario recalcar que existen dispersiones a la hora de estimar Run-Up, y no debe descuidarse de contemplar las mismas.

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = 1.65\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta\xi_{m-1,0}$$

Con un máximo:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = 1.0\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}}\right)$$

Donde  $\gamma_b$  es el factor de berma,  $\gamma_f$  es el factor de rugosidad y  $\gamma_\beta$  el factor por incidencia oblicua del oleaje (en nuestro caso todos son iguales a la unidad).  $\xi_{m-1,0}$  es el parámetro de rotura definido por:

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{H_{m0}/L_{m-1,0}}}$$

Siendo:

$$L_{m-1,0} = \frac{gT_{m-1,0}^2}{2\pi}$$

$$T_p = 1.1T_{m-1,0}$$

Donde  $T_{m-1,0}$  es el periodo del momento de orden 1, en aguas profundas y  $L_{m-1,0}$  es la longitud de onda relativa a  $T_{m-1,0}$ .

Al igual que en la primera formulación, el valor de Run-Up varia linealmente con relación al Número de Irribarren ( $\xi$ ) y con distintas condiciones contempladas en los distintos factores.

Los efectos de la rugosidad de la superficie de la estructura son tenidos en cuenta con la utilización del factor  $\gamma_f$ . A continuación, adjunto la Tabla 5 con los valores que se utilizan.

Tabla 5 Valores de  $\gamma_f$  para tener en cuenta la rugosidad de la superficie de la estructura.

<b>Reference type</b>	$\gamma_f$
Concrete	1,00
Asphalt	1,00
Closed concrete blocks	1,00
Grass	1,00
Basalt	0,90
Small blocks over 1/25 of surface	0,85
Small blocks over 1/9 of surface	0,80
1/4 of stone setting 10 cm higher	0,90
Ribs (optimum dimensions)	0,75

El efecto de olas oblicuas es tenido en cuenta por el factor  $\gamma_\beta$ . El mismo se calcula en relación al ángulo de ataque del frente de oleaje (Fig. 30). En nuestro caso experimental, el ángulo de ataque era perpendicular al eje longitudinal del dique por lo tanto este valor es la unidad.

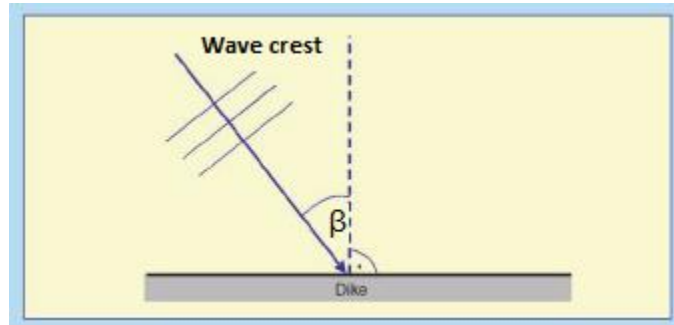


Fig. 30 Definición del ángulo de ataque.

El factor de berma  $\gamma_b$  contempla las estructuras que poseen diferentes pendientes desde el pie de la estructura hasta la cresta, o las que en su configuración poseen bermas. La obtención de este factor demanda un esfuerzo de cálculo importante, ya que es un proceso iterativo. Como la pendiente es uniforme en nuestra presa no profundizaremos más que esto.

- **Formulación de Ahrens (1993)**

Estas formulaciones fueron obtenidas analizando muchos datos sobre taludes de pendientes entre 1;1 y 1:4.

$$\frac{R_{u2\%}}{R_s} = 1.6 \pm 0.24 \quad \text{por } \xi_{op} \geq 4$$

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = \exp[2.48X_p + 0.446(\cos\alpha)^{3.5} + 0.19\Pi] \quad \text{por } \xi_{op} \geq 4$$

Siendo:

$$X_p = \left(\frac{h \cot \alpha}{L_p}\right) - \left(\frac{h \cot \alpha}{L_p}\right)^2 \quad \text{y} \quad \Pi = \frac{H_{mo}/L_p}{\left[\tanh\left(\frac{2\pi h}{L_p}\right)\right]^3}$$

## **4.2. RESULTADOS**

En este apartado se compararon los Run-up obtenidos por las diversas formulaciones teóricas utilizadas y los obtenidos experimentalmente, de esta manera veremos cual se aproxima de mejor manera.

### **4.2.1. Resultados de las formulaciones Teóricas**

- **Formulación del CEM (Burchart y Hughes, 2002)**



Tabla 6 Resultados Formulación CEM

Ensayo	Cálculo de Run Up (fórmula 16/17) CEM		
	Ru 2%	Ru 2%/Hmo	Ru2%/h
T1	0,105	3,490	0,175
	0,140	3,589	0,233
	0,180	3,680	0,301
	0,223	3,780	0,372
	0,238	3,779	0,397
	0,267	3,816	0,445
	0,296	3,848	0,494
T1 (r)	0,096	3,425	0,160
	0,137	3,603	0,228
	0,171	3,647	0,286
	0,213	3,740	0,355
	0,230	3,768	0,383
	0,263	3,811	0,438
T2	0,288	3,839	0,480
	0,094	3,252	0,157
	0,130	3,330	0,216
	0,173	3,541	0,289
	0,210	3,619	0,350
	0,246	3,676	0,411
	0,271	3,711	0,451
T2 (r)	0,304	3,751	0,506
	0,091	3,143	0,152
	0,126	3,315	0,210
	0,161	3,434	0,269
	0,197	3,524	0,329
	0,234	3,598	0,390
T1 ABS	0,275	3,716	0,458
	0,304	3,751	0,506
	0,07	3,270	0,117
	0,10	3,461	0,173
	0,14	3,569	0,226
	0,16	3,644	0,273
	0,20	3,726	0,335
T1 ABS (r)	0,23	3,766	0,377
	0,25	3,800	0,418
	0,07	3,287	0,121
	0,11	3,422	0,177
T2 ABS	0,14	3,569	0,226
	0,17	3,654	0,280
	0,07	3,063	0,112
	0,10	3,269	0,163
	0,14	3,447	0,236
	0,16	3,506	0,269
	0,19	3,583	0,322
T2 ABS (r)	0,23	3,644	0,377
	0,25	3,688	0,424
	0,06	2,992	0,100
	0,10	3,269	0,163
T2 ABS (r)	0,14	3,434	0,229
	0,18	3,547	0,296

En la Tabla 6 se observan los valores de  $Ru2\%$  obtenidos con la formulación del CEM para valores de  $H_s$  entre 0.3 m y 0.9 m. Más adelante ese valor obtenido de  $Ru2\%$  es dividido por la altura del agua en el canal de oleaje ( $h=0.6m$ ) para así obtener un valor adimensional que pueda ser comparable en los apartados que siguen a continuación.

- **Formulación de Hughes (2004)**

"MEDICION Y ANALISIS DE OLEAJES Y DEL RUN-UP EN MODELO FISICO DE LA PRESA JORGE  
CEPERNIC"

Tabla 7 Resultados formulación Hughes

Ensayo	Cálculo de Run Up (fórmula 38) HUGHES						
	Hm0/Lp	Ao	A1	MF/(pgh^2)	Ru2%	Ru 2%/Hmo	Ru2%/h
T1	0,0175	0,0015	0,5820	0,0080	0,080	2,679	0,134
	0,0214	0,0025	0,5253	0,0118	0,098	2,513	0,163
	0,0265	0,0040	0,4804	0,0166	0,256	5,230	0,427
	0,0343	0,0058	0,4468	0,0212	0,289	4,905	0,482
	0,0343	0,0067	0,4355	0,0241	0,309	4,901	0,515
	0,0381	0,0082	0,4179	0,0284	0,335	4,781	0,558
	0,0419	0,0100	0,4026	0,0329	0,360	4,680	0,601
T1 (r)	0,0154	0,0013	0,5979	0,0075	0,078	2,786	0,130
	0,0221	0,0024	0,5306	0,0111	0,095	2,495	0,158
	0,0245	0,0037	0,4883	0,0159	0,251	5,336	0,418
	0,0308	0,0054	0,4528	0,0208	0,287	5,030	0,478
	0,0332	0,0062	0,4410	0,0230	0,301	4,939	0,502
	0,0375	0,0080	0,4202	0,0277	0,331	4,797	0,552
	0,0408	0,0095	0,4068	0,0316	0,353	4,708	0,588
T2	0,0114	0,0014	0,5898	0,0096	0,088	3,038	0,147
	0,0130	0,0025	0,5253	0,0154	0,112	2,866	0,186
	0,0193	0,0040	0,4804	0,0193	0,125	2,555	0,209
	0,0229	0,0056	0,4498	0,0246	0,312	5,373	0,519
	0,0262	0,0075	0,4251	0,0305	0,347	5,180	0,578
	0,0286	0,0090	0,4111	0,0346	0,370	5,067	0,617
	0,0317	0,0111	0,3947	0,0405	0,400	4,939	0,667
T2 (r)	0,0097	0,0014	0,5898	0,0106	0,093	3,191	0,154
	0,0127	0,0024	0,5306	0,0149	0,110	2,892	0,183
	0,0157	0,0037	0,4883	0,0198	0,127	2,696	0,211
	0,0187	0,0052	0,4560	0,0252	0,143	2,555	0,238
	0,0219	0,0071	0,4302	0,0311	0,159	2,443	0,265
	0,0290	0,0092	0,4089	0,0353	0,374	5,050	0,623
	0,0317	0,0111	0,3947	0,0405	0,400	4,939	0,667
T1 ABS	0,0118	0,0007	0,6642	0,0053	0,065	3,061	0,109
	0,0165	0,0015	0,5820	0,0082	0,082	2,723	0,136
	0,0205	0,0024	0,5306	0,0115	0,097	2,545	0,161
	0,0243	0,0034	0,4967	0,0147	0,241	5,352	0,401
	0,0297	0,0049	0,4625	0,0190	0,274	5,078	0,457
	0,0330	0,0060	0,4439	0,0223	0,297	4,947	0,495
	0,0363	0,0073	0,4276	0,0258	0,319	4,836	0,532
T1 ABS (r)	0,0121	0,0008	0,6571	0,0055	0,067	3,030	0,111
	0,0153	0,0016	0,5746	0,0092	0,086	2,780	0,144
	0,0205	0,0024	0,5306	0,0115	0,097	2,545	0,161
	0,0248	0,0035	0,4924	0,0152	0,245	5,320	0,408
T2 ABS	0,0086	0,0008	0,6571	0,0068	0,075	3,388	0,124
	0,0117	0,0015	0,5820	0,0100	0,090	3,006	0,150
	0,0161	0,0028	0,5151	0,0152	0,111	2,704	0,185
	0,0180	0,0035	0,4924	0,0178	0,120	2,609	0,200
	0,0211	0,0049	0,4625	0,0223	0,134	2,489	0,224
	0,0243	0,0064	0,4382	0,0272	0,328	5,287	0,546
	0,0270	0,0080	0,4202	0,0318	0,355	5,140	0,591
T2 ABS (r)	0,0078	0,0007	0,6820	0,0061	0,071	3,525	0,118
	0,0117	0,0015	0,5820	0,0100	0,090	3,006	0,150
	0,0157	0,0027	0,5201	0,0147	0,109	2,725	0,182
	0,0196	0,0042	0,4766	0,0200	0,127	2,545	0,212

En la Tabla 7 se pueden observar los valores de  $Ru_{2\%}$  obtenidos con la formulación de Hughes. Se observa que los valores de  $Ru_{2\%/h}$  obtenidos son menores a los obtenidos con la formulación de CEM. En apartados siguientes se verá cual de todas las formulaciones utilizadas se ajusta mejor a los valores obtenidos mediante la experimentación.

- **Formulación de Eurotop (2007)**

"MEDICION Y ANALISIS DE OLEAJES Y DEL RUN-UP EN MODELO FISICO DE LA PRESA JORGE  
CEPERNIC"

Tabla 8 Resultado Formulación EUROTOP

Ensayo	EUROTOP				
	Lm-1	$\xi m-1$	Ru2%	Ru 2%/Hmo	Ru2%/h
T1	1,4214	4,5889	0,099	3,300	0,165
	1,5038	4,1397	0,127	3,263	0,212
	1,5318	3,7274	0,158	3,223	0,263
	1,4214	3,2722	0,187	3,171	0,312
	1,5205	3,2752	0,200	3,171	0,333
	1,5205	3,1071	0,220	3,149	0,367
	1,5205	2,9625	0,241	3,129	0,401
T1 (r)	1,5038	4,8857	0,093	3,321	0,155
	1,4214	4,0773	0,124	3,257	0,206
	1,5885	3,8757	0,152	3,238	0,254
	1,5318	3,4559	0,182	3,193	0,303
	1,5205	3,3285	0,194	3,178	0,323
	1,5205	3,1296	0,217	3,152	0,362
	1,5205	3,0018	0,235	3,134	0,392
T2	2,0991	5,6719	0,098	3,370	0,163
	2,4802	5,3165	0,131	3,349	0,218
	2,0958	4,3600	0,161	3,282	0,268
	2,0926	4,0044	0,189	3,250	0,314
	2,1123	3,7433	0,216	3,225	0,360
	2,1123	3,5861	0,234	3,208	0,390
	2,1123	3,4044	0,258	3,187	0,430
T2 (r)	2,4802	6,1653	0,098	3,396	0,164
	2,4802	5,3860	0,127	3,354	0,212
	2,4802	4,8429	0,156	3,318	0,260
	2,4802	4,4367	0,184	3,288	0,307
	2,4553	4,0973	0,212	3,259	0,353
	2,1123	3,5618	0,237	3,205	0,395
	2,1123	3,4044	0,258	3,187	0,430
T1 ABS	1,5038	5,5885	0,072	3,365	0,120
	1,5038	4,7200	0,099	3,310	0,165
	1,5318	4,2327	0,124	3,271	0,207
	1,5318	3,8895	0,146	3,239	0,243
	1,5038	3,5181	0,173	3,200	0,288
	1,5038	3,3375	0,191	3,179	0,318
	1,5038	3,1822	0,209	3,159	0,348
T1 ABS (r)	1,5038	5,5118	0,074	3,361	
	1,6755	4,9012	0,103	3,322	
	1,5318	4,2327	0,124	3,271	
	1,5318	3,8470	0,149	3,235	
T2 ABS	2,1123	6,5325	0,075	3,413	0,125
	2,1123	5,5941	0,101	3,366	0,168
	2,1123	4,7852	0,136	3,314	0,226
	2,1123	4,5176	0,152	3,294	0,253
	2,1123	4,1696	0,176	3,265	0,294
	2,1123	3,8913	0,201	3,240	0,335
	2,1123	3,6886	0,222	3,219	0,370
T2 ABS (r)	2,1123	6,8513	0,069	3,427	
	2,1123	5,5941	0,101	3,366	
	2,1123	4,8446	0,133	3,319	
	2,1123	4,3331	0,164	3,279	

En la Tabla 8 se pueden observar los valores de  $Ru_{2\%}$  obtenidos con la formulación de Eurotop. Si comparamos los resultados obtenidos por esta formulación vemos que los valores de  $Ru_{2\%}$  de Eurotop son muy similares a los valores de  $Ru_{2\%}$  obtenidos con Hughes, distándose de la formulación de CEM.

- **Formulación de Ahrens (1993)**

"MEDICION Y ANALISIS DE OLEAJES Y DEL RUN-UP EN MODELO FISICO DE LA PRESA JORGE  
CEPERNIC"

Tabla 9 Resultados formulación Ahrens

Ensayo	AHRENS 1993					
	Xp	Π	Rs	Ru2%	Ru 2%/Hmo	Ru2%/h
T1	0,249	0,019	0,070	0,113	3,757	0,188
	0,250	0,024	0,092	0,147	3,765	0,245
	0,250	0,029	0,115	0,185	3,768	0,308
	0,249	0,037	0,139	0,222	3,770	0,371
	0,250	0,038	0,149	0,238	3,775	0,396
	0,250	0,042	0,165	0,264	3,778	0,441
	0,250	0,046	0,182	0,291	3,781	0,485
T1 (r)	0,250	0,017	0,066	0,105	3,760	0,175
	0,249	0,024	0,089	0,143	3,760	0,238
	0,249	0,028	0,110	0,177	3,759	0,294
	0,250	0,034	0,134	0,215	3,771	0,358
	0,250	0,037	0,144	0,230	3,774	0,384
	0,250	0,041	0,163	0,261	3,777	0,434
T2	0,229	0,016	0,065	0,103	3,568	0,172
	0,210	0,021	0,083	0,133	3,409	0,222
	0,229	0,026	0,110	0,175	3,576	0,292
	0,229	0,031	0,130	0,208	3,581	0,346
	0,228	0,036	0,150	0,240	3,576	0,399
	0,228	0,039	0,163	0,261	3,578	0,435
T2 (r)	0,228	0,043	0,181	0,290	3,581	0,483
	0,210	0,016	0,062	0,099	3,405	0,165
	0,210	0,021	0,081	0,130	3,408	0,216
	0,210	0,025	0,100	0,160	3,411	0,267
	0,210	0,030	0,120	0,191	3,415	0,319
	0,211	0,035	0,139	0,223	3,428	0,371
T1 ABS	0,228	0,040	0,165	0,265	3,578	0,441
	0,228	0,043	0,181	0,290	3,581	0,483
	0,250	0,013	0,050	0,080	3,758	0,134
	0,250	0,018	0,071	0,113	3,761	0,188
	0,250	0,023	0,089	0,143	3,763	0,238
	0,250	0,027	0,106	0,169	3,766	0,282
	0,250	0,033	0,127	0,204	3,772	0,339
T1 ABS (r)	0,250	0,036	0,142	0,226	3,774	0,377
	0,250	0,040	0,156	0,249	3,777	0,415
	0,250	0,013	0,052	0,083	3,758	0,138
	0,247	0,018	0,072	0,116	3,732	0,193
T2 ABS	0,250	0,023	0,089	0,143	3,763	0,238
	0,250	0,028	0,108	0,173	3,766	0,289
	0,228	0,012	0,049	0,078	3,559	0,131
	0,228	0,016	0,067	0,107	3,562	0,178
	0,228	0,022	0,091	0,146	3,566	0,244
	0,228	0,025	0,103	0,164	3,568	0,274
	0,228	0,029	0,121	0,193	3,571	0,321
T2 ABS (r)	0,228	0,033	0,138	0,222	3,574	0,369
	0,228	0,037	0,154	0,247	3,576	0,411
	0,228	0,011	0,044	0,071	3,559	0,119
	0,228	0,016	0,067	0,107	3,562	0,178
T2 ABS (r)	0,228	0,021	0,089	0,143	3,566	0,238
	0,228	0,027	0,112	0,178	3,569	0,297

En la Tabla 9 se observan los valores de  $Ru2\%$  obtenidos con la formulación de Ahrens. De las cuatro formulaciones utilizadas, con Ahrens obtuvimos los valores más altos de  $Ru2\%$ .

#### **4.2.2. Propagaciones: oleaje y Run-Up**

En la Tabla 10 se muestran los principales resultados de las mediciones del  $Ru2\%$  relativos con periodo de pico  $T_p = 1.1s$  y en la Tabla 11 se muestran los mismos resultados relativos a los casos con periodo de pico  $T_p = 1.3s$ , para ambos periodos, se ensayaron 7 casos con alturas de olas desde 0.03m hasta 0.09m sin absorción dinámica, se realizó una repetición completa y posteriormente se ensayaron los mismos 7 casos esta vez con absorción dinámica activada.



Tabla 10 Resultados de las mediciones del Ru2% para un periodo de pico  $T_p= 1.1s$

$H_{s,pala}$ (m)	$H_{s,pie^*}$ (m)	$H_{mo,pie^*}$ (m)	$T_{p,pie^*}$ (s)	$\xi_{50p}$	Ascenso (m)	$R_{u2\%}$ (m)
0.03	0.029	0.03	1.05	5.29	0.125	0.069
0.04	0.037	0.039	1.08	4.64	0.193	0.107
0.05	0.047	0.049	1.09	4.14	0.251	0.139
0.06	0.057	0.059	1.05	3.77	0.246	0.136
0.07	0.061	0.063	1.086	3.65	0.358	0.199
0.08	0.068	0.07	1.086	3.46	0.381	0.211
0.09	0.076	0.077	1.086	3.30	0.502	0.278
0.03 R	0.028	0.028	1.08	5.47	0.173	0.096
0.04 R	0.037	0.038	1.05	4.70	0.194	0.108
0.05 R	0.047	0.047	1.11	4.23	0.266	0.148
0.06 R	0.055	0.057	1.09	3.84	0.316	0.175
0.07 R	0.06	0.061	1.086	3.71	0.375	0.208
0.08 R	0.067	0.069	1.086	3.49	0.462	0.253
0.09 R	0.074	0.075	1.086	3.35	0.5	0.277
0.03 CA	0.021	0.021	1.08	6.26	0.104	0.058
0.04 CA	0.029	0.029	1.08	5.29	0.155	0.086
0.05 CA	0.037	0.037	1.09	4.70	0.193	0.107
0.06 CA	0.044	0.044	1.09	4.32	0.235	0.130
0.07 CA	0.052	0.052	1.08	3.94	0.322	0.179
0.08 CA	0.059	0.059	1.08	3.74	0.39	0.215
0.09 CA	0.065	0.065	1.08	3.57	0.423	0.235

Tabla 11 resultados de las mediciones del Ru2% para un periodo de pico  $T_p = 1.3s$

$H_{s,pala}$ (m)	$H_{s,pie^*}$ (m)	$H_{mo,pie^*}$ (m)	$T_{p,pie^*}$ (s)	$\xi_{op}$	Ascenso (m)	$R_{u2\%}$ (m)
0.03	0.028	0.029	1.276	6.36	0.111	0.062
0.04	0.038	0.039	1.387	5.48	0.183	0.102
0.05	0.047	0.049	1.275	4.89	0.227	0.126
0.06	0.056	0.058	1.274	4.50	0.315	0.175
0.07	0.065	0.067	1.28	4.18	0.377	0.209
0.08	0.071	0.073	1.28	4.01	0.505	0.280
0.09	0.079	0.081	1.28	3.80	0.539	0.299
0.03 R	0.028	0.029	1.387	6.36	0.132	0.073
0.04 R	0.037	0.038	1.387	5.55	0.196	0.109
0.05 R	0.045	0.047	1.387	4.99	0.243	0.135
0.06 R	0.055	0.056	1.387	4.58	0.295	0.164
0.07 R	0.063	0.065	1.38	4.25	0.4	0.241
0.08 R	0.071	0.074	1.28	3.98	0.434	0.241
0.09 R	0.079	0.081	1.28	3.80	0.548	0.304
0.03 CA	0.022	0.022	1.28	7.19	0.116	0.064
0.04 CA	0.03	0.03	1.28	6.15	0.136	0.075
0.05 CA	0.04	0.041	1.28	5.26	0.199	0.110
0.06 CA	0.045	0.046	1.28	4.97	0.215	0.119
0.07 CA	0.053	0.054	1.28	4.59	0.338	0.187
0.08 CA	0.06	0.062	1.28	4.28	0.384	0.213
0.09 CA	0.067	0.069	1.28	4.06	0.437	0.242

#### 4.2.3. Análisis de los resultados

En la Fig. 31 y en la Fig. 32 se muestran los resultados de los valores de la altura de ola significativa, relativos al periodo  $T_{p1}=1.1s$  y al período  $T_{p2}=1.3s$ , obtenidos a pie de estructura con respecto al valor de altura de ola significativa frente a la pala generadora de oleaje,  $H_{s,pala}$ .

Los valores representados se corresponden con oleaje incidente después de haber separado la señal incidente de la reflejada. Se consideraron tres casos:

- Sin estructura con playa disipativa,
- Con estructura sin absorción dinámica y
- Con estructura con absorción dinámica activada

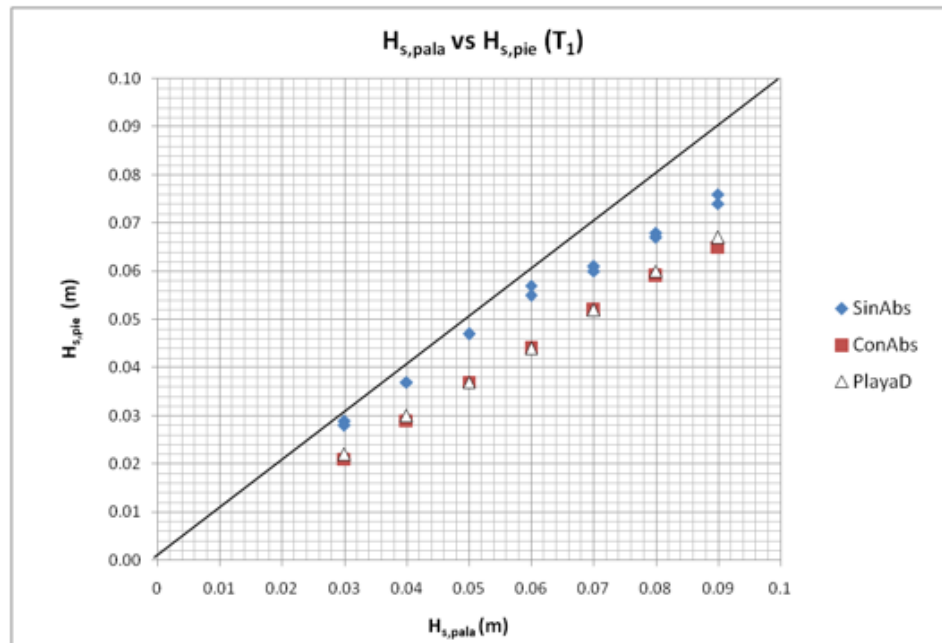


Fig. 31 Hs en la pala con respecto a los valores obtenidos a pie de estructura utilizando playa disipativa con la estructura puesta, con absorción dinámica activada y sin absorción para el periodo T1=1.1s.

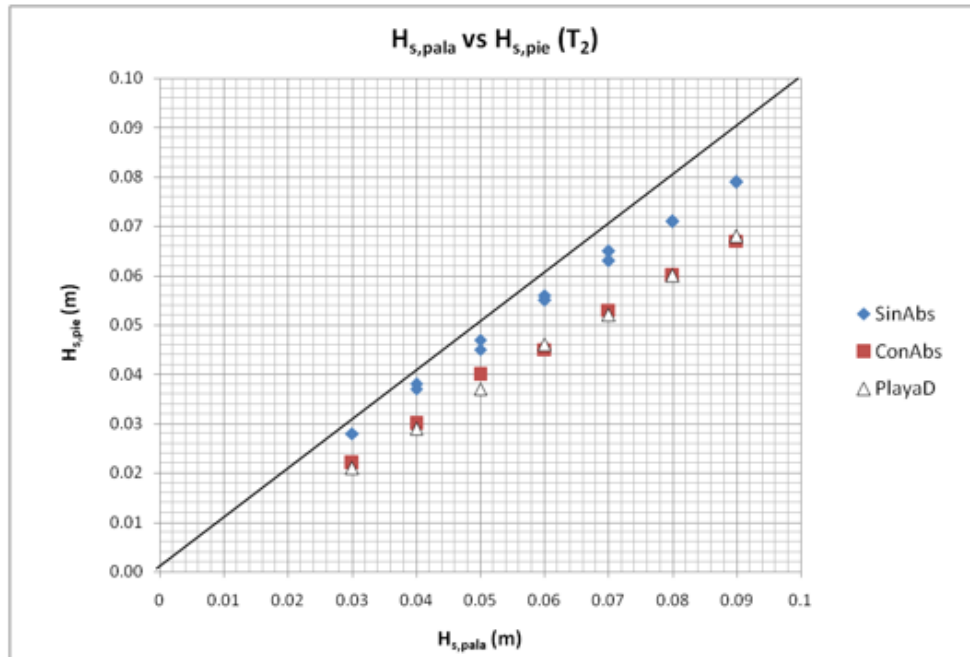


Fig. 32  $H_s$  en la pala con respecto a los valores obtenidos a pie de estructura utilizando playa disipativa con la estructura puesta, con absorción activada y sin absorción para el periodo  $T_1=1.3s$ .

Como análisis de los resultados mostrados en las Fig. 31 y Fig. 32 se menciona lo siguiente:

- Los valores obtenidos a pie de la estructura son inferiores a los valores impuestos a la pala debido a que el oleaje que se propaga realmente es siempre ligeramente inferior al oleaje que se impone como señal a la pala y debido a la pérdida de energía por el efecto de la fricción del canal sobre la propagación del oleaje;
- Cuanto más elevada es la altura de la ola significativa que se propaga (por un mismo periodo) tanto más elevada es la diferencia entre los valores impuestos a la pala y resultantes a pie de dique;
- Existe una correspondencia aceptable ( $R^2 > 0.95$ ) entre los valores obtenidos con playa disipativa y con estructura con absorción activada. Se recuerda que la absorción dinámica fue calibrada respecto la playa disipativa.

En la Fig. 33 y en la Fig. 34 se muestra los valores de  $R_{u2\%}$  medido con respecto a los valores impuestos de los ensayos. Se observa que el valor del Run-Up obtenido sin absorción es siempre mayor que el valor del Run-Up obtenido con absorción para los mismos valores de altura de ola significativa y periodo de pico, y por ende para las mismas series de olas, frente a la pala. Este resultado es de esperarse considerando lo observado en las figuras 31 y 32 (Fig. 31, Fig. 32), en las cuales para un mismo valor de altura de ola significativa frente a la pala los valores de altura de ola a pie de la estructura en los casos que se activa la absorción son menores.

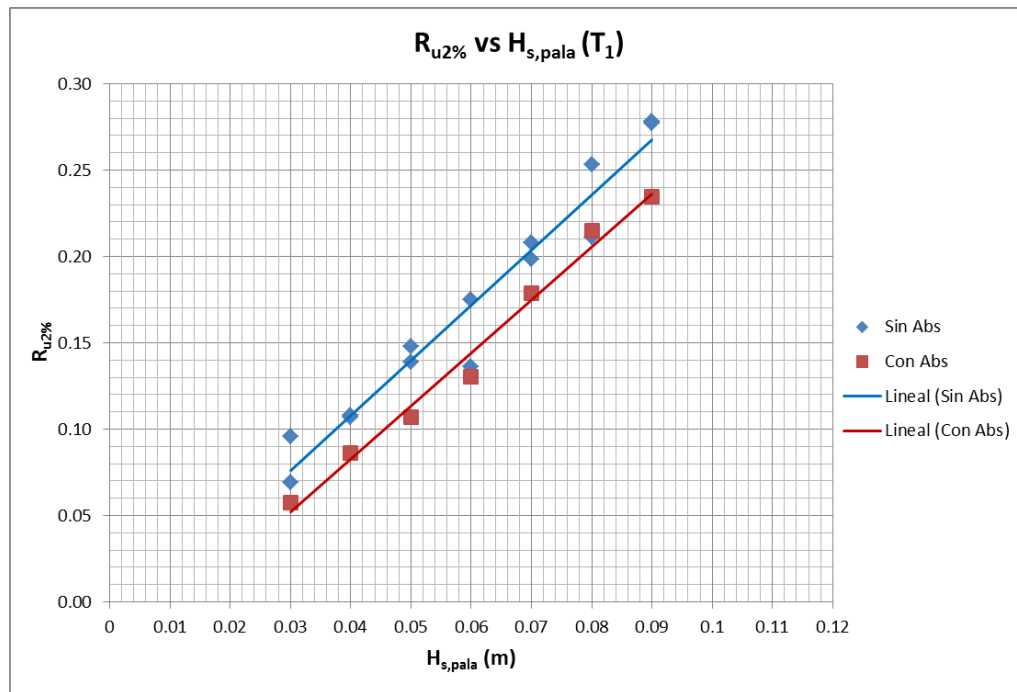


Fig. 33  $R_{u2\%}$  medido, con respecto a los valores de  $H_s$  en input ( $H_{spala}$ ), para el periodo  $T_1=1.1s$ .

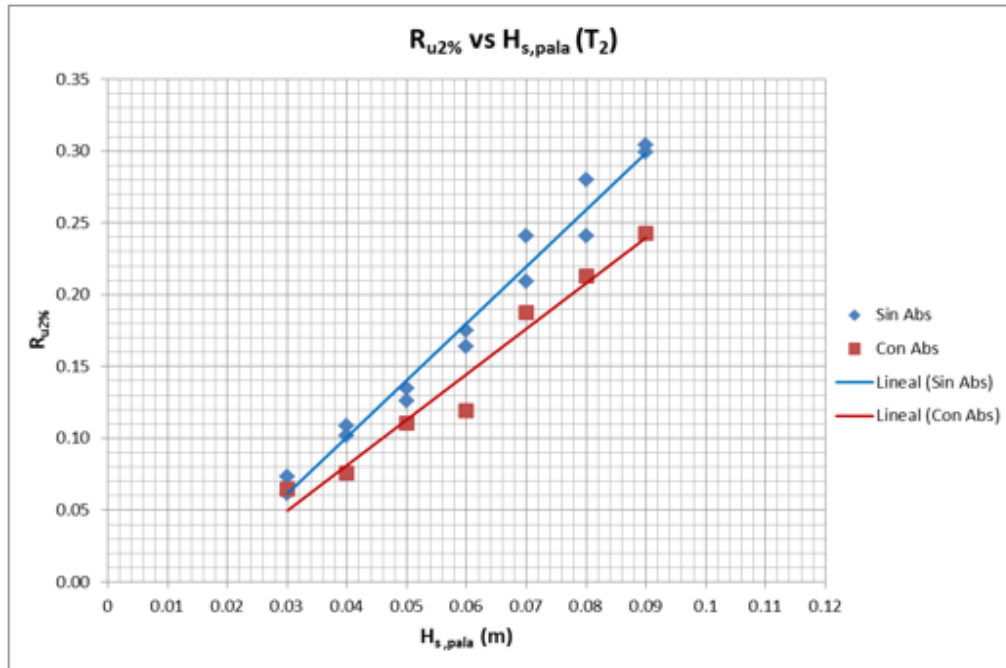


Fig. 34 Ru2% medido, con respecto a los valores de Hs en input (Hspala), para el periodo T2=1.3s.

En los gráficos de valores de Run-Up con respecto a la altura de ola espectral a pie de la estructura (Fig. 35, Fig. 36), se observa que por una misma altura de ola espectral incidente el Run-up es el mismo tanto con absorción dinámica como sin absorción dinámica. Resulta evidente que tiene que ser así en cuanto el valor de altura de ola con absorción que se corresponde con un valor de altura de ola sin absorción en la abscisa de las gráficas, ha sido obtenido por un valor frente a la pala diferente, en particular mayor que el valor frente a la pala, pero sin absorción activa.

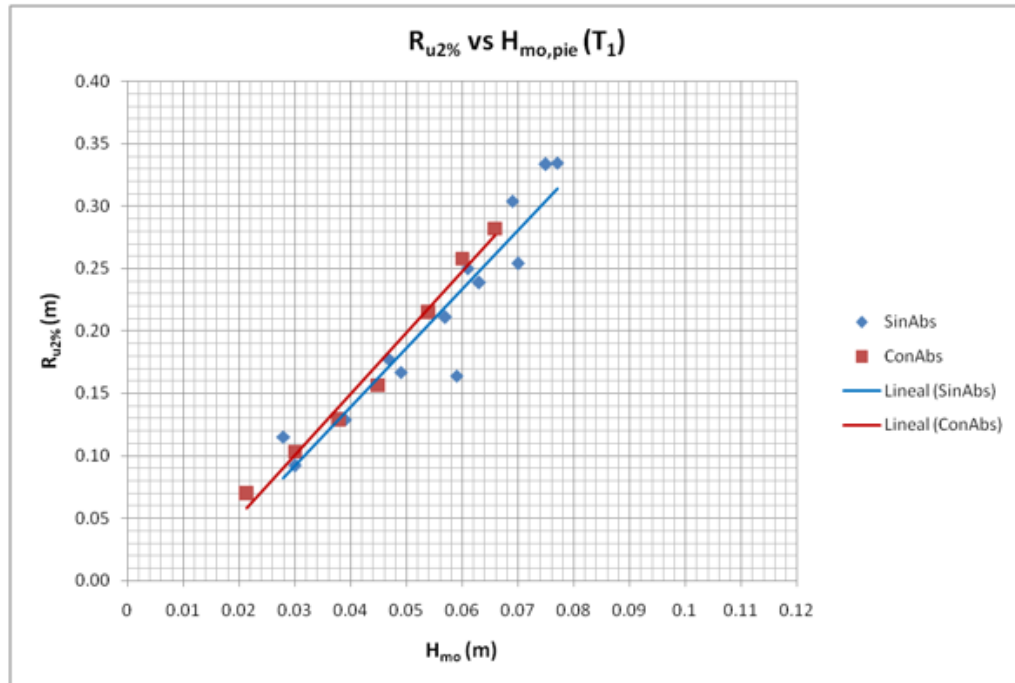


Fig. 35  $R_{u2\%}$  medido con respecto a la altura de ola espectral  $H_{mo}$  a pie de dique, para el periodo  $T_1=1.1s$ .

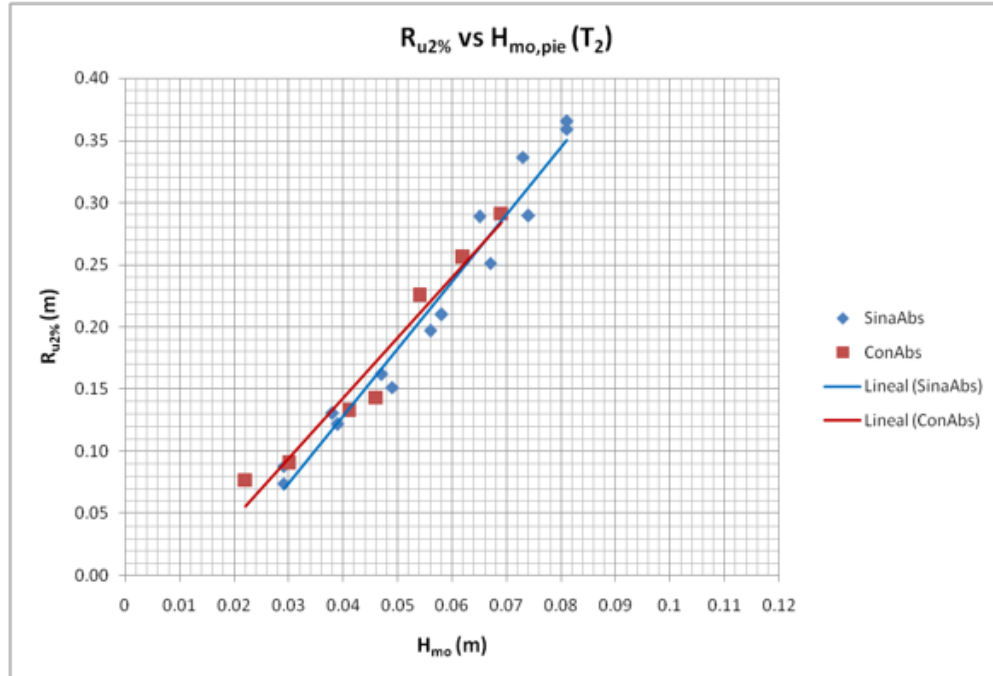


Fig. 36  $R_{u2\%}$  medido con respecto a la altura de ola espectral  $H_{mo}$  a pie de dique, para el periodo  $T_2=1.3s$ .

#### 4.2.4. Discusión sobre los valores medidos y obtenidos con formulaciones

En este apartado se busca saber, a través del análisis de gráficos, que formulación se ajustan mejor a los datos obtenidos mediante las mediciones realizadas en el canal. Es importante que tengamos en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las formulaciones teóricas han sido obtenidas experimentalmente con ensayos en diferentes condiciones con respecto a los ensayos realizados en el LH-UNC y con estructuras diferentes.
- Las formulaciones teóricas han sido obtenidas con ensayos sin absorción dinámica.

En la Fig. 37 podemos ver como se ajustan los valores experimentales a las formulaciones de *Coastal Engineering Manual* (CEM) y de EUROTOP en función del parámetro de Iribarren  $\xi_{op}$  que delimita la zona entre dos tipos de rotura: descrestamiento-voluta y colapso-oscilación.

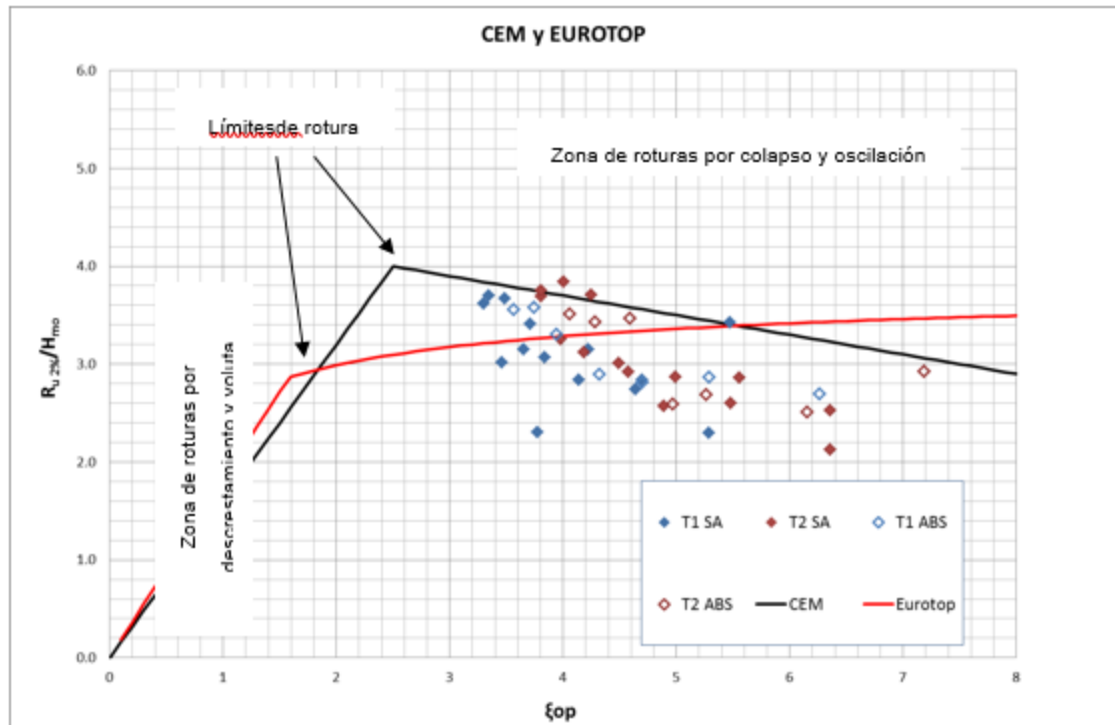


Fig. 37 Gráfico que refleja el ajuste de los datos experimentales con las formulaciones de CEM y EUROTOP



Se puede ver que los datos experimentales no se ajustan claramente a ninguna de las dos formulaciones debido a que los valores experimentales están alejados de las curvas trazadas por las formulaciones de CEM y Eurotop, aunque se observa que siguen la pendiente de la curva formada por CEM. También se observa que no hay una marcada diferencia entre los valores obtenidos con absorción dinámica y sin absorción dinámica.

En la Fig. 38 se observan graficados todos los valores de Run-Up 2% ( $R_{u2\%}$ ) obtenidos con las formulaciones con respecto a los medidos.

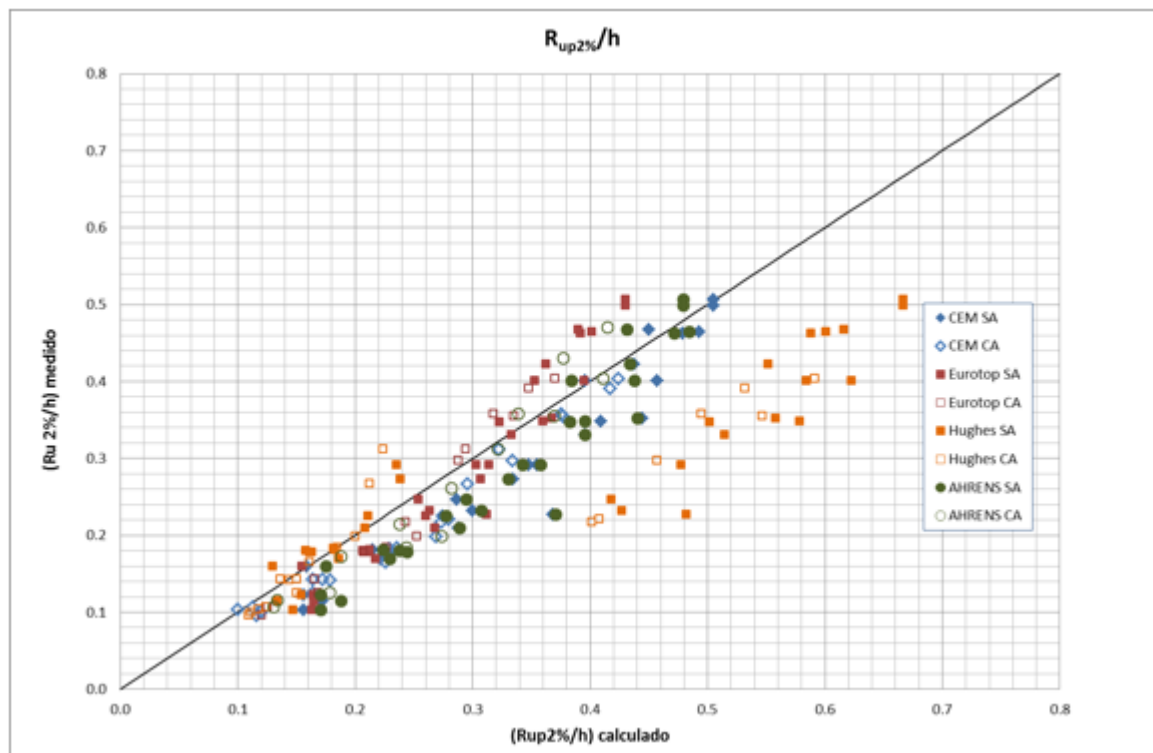


Fig. 38 Datos experimentales medidos y calculados con las formulaciones teóricas analizadas.

Analizando la Fig. 38 podemos observar que la formulación de Ahrens y CEM son las que mejor se ajustan, mientras la formulación de Hughes es la que más se aleja de la recta que representa el ajuste perfecto. Como en la gráfica anterior, no se observan cambios significantes entre los valores obtenidos con y sin absorción dinámica.

A continuación, se presenta los valores de la dispersión de los resultados obtenidos utilizando el coeficiente de correlación  $R^2$ :

$$R2 = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Donde x e y representan los valores medido y estimado,  $\bar{x}$  el promedio de los valores medidos,  $\bar{y}$  el promedio de los valores estimados.

Tabla 12 Valores del coeficiente de correlación para las diferentes formulaciones.

Formulación	R2
Ahrens (1993)	0.96
CEM (Burchart y Hughes, 2002)	0.97
Eurotop (2007)	0.90
Hughes (2004)	0.89

En la Tabla 12 puede llegarse a la conclusión, al igual que el análisis gráfico realizado anteriormente en las Fig. 37 y Fig. 38, que las formulaciones que mejor se ajustan son Ahrens y CEM.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES

---

### 5.1. CONCLUSIONES

En función de los ensayos realizados y los resultados alcanzados se mencionan las siguientes conclusiones:

- 1) Respecto a las formulaciones utilizadas se concluye que Ahrens (1993) y CEM (Burcharth y Hughes, 2002) son las que mejor se ajustan a los datos experimentales con coeficientes de correlación iguales a  $R^2= 0.96$  para Ahrens y de  $R^2=0.97$  para CEM.
- 2) Analizando la Fig. 38 se concluye que el sistema de *Absorción Dinámica* permite obtener en los ensayos valores ( $R_{u2\%/h}$ ) levemente más cercanos a los valores de ( $R_{u2\%/h}$ ) obtenidos teóricamente con las formulaciones. Por lo tanto, la utilización de dicha función no mejora significativamente el ajuste con las diferentes formulaciones.
- 3) Para una misma condición de ensayo, los valores de Run Up obtenidos sobre la estructura activando la *Absorción Dinámica* son en promedio 2.8 cm inferiores a los valores resultantes sin activar la absorción dinámica para el periodo T1 y 3.5 cm para el periodo T2, lo cual demuestra que la influencia que tiene dicha función de la pala generadora de oleaje en los resultados obtenidos durante la realización de los ensayos es pequeña.

### 5.2. CONCLUSIONES SOBRE LA PRACTICA SUPERVISADA

Esta práctica supervisada fue una experiencia laboral que me permitió aprender más sobre un tema poco desarrollado en la carrera de Ingeniería Civil como lo es la hidráulica costera, en un ambiente donde me encontré contenido por profesionales que trabajan en el Laboratorio de Hidráulica, quienes con tiempo y dedicación pudieron enseñarme y orientarme para poder llevar a cabo este informe.

Con la realización de este trabajo realizado pude tomar dimensión de lo importante que es llevar a cabo la modelación de los fenómenos físicos, ya que muchas veces aplicamos formulaciones teóricas tomando como irrefutables los resultados que arrojan las mismas. Al realizar los ensayos en laboratorio fuimos capaces de poder determinar cuál de estas formulaciones teóricas eran las que mejor se ajustaban a las condiciones presentes en el LH.

Por ultimo quiero agradecer a mi tutor Paolo Gyssels y a los demás profesionales del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que estuvieron comprometidos con este proyecto por su buena predisposición y dedicación conmigo para poder llevar a cabo esta Práctica Supervisada.

## BIBLIOGRAFIA

---

Ahrens, J.P., Seelig, W.N., Ward, D.L., Allsop, W. (1993). Wave runup on and wave reflection from coastal structures. Proceedings of Ocean Wave Measurement and Analysis (Waves '93) Conference. American Society of Civil Engineers, pp. 489– 502.

Baldock, T.E. y D.J. Simmonds (1999). “Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry.” Coastal Engineering 38, pp. 167-176.

Burcharth, H.F., Hughes, S.A., (2002). Fundamentals of Design. In: S. Hughes (Ed), Coastal Engineering Manual, Part VI, Design of Coastal Project Elements, Chapter VI-5, Engineering Manual 1100-2-1100, US Army Corps of Engineerings, Washington, DC.

Eurotop, (2007). Eurotop wave Overtopping of Sea Defenses and Related Structures: Assessment Manual.

Gyssels, Paolo (2015). “Clases de Hidráulica Costera: Maestría en Ciencia de la Ingeniería”

HR Wallingford Group (2009). Wave Generation System. User Manual. England.

Hughes, S.A., (2004). “Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter”. Coastal Engineering 51 pp. 1085-1104.

Kamphuis J. W. (2000). “Introduction to coastal engineering and management.

Patalano, A., García, C. M., Brevis, W., Guillén, F. N., Moreno, L., y Rodriguez, A. (2015). Recent advances in Eulerian and Lagrangian Large-Scale Particle Image Velocimetry. 36th IAHR WorldCongress, (Roesgen 2003), 3–8.