



Universidad  
Nacional  
de Córdoba

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y  
NATURALES**

**PRÁCTICA SUPERVISADA**

**"MODELACIÓN FÍSICA DEL RUN-UP POR OLEAJE  
EN EL TALUD DE LA PRESA GOBERNADOR  
JORGE CEPERNIC"**

**CARRERA:** INGENIERIA CIVIL

**ALUMNO:** FISTAROL THEMTHAM, Franco

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

**TUTOR EXTERNO:** DRA ING. TARRAB, Leticia

**AÑO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

---

A mis padres por ser mi sostén, mis referentes y acompañarme siempre. Sin lugar a dudas hoy me encuentro en este momento gracias a ustedes.

A mis hermanas, porque tenerlas a mi lado hace que todo resulte más fácil.

A mis amigos y muy especialmente a los que me dio la facultad, por todos los momentos compartidos.

Al Dr. Ing. Gyssels Paolo, por darme esta oportunidad, transmitirme sus conocimientos y confiar en mí.

Al Laboratorio de Hidráulica y a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, haber formado parte de estas instituciones es realmente un honor.

A todos muchas gracias.

## **RESUMEN**

---

El presente 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".

En una presa es de suma importancia cuantificar el ascenso vertical del agua sobre el paramento de la misma debido a la interacción con distintas condiciones de oleajes. Estos valores de Run Up juntos a otros parámetros se utilizan para fijar cotas de diseño, condiciones de diseño, etc. La bibliografía sobre el tema es escasa, por lo que la modelación física resulta vital tanto para la determinación del Run Up como para el ajuste de las formulaciones existentes.

En el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba se recrearon escenarios de oleaje sobre un modelo a escala de la presa. Como resultado de estas experimentaciones se obtuvieron los parámetros de las condiciones de oleaje y mediante técnica de video se midieron los valores del Run Up 2%. Se realizaron, en una segunda fase, los mismos ensayos pero activando la absorción dinámica del canal. Esta última es una aplicación del generador de oleaje que resta las interferencias u ondas parásitas que se producen en el canal por reflexión en estructuras.

La obtención de los valores reales de Run Up 2% sirvió para la comparación y el ajuste de los valores obtenidos mediante distintas formulaciones.

Finalmente se analizaron y compararon las dos modalidades de experimentación con absorción dinámica activa y desactivada.

## INDICE

---

CAPÍTULO 1:	MARCO REFERENCIAL.....	5
CAPÍTULO 2:	CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE .....	16
2.1	INTRODUCCIÓN.....	16
2.2	MOVIMIENTO OSCILATORIO. MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS.....	16
2.3	TEORÍA LINEAL DE ONDAS.....	19
2.4	ANÁLISIS DE OLEAJE .....	20
2.5	TRANSFORMACION DEL OLEAJE EN CANAL 2D.....	28
CAPÍTULO 3:	RUN UP SOBRE ESTRUCTURAS.....	32
3.1	CONCEPTOS GENERALES .....	32
3.3	FORMULACIONES PARA ESTIMAR EL RUN-UP .....	35
3.4	Medición real del RUN-UP.....	38
CAPÍTULO 4:	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	39
4.1	INTRODUCCIÓN.....	39
4.2	EL CANAL DE OLEAJE DEL LH .....	41
4.3	ESTRUCTURA DE ENSAYO.....	50
4.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	44
CAPÍTULO 5:	RESULTADOS DEL RUN UP.....	57
5.1	INTRODUCCION.....	57
5.2	APLICACIÓN FORMULACIONES .....	58
5.3	VALOR DE RUN UP MEDIDO .....	58
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
CAPÍTULO 6:	CONCLUSIONES .....	71
	BIBLIOGRAFÍA.....	72

## **CAPÍTULO 1: MARCO REFERENCIAL**

---

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo es el informe técnico de la asignatura “Práctica Supervisada”. La misma tiene como objetivo que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en la carrera Ingeniería Civil en una problemática en particular.

En esta monografía se incorporan los aspectos técnicos fundamentales abordados en el desarrollo de esta práctica profesional, detallándose a continuación generalidades de la problemática estudiada, y como se planteó el trabajo sobre la misma.

El laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba junto al Instituto Nacional del Agua (INA), celebraron un contrato mediante el cual el Laboratorio se comprometió a la realización de un modelo físico a escala de la presa “Gobernador Jorge Cepernic”. La misma se encuentra en etapa de proyecto y quedará materializada sobre el Río Santa Cruz en la provincia homónima. En este modelo se reproducirán distintos climas de oleaje bidimensional, para proceder luego con la evaluación del Run Up por oleaje sobre el paramento de la presa.

### **1.2 ÁMBITO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

Bajo el acompañamiento y dirección del Dr. Ingeniero Gyssels Paolo, Dra. Ing. Leticia Tarrab e Ing. Mariana Pagot las tareas experimentales y de modelación se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba ubicado sobre Bv. Dr. Juan Filloy dentro de Ciudad Universitaria.

#### **1.2.1 Laboratorio de Hidráulica de la UNC**

El Laboratorio de Hidráulica perteneciente al departamento de Hidráulica de la FCEFYN de la UNC es el único en su tipo en la Provincia de Córdoba. Creado a mediados de la década de 1940 presta servicios académicos a las Universidades Nacional de Córdoba y realiza actualmente actividades de investigación científico-tecnológica financiada en proyectos provinciales de la Agencia Córdoba Ciencia, nacionales de CONICET, Agencia Nacional de Promoción Científica, SECYT e Internacionales para la Unión Europea. Los servicios técnicos y de consultoría especializada en

hidráulica se han realizado para numerosas Direcciones Provinciales del País, y los principales organismos Nacionales. Para estos clientes se han realizado numerosos modelos físicos reducidos a fondo fijo y móvil de obras y estructuras hidráulicas, incluyendo presas, azudes, sifones, vertederos, alcantarillas, disipadores de energía, como así también modelos fluviales bidimensionales y tridimensionales. Adicionalmente se realizan tareas de reparación y calibración de instrumental hidrométrico. El Laboratorio cuenta con el equipamiento propio de ensayos físicos en canal vidriado de pendiente variable apto para ríos de montaña de 14 m x 0,5m x 0,6 m, bombas mayores (2 sumergibles de 100 l/s c/u) y menores, instrumental hidrométrico de campo y laboratorio como limnómetros ópticos, limnógrafos digitales, vertederos de aforo, molinetes y mini molinetes, velocímetro Doppler 3D, tubos Pitot, instrumental de mediciones limnológicas y sedimentológicas, etc. , diversos modelos reducidos a fondo fijo y móvil en una nave cubierta de más de 400 m<sup>2</sup>. El personal disponible en el LH de la UNC incluye profesionales del campo de la Ingeniería en áreas técnicas que incluyen mecánica de fluidos, hidrología, limnología, obras hidráulicas, hidráulica fluvial, hidráulica marítima, hidráulica computacional, hidráulica ambiental, análisis digital de imágenes, todas con sus correspondientes modelos computacionales y software específico de pre y pos proceso, análisis de datos.

### **1.2.2 Instituto Nacional del Agua**

Es un organismo científico tecnológico descentralizado que tiene por objetivo satisfacer los requerimientos de estudio, investigación, desarrollo y prestación de servicios especializados en el campo del aprovechamiento y preservación del agua. Este organismo depende de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Continuador de las tareas iniciadas en el año 1973 por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH), lleva más de 40 años contribuyendo al crecimiento económico, al bienestar social y a la salud ambiental, a través de una gestión equitativa y sustentable del agua.

Cuenta con una estructura técnica y científica integrada por centros especializados, regionales y programas con sede en distintas ciudades de la Argentina. El INA realiza estudios y presta servicios técnicos de gran especialización, tanto para organismos públicos como privados, poniendo a disposición del país instalaciones, instrumentos y un equipo humano altamente calificado.

Dentro de sus campos de estudio se encuentran:

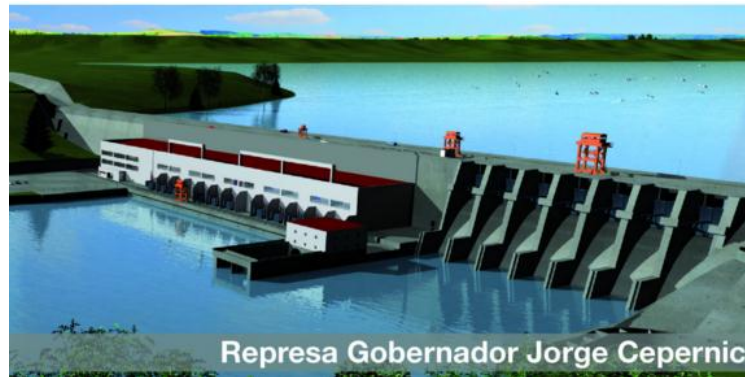
- Biogeoquímica del agua.
- Evaluación de impacto ambiental y riesgo por obras de infraestructura y accidentes en cuerpos de agua.
- Evaluación de sitios contaminados y tecnologías para su remediación.
- Hidrología superficial y subterránea.
- Hidrología urbana.
- Sistemas de alerta hidrológico para inundaciones, aluviones, crecidas, sequías y derrames.
- Hidráulica de grandes obras.
- Hidráulica fluvial, marítima e industrial.
- Información hídrica.
- Ingeniería de riego y drenaje.
- Ingeniería de minimización, tratamiento de agua, efluentes y residuos.
- Ingeniería de control de erosión y sedimentación.
- Calidad de agua.
- Normatización sobre los recursos hídricos.

### **1.2.2 Complejo Hidroeléctrico “Presidente Néstor Kirchner, Gobernador Jorge Cepernic”**

#### ***Introducción***

El proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz prevé la construcción de dos represas: Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. Se encuentran ubicadas sobre este importante curso de agua de alta potencialidad hidroenergética, aprovechada por primera vez a partir de esta obra (Figura 1-2). 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.



**Figura 1-1 Represa Gobernador Jorge Cepernic**

La presa a estudiar “Gobernador Jorge Cepernic” (Figura 1-1) está localizada a 170 kilómetros de la ciudad de Comandante Luis Piedra Buena en la provincia de Santa Cruz. 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.



**Figura 1-2 Ubicación de la Represa**





### ***Presa***

Para el eje de la presa se adoptó el definido en el anteproyecto de Agua y Energía , sobre el cual se han realizado importantes estudios geotécnicos previos a efectos de definir las condiciones geológicas-geotécnicas del sitio de emplazamiento.

### ***Cota de Coronamiento***

La cota de coronamiento, fue fijada por encima del Nivel Agua Máximo Extraordinario en un valor que tuvo en cuenta la revancha necesaria para soportar el oleaje generado por los fuertes vientos de la zona.

El Nivel de Agua Máximo Extraordinario (NAME) para el tránsito de la crecida mencionada, alcanzaría a 112.20.

Se realizó un estudio de antecedentes que permitió conocer las características del viento en la zona de El Calafate y Lago Argentino. Las diferentes fuentes consultadas son:

1. Consorcio IECI (INCONAS-ESIN-CONETEC-IATASA): donde se consideraron velocidades promedio de 64 km/h, 96 km/h y 128 km/h. Como datos adicionales se incorporaron registros de viento y ráfagas mayores a 60 km/h en el periodo octubre de 1962 a 1964 y valores de ráfagas máximas mensuales mayores a 70 km/h en el periodo 1961-1975.
2. Estudio “Azud Nivelador entre Lago Argentino y Bahía Redonda” realizado por el Instituto de Desarrollo Urbano y Vivienda Provincia de Santa Cruz (Año 2003) con datos del Servicio Meteorológico Nacional y la empresa EVARSA sobre mediciones de viento realizadas en la localidad de el Calafate.
3. Estudio “Proyecto del cierre de la Bahía Redonda, en Lago Argentino El Calafate, Provincia de Santa Cruz” desarrollado por el Instituto Nacional del Agua (I.N.A.) (Año 2005). Este informe concluye que en la región de El Calafate la dirección predominante del viento es de sector Oeste-Sudoeste, cuya mayor intensidad ocurre durante los meses de verano, con velocidades medias que oscilan entre 19 y 24 km/h. Con respecto a los vientos máximos, estos se dan durante todo el año y sus intensidades máximas ocurren durante los meses de Noviembre, Diciembre y Enero, las cuales oscilan entre los 100 a 130 km/h.
4. Los valores máximos extremos registrados en el periodo 1981-2000 oscilaron entre 64 km/h a 156 km/h.

5. Finalmente se consideraron como vientos de diseño un valor de 100 km/h como valor de viento máximo y un valor de 156 km/h correspondiente a un valor extremo desarrollados sobre un Fetch de 8.8 Km.

Para definir la altura total de resguardo se consideraron dos hipótesis:

1. Nivel del Embalse Máximo Extraordinario (NEME) + Altura adicional asociada al viento de 100 km/h lo que resulta en un nivel de cresta de olas incluido el Run Up de 117.18 msnm.
2. Nivel del Embalse Máximo de Operación (NEMO) + Altura adicional asociada al viento de 156 km/h. lo que resulta en un nivel de cresta de olas incluido el Run Up de 118.28 msnm.

Por lo tanto se adoptó como cota de coronamiento de la presa la cota 118.50, y del borde superior del muro rompeolas o parapeto aguas arriba 119.70 m.

El coronamiento de presa tiene un ancho de 12 metros, con una calzada pavimentada de 7,30 m, con vereda de hormigón de 2.00 m hacia agua arriba actuando el muro rompeolas como baranda. Hacia agua abajo la calzada está protegida con baranda metálica tipo flexbeam.

### ***Sección Tipo***

La presa es del tipo de materiales sueltos con paramento de hormigón (CRFD). Es una estructura con cota de coronamiento 118.50 msnm, de 43.50 metros de altura desde el fondo actual del cauce. La longitud del coronamiento es de 2900 metros y el volumen del terraplén es de unos 6.000.000 m<sup>3</sup>.

La inclinación de los taludes de presa ha sido adoptada en 1V:1,5H en base a los usos típicos en las presas con paramento de hormigón, y verificados bajo distintos estados de carga.

La pantalla de hormigón consiste en losas de 15 m de ancho y 0,35 m de espesor, con juntas verticales entre losas. Esta losa se apoya sobre una capa de mortero de protección, mientras que el cuerpo de la presa se encuentra zonificado en distintos macizos de terraplén a ejecutarse con las gravas del aluvión del río. En todo el perímetro de contacto de la pantalla de hormigón con el terreno, o con otras estructuras, se dispone la ejecución de un plinto. El mismo tiene una superficie de apoyo de 6 metros a nivel de la cota de fundación en el sector del cauce, y se reduce a 3.00 m sobre las laderas en los sectores que apoya en roca. El contacto entre la pantalla de hormigón y el plinto se produce a través de una junta perimetral.

La fundación de presa se hará sobre el material del cauce del río, previo retiro de una capa superficial, de unos 2 m de espesor. Dada la profundidad de la roca y el espesor del aluvión, el cierre de este, se logra mediante la ejecución de un muro colado de hormigón armado de 0,80 m de espesor ejecutado mediante paneles de 6,00 m de ancho que penetran la roca en una profundidad de aproximadamente 10,00 m. La profundidad del aluvión en la zona de emplazamiento, es variable llegando a un valor máximo de alrededor de 20,00 m. Este muro queda vinculado al plinto flotante y a la pantalla de hormigón asegurando el cierre hidráulico de la obra.

El tratamiento de fundación consistirá en la ejecución de una cortina de inyecciones en correspondencia con el muro colado y con el plinto y su tratamiento con inyecciones de contacto.

Los materiales componentes del enrocado han sido sectorizados en función de sus cualidades mecánicas, granulométricas y requerimientos de compactación. El perfil transversal típico de a presa se conforma por un terraplén apoyo de la pantalla de hormigón, y gravas provenientes del aluvión del río que se disponen en tres sectores en función de su granulometría y grado de compactación requerido.

Aguas arriba del plinto flotante, en el sector del cauce y sobre las márgenes se dispone un material de tipo limo plástico que puede actuar como sellador en el caso de producirse fisuras o filtraciones a nivel de la junta perimetral. Por encima de este material se dispone de un relleno de protección de suelos granulares.

Sobre el talud de aguas abajo se prevé una capa de enrocado de protección. Sobre margen derecha después de la central hidroeléctrica, el cierre se completa, en un sector de 90 aproximadamente, con un muro de gravedad de hormigón fundado sobre la roca, de tal forma de garantizar el cierre hidráulico sobre dicha ladera.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS**

El trabajo pactado en el contrato prevé la realización de dos escenarios de oleaje a simularse en el canal del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba. Se colocará una

estructura de pendiente 1V:1.5H lisa e impermeable para la evaluación del Run Up debido al oleaje. Esta estructura es el modelo a escala reducida de la sección tipo de la presa en estudio.

En principio un escenario completo queda definido por la realización de cuatro ensayos de oleajes de 1000 olas cada uno, sin absorción dinámica y con absorción dinámica, con una repetición. Por lo tanto, dos escenarios se componen de 8 ensayos en total y de 8 ensayos más correspondientes a una repetición.

### **1.3.1 Fases de Trabajo**

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 período 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 período 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***

El canal generador de oleaje del Laboratorio de Hidráulica tiene una función llamada *absorción dinámica* que resta las interferencias u ondas parásitas que se producen en el canal por reflexión en estructuras.

Por lo tanto en esta fase se realizarán los mismos ensayos que en E1 y E2 pero con absorción dinámica activada. Serían 4 ensayos por escenarios más sus correspondientes repeticiones, dando un total de 16 ensayos para esta fase.

### **1.3.2 Alcance de la Práctica Supervisada**

La práctica supervisada tiene como alcance la realización de todas las actividades previas a la ejecución de los ensayos definitivos. Pueden nombrarse el armado y disposición de todos los

componentes técnicos que debieron utilizarse, calibración de la pala generadora de oleaje, construcción de la playa disipativa, calibración de la absorción dinámica, etc.

Una vez realizada las tareas preparativas se prosiguió con los ensayos propiamente dichos. La cátedra de la materia "Practica Supervisada" requiere una determinada carga horaria tanto en trabajo experimental como en ejecución de los informes pertinentes. Debido a esto es que el presente informe solo profundiza las metodologías utilizadas en la FASE 1 de trabajo (de la cual se participó activamente). Los resultados de Run Up obtenidos en la FASE 1 junto con los valores de las otras fases serán sometidos a un análisis en los apartados correspondientes, con el objeto de que las conclusiones sean lo más certeras posibles.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

El *objetivo general* de la práctica supervisada es:

- La participación en la preparación del modelo físico del talud interno de la presa que se construirá sobre el río Santa Cruz (Gobernador Jorge Cepernic) y la realización de ensayos en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la UNC para evaluar el Run Up de diseño para distintos escenarios hidráulicos.

Pueden detallarse los siguientes *objetivos específicos*:

- Conocer y comprender la hidrodinámica sobre taludes impermeables por el impacto de oleaje.
- Participar en las actividades de construcción del modelo y de su funcionamiento.
- Realizar simulaciones por diferentes escenarios hidráulicos y efectuar un análisis de los resultados comparando las mediciones del Run Up con las formulaciones ingenieriles.

Finalmente el *objetivo a nivel personal* fue:

- Que la práctica brinde un primer contacto con las problemáticas y actividades profesionales del ingeniero civil en el área de la hidráulica, siempre inmerso en un marco de aprendizaje y compañía de futuros colegas.

## 1.5 PLAN DE ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Se pueden encuadrar las actividades realizadas en distintos grupos. Se las nombrarán estos grupos en primera instancia y en el transcurso del siguiente trabajo se procederá a detallarlas.

Las distintas actividades son:

- A. Estudio de antecedentes y análisis de trabajos realizados anteriormente sobre modelación física del Run Up por oleaje sobre diques en talud impermeables.
- B. Preparación de la estructura de ensayo y preparación de los ensayos en el canal.
- C. Realización de ensayos experimentales con el canal de oleaje.
- D. Medición de las variables de diseño (Run Up).
- E. Comparación de los resultados experimentales con las formulaciones existentes.
- F. Elaboración del informe final.

Tabla 1-1 Cronograma de actividades

Actividad	Mes															
	oct-15				nov-16				dic-16							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
A	x	x														
B			x	x												
C					x	x	x	x								
D							x	x	x	x						
E									x	x	x					
F										x	x	x				

## **CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE**

---

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En el océano siempre existe algún tipo de onda que pone en manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interface agua-atmósfera 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 período y longitud como en sus mecanismos de control.

Para el problema de interés en este trabajo las ondas más importantes son fundamentalmente las ondas de viento con periodos que oscilan entre 3 y 30 segundos.

### **2.2 MOVIMIENTO OSCILATORIO. MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS.**

En la descripción matemática de las ondas se considera generalmente que las ondas son oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie del agua. Asumiremos que las ondas se repiten una y otra vez, distinguiendo entre dos tipos: las ondas progresivas y las ondas estacionarias. Las ondas progresivas se propagan a una profundidad constante manteniendo su forma, mientras que las que no se propagan se denominan estacionarias.



A continuación se definirán magnitudes características.

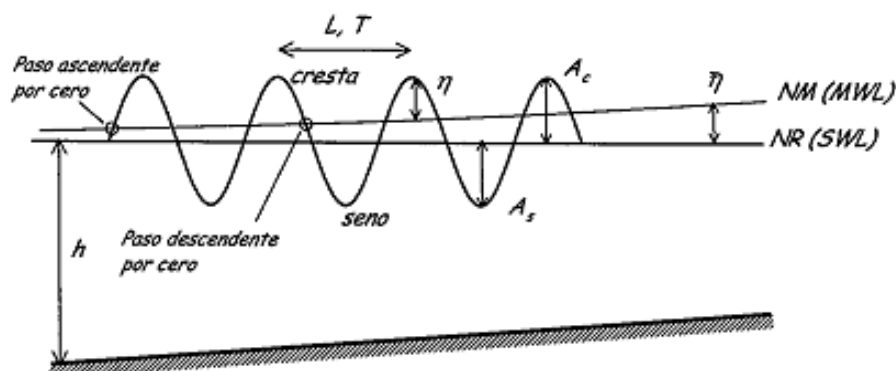


Figura 2-1 Parámetros asociados a la onda

**Desplazamiento de la superficie libre,  $\eta$ :** es el desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto a un nivel medio.

**Periodo de la onda,  $T$ :** si se observa el paso de una onda por una referencia a lo largo del tiempo, el periodo es el tiempo que transcurre hasta que se observa un punto idéntico de la superficie libre.

**Longitud de onda,  $L$ :** es la distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos sucesivos de la superficie libre.

**Cresta:** es el máximo punto que alcanza la superficie libre.

**Seno:** es el punto mínimo que alcanza la superficie libre.

**Paso por cero:** son aquellos puntos en los que la superficie libre intersecta al nivel medio de referencia.

**Altura de la onda,  $H$ :** es la distancia vertical total entre la cresta y el seno de la onda. A su vez  $H$  es igual a dos veces la amplitud de la onda.  $H=2A$ .

**Nivel de reposo,  $NR$ :** corresponde al nivel del fluido en ausencia de ondas.

**Calado o profundidad,  $h$ :** es la distancia entre el fondo y en  $NR$ .

**Número de onda,  $k$ :**

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \left(\frac{1}{m}\right)$$

**Frecuencia angular,  $\omega$ :**

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \left(\frac{1}{s}\right)$$

**Frecuencia cíclica,  $f$ :**

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hertz})$$

**Velocidad de propagación, celeridad o velocidad de fase,  $C$ :**

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

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

El objetivo común de las distintas teorías de ondas es determinar la celeridad de la onda  $C$  cuando las magnitudes  $H$ ,  $L$ ,  $h$  o  $H$ ,  $T$ ,  $h$  son conocidas. Por lo tanto, cualquier teoría de ondas puede ser caracterizada por unos parámetros adimensionales obtenidos como los cocientes de estas magnitudes representativas de las ondas. Estos parámetros son:

**Peralte de la onda,  $\varepsilon$ :**

$$\varepsilon = kA \quad \text{o} \quad \frac{H}{L} \quad \text{o} \quad kH$$

Este parámetro da la variación del movimiento vertical de la onda en una longitud de onda.

**Altura relativa de la onda,  $\delta$ :**

$$\delta = \frac{A}{h} \quad \text{o} \quad \frac{H}{h}$$

Este parámetro da una indicación de la importancia de la oscilación vertical de la onda respecto a la profundidad.

**Profundidad relativa,  $\mu$ :**

$$\mu = kh \text{ o } h/L$$

Muestra la penetración del movimiento de la onda con la profundidad.

Estos parámetros son utilizados para caracterizar el movimiento de las ondas. Solo dos de estos son independientes y por lo tanto, cualquiera de ellos puede ser expresado en función de los otros dos. Por ello, suelen emplearse los siguientes parámetros:

$$\frac{H}{gT^2} \text{ y } \frac{h}{gT^2}$$

Además para algunos de los valores de estos parámetros las ecuaciones del movimiento se pueden simplificar notablemente hasta llegar a obtener ecuaciones que pueden ser resueltas analíticamente.

## 2.3 TEORÍA LINEAL DE ONDAS.

La teoría lineal o de primer orden en el régimen de Stokes como primera aproximación al problema general de las ondas presenta múltiples ventajas:

- 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.
- 4) Al ser la solución lineal, puede utilizarse como base para encontrar otras soluciones posibles por superposición.

La forma más simple para describir una ola es considerarla una onda sinusoidal para que su perfil pueda ser descrito por una función progresiva de seno o coseno, con una amplitud (A) igual a la mitad de la altura de la ola (H). Una onda es una perturbación de la superficie libre de un fluido y como tal, puede representarse como una serie de Fourier:

$$\eta = \sum A_n \cos n(kx - \omega t)$$

Donde  $(kx - \omega t)$  es la fase de la onda. Si se mantiene únicamente el primer término de la serie, se obtiene una onda simétrica en el espacio y en el tiempo como se puede observar en la figura 1.

$$\eta(x, t) = A_1 \cos(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Dónde: H es la altura de la ola; x es el eje de propagación del oleaje; t es el tiempo;  $k = 2\pi/\lambda$  es el número de la onda;  $\lambda$  es la longitud de la ola;  $\omega = 2\pi/T$  es la frecuencia angular y T es el período de la ola.

Aunque con limitaciones a su aplicabilidad, la teoría lineal puede ser muy útil si las hipótesis de partida se cumplen:

- 1) El agua es homogénea e incompresible (lo que implica que la densidad,  $\rho$ , es constante).
- 2) La tensión superficial puede ser despreciada.
- 3) El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser asimismo despreciado.
- 4) La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- 5) El agua del mar carece de viscosidad
- 6) No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino. El flujo es irrotacional.
- 7) El fondo del mar constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- 8) La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.
- 9) Las ondas son planas (de dos dimensiones).

## 2.4 ANÁLISIS DE OLEAJE

### 2.4.1 Introducción

Se define como oleaje a los movimientos ondulatorios que experimenta la superficie del mar. En nuestro caso en particular son las ondas de gravedad generadas por el viento y que se propagan desde el área de generación perdiendo lentamente energía por fricción con la atmosfera y por

viscosidad molecular, hasta que alcanzan las costas, donde se disipan finalmente en los procesos de rotura. Una manera simple de modelizar el comportamiento del oleaje es su descomposición en una suma de trenes de ondas regulares de amplitudes, periodos y direcciones variables.

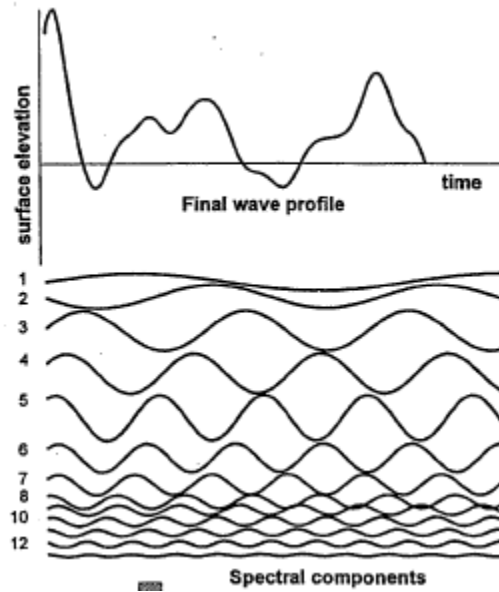


Figura 2-2 Superposición de componentes espectrales y espectro resultante.

La cantidad máxima de energía que puede existir en cada tren de ondas componentes del oleaje está regulada por los procesos de rotura y de interacción entre las mismas. Esta limitación controla el crecimiento del oleaje bajo la acción del viento, de manera que, bajo la acción de un viento constante soplando sobre una superficie ilimitada, al cabo de un determinado tiempo se alcanza un estado de equilibrio, que se denomina *Oleaje Totalmente Desarrollado*. Para desarrollarse requiere de un *Tiempo Mínimo* y de una *Distancia Mínima* (Fetch Mínimo) de acción del viento sobre la superficie libre. Si no se cumple alguna de estos requerimientos mínimos estamos en presencia de oleaje *Parcialmente Desarrollado*.

En la zona de generación del oleaje, se observa que es relativamente caótico. No se pueden establecer correlaciones entre altura y periodos sucesivos entre crestas. Las direcciones de propagación son variables en un amplio sector alrededor de la dirección del viento generador. Este oleaje recibe el nombre de *Mar de Viento*.

El oleaje se va propagando fuera de la zona de generación, donde simultáneamente se producen una serie de fenómenos de separación de los trenes de ondas componentes que se hacen más

evidentes a medida que nos alejamos de la zona de generación. Estos fenómenos son *Dispersión Radial y Dispersión Angular*.

Como consecuencia de estos fenómenos de dispersión radial y angular, el oleaje que se observa en un punto alejado del área de generación ha perdido en parte su aspecto caótico, al estar formado por trenes de ondas de periodos y direcciones parecidas. Este oleaje dispersado, más regular, que viaja a costa de su propia energía, recibe el nombre de *mar de fondo, mar tendido, mar de leva* e internacionalmente se conoce como SWELL.

#### **2.4.2 Conceptos básicos para la descripción del oleaje**

El estudio y análisis del oleaje se puede realizar mediante dos aproximaciones diferentes:

- 1) Análisis estadístico o en el dominio de la probabilidad.
- 2) Análisis espectral en el dominio de la frecuencia.

En el análisis estadístico, los parámetros del oleaje son considerados como sucesos aleatorios ordinarios. Se miden valores de un determinado parámetro que forman un juego de realizaciones aleatorias de dicha variable. Los resultados finales de esta aproximación se expresan mediante las funciones de distribución. La deficiencia que tiene este análisis es que no aporta ninguna información relativa a la dirección de propagación del oleaje.

El análisis en el 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 ondas en que se puede descomponer un registro de oleaje en función de la frecuencia y de la dirección de propagación. Aunque es más compleja complementa la información dada por el análisis estadístico. Existen dos formas de obtener la función de densidad espectral. El primer método se basa en la realización de las transformadas de Fourier de la función de autocorrelación asociada a la variable de medida de un punto. El segundo método se basa en descomponer el registro temporal en sus componentes de Fourier.

#### **2.4.3 Parámetros estadísticos de oleaje**

Lo que se pretende en la realización de un análisis estadístico de la señal es obtener una serie de parámetros que sean representativos del estado de mar y que, introducidos en las funciones de distribución teóricas permitan la definición probabilística del parámetro, así como también la recomposición, mediante simulación de una muestra temporal del proceso.

Asumimos que una variable del oleaje en un estado de mar es un proceso estacionario ergódico gaussiano, entonces dos parámetros estadísticos son suficientes para caracterizar probabilísticamente el proceso. En general se utilizan la altura de ola y el período.

Entre los parámetros estadísticos más utilizados se encuentran:

**Altura de ola significativa,  $H_s$  o  $H_{1/3}$ :** la altura de ola significativa es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar. Surgió como 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:

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

Donde  $H_i$  es la serie de alturas de ola individuales del registro, ordenada de mayor a menor 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 un registro.

**Altura de ola media cuadrática,  $H_{rms}$ :** es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola del registro:

$$H_{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2}$$

**Altura de ola máxima,  $H_{max}$ :** es la altura de ola correspondiente a la mayor ola que se encuentre en un registro de  $N$  olas.

**Periodo medio,  $T_z$ :** es la media aritmética de los periodos del registro.

**Periodo significativa,  $T_{1/3}$ :** es la media aritmética de los  $N/3$  periodos mayores del registro de  $N$  olas.

#### **2.4.4 Generalidades espectrales del oleaje**

El espectro de energía describe como la energía se distribuye sobre un rango de frecuencias y direcciones. La energía ( $m_2$  sólo  $m_2/Hz$ ) en el dominio de las frecuencias se representa por el espectro de frecuencia  $S(f)$ , mientras que la distribución de la energía en el dominio de la dirección se representa por la función de dispersión direccional  $D(f, \theta)$ .

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, 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.

En general, la forma del espectro del oleaje en un punto depende de las condiciones externas de generación de oleaje: velocidad del viento, fetch, tiempo de generación y batimetría, etc. Y de las condiciones internas: interacción no lineal entre componentes, disipación de energía por rotura o por fricción con el fondo, etc. Sin embargo la forma espectral no es arbitraria y existen algunas propiedades fundamentales que pueden aplicarse a todos los espectros de oleaje.

La energía espectral alcanza su máximo en la *frecuencia de pico*, y decrece tanto hacia las altas como hacia las bajas frecuencias. El decrecimiento desde la frecuencia de pico hacia las bajas frecuencias es generalmente, más rápido que hacia las altas frecuencias.

Además las formas espectrales presentan con frecuencia cierta regularidad, como por ejemplo regiones en las que la energía es una potencia de orden  $n$  de la frecuencia, debido a que el espectro en estas bandas de frecuencia está saturado.

El espectro de oleaje es multidireccional.

El espectro provee una buena representación del oleaje solo cuando este puede representarse correctamente mediante la superposición lineal de componentes sinusoidales.

El crecimiento del oleaje bajo la influencia del viento está limitado, principalmente, por los procesos de interacción entre componentes y por los de disipación de energía. La interacción entre componentes transfiere energía de unas bandas de frecuencia a otras.



En el análisis espectral del oleaje de mar se recurre al teorema de Fourier, que expresado de forma sencilla, 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 que sea esta, en una suma de senos y cosenos simples, en ondas de Airy. Hallando y superponiendo los espectros (líneas verticales) de cada oleaje simple, se puede hallar el espectro energético del temporal. Obviamente, este sistema es inabordable, y por ello se utilizan herramientas como la FFT (transformada rápida de Fourier).

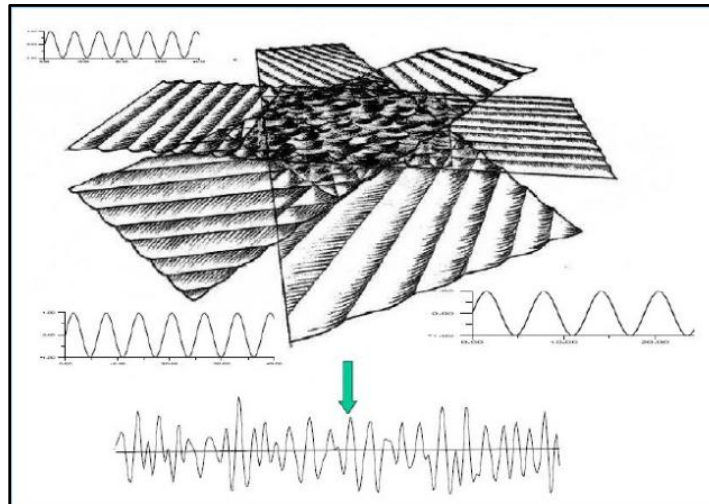


Figura 2-3 Superposición de estados del mar

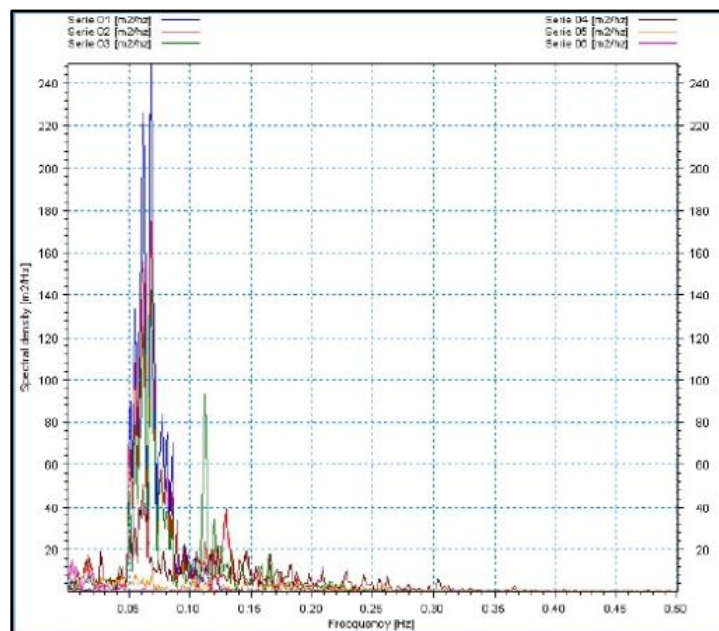


Figura 2-4 Espectros energéticos

### **2.4.5 Espectros de frecuencia más utilizados**

Para reproducir determinados estados del mar, muy comunes en zonas concretas, se han desarrollado espectros de energía teóricos que ajustan bien a las condiciones generales del mar. A continuación se describen las características más sobresalientes de los dos espectros teóricos más utilizados: el JONSWAP y el Pierson-Moskowitz.

#### ***El espectro de Pierson-Moskowitz***

Seguramente es la forma espectral más popular, propuesta para oleaje totalmente desarrollado. Ellos propusieron:

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

U es la velocidad del viento a una altura de 19.5 m. La forma del espectro está controlada solo por este parámetro. Asume que tanto el fetch como la duración del temporal son infinitos. Ello se justifica cuando el viento sopla constantemente en la misma dirección durante decenas de horas sobre un área grande.

#### ***El espectro de JONSWAP***

El espectro JOint North Sea Wave Project extiende el espectro P-M para incluir oleajes limitados por el fetch. Este espectro está basado en una extensa campaña de medidas que fueron realizadas en el Mar del Norte entre los años 1968 y 1969. En dicha campaña, se midió las características espectrales del oleaje a distancias crecientes en la zona de generación.

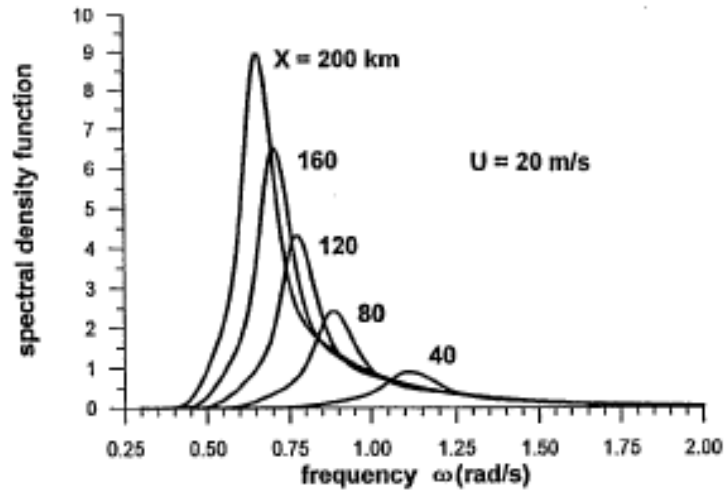


Figura 2-5 Evolución del espectro con el fetch

Después de su publicación en 1978, recibió la aprobación casi inmediata de la comunidad científica.

Se aplica a áreas que presentan un fetch limitado, y su expresión es la siguiente:

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} e^{\left[-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \gamma} e^{\left[\frac{\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2}{2\sigma^2}\right]}$$

En donde los parámetros empleados tienen la siguiente definición:

$$f_p = 3.5 \left[ \frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-0.33}$$

$$\alpha = 0.076 \left[ \frac{gF}{U_{10}^2} \right]^{-0.22}$$

$$1 \leq \gamma \leq 7$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{para } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{para } f > f_p \end{cases}$$

Donde 'fp' es la frecuencia pico, 'F' la longitud del fetch, ' $\alpha$ ' parámetro de escala, y coeficiente de apuntamiento, 'U10' velocidad del viento a 10 m. sobre el nivel del mar, g la aceleración de la gravedad ( $9.80\text{m/s}^2$ ) y  $\sigma$  es el desvío del espectro con relación a la frecuencia pico.

## 2.5 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE EN CANAL 2D

### 2.5.1 Introducción

A medida que el oleaje se acerca a la costa el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. A partir de la teoría lineal se puede deducir que una onda comienza a sentir la presencia del fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es  $h < L/2$ , donde L es la longitud de onda. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el tren de ondas u oleaje se transforma siendo varios los procesos incluidos en este proceso de transformación. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de: altura de ola, celeridad y en la dirección de propagación.

### 2.5.2 Asomeramiento

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 y en la longitud de la onda. A este proceso de transformación de la onda se lo llama *asomeramiento*.

### 2.5.3 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.

La determinación del inicio de la rotura se ha intentado explicar con diferentes modelos matemáticos. El número de Iribarren  $\xi_{op}$  o parámetro de rompientes está universalmente aceptado como controlador del tipo de rotura.

Las ondas rompen de manera diferente dependiendo de su altura, periodo y pendiente de la playa.

Donde el parámetro de Iribarren  $\xi_{op}$  se estimará 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 calculada a pie de dique y  $L_{op}$  la longitud de onda equivalente en aguas profundas.  $T_p$  es el periodo pico a pie de dique y  $N$  el número de olas.

Pueden clasificarse los procesos de rotura en los siguientes tipos:

**Decrestamiento (spilling)  $\xi_{op} = 0.2$ :** En la cresta de la ola aparecen espuma, burbujas y turbulencias y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la crestas, que se decresta formando un pequeño chorro, en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda.

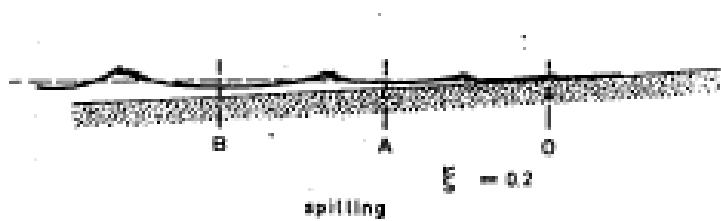


Figura 2-6 Rotura tipo decrestamiento

**Voluta (plunging)  $0.5 < \xi_{op} < 1.5$ :** 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 salto y rocío de agua.





Figura 2-7 Rotura tipo voluta

**Colapso (collapsing)**  $\xi_{op}=3$ : 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.

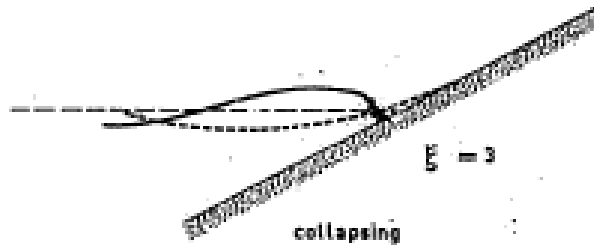


Figura 2-8 Rotura tipo colapso

**Oscilación (surging)**  $\xi_{op}=5$ : 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.

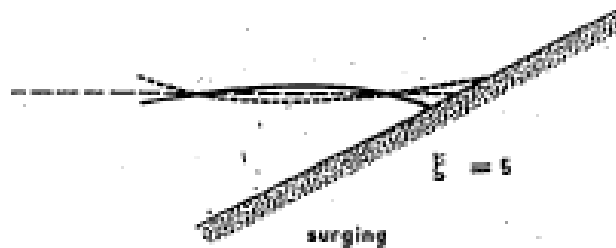


Figura 2-9 Rotura tipo oscilación

#### 2.5.4 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.

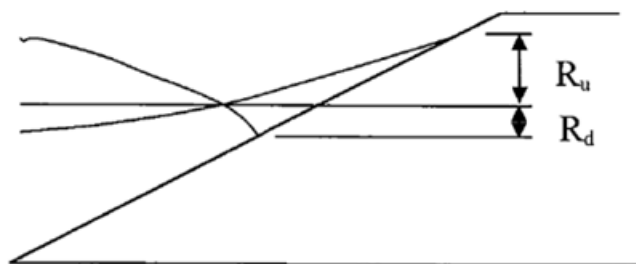


Figura 2-10 Esquema Run Up- Run Down

**Rebase:** Es el caudal medio de agua en un periodo del oleaje que supera una sección de longitud unidad en la coronación de la estructura.

Cuando un tren regular de ondas incide sobre una pared vertical impermeable, se produce la reflexión total de las mismas. El sistema estacionario resultante tiene siempre un antinodo en la pared vertical. Si la amplitud del tren de ondas incidente es pequeña, la amplitud del ascenso es igual a la del descenso, e igual a la altura de ola en el tren incidente. En el caso de que la amplitud del oleaje incidente no sea pequeña, los efectos no lineales son importantes y la predicción del ascenso-descenso debe hacerse mediante teoría no lineal de ondas o por métodos numéricos no lineales.

A modo sintético podemos decir que solo será posible determinar analíticamente las características del flujo en el paramento exterior de diques verticales impermeables cuando el oleaje alcanza la estructura sin romper y no existe rebase sobre la estructura. En los demás casos (rotura frente al dique, rebase, diques porosos, etc.), será necesario recurrir a modelos numéricos que deberán ser tarados con datos medidos.

Esta limitación en las posibilidades de determinación de flujo sobre diques verticales ha hecho que la mayoría de la experimentación en modelos realizada se haya concentrado en la determinación de formulaciones empíricas que permitan la determinación de las dos variables funcionales más importantes: el caudal de rebase y la transmisión de oleaje.

### **2.5.5 Reflexión**

La onda medida que se aproxima a la costa es susceptible a verse transformada por la reflexión que tiene lugar en estructuras naturales y artificiales. La reflexión en playas, acantilados y diques puede cambiar por completo el campo de ondas inducido por las ondas incidentes. La reflexión puede dar lugar a desplazamientos en la zona de rotura, cambios en el nivel de disipación en la playa, etc. Es de suma importancia determinar el campo de ondas existentes frente a una estructura reflejante natural o artificial, si se desea determinar adecuadamente los flujos en sus proximidades.

## **CAPÍTULO 3: RUN UP SOBRE ESTRUCTURAS**

---

### **3.1 CONCEPTOS GENERALES**

El máximo Run Up por oleaje es un valor crítico para el diseño de numerosas obras hidráulicas, ya que el mismo nos define la altura de revancha de nuestra obra. La exactitud con la que se estime el ascenso vertical nos permitirá diseñar una obra más segura y con mayor eficiencia económica. Por ejemplo, el límite superior del Run Up esperado nos determina la cota de elevación de la cresta de nuestra estructura, diseñada para que el agua no la rebase. Sobreestimar el Run Up puede significar un notable aumento en los costos de nuestra obra. Y por el contrario el rebase de la represa puede derivar en daños estructurales, daños en maquinaria y equipamiento, daños a las personas, etc.

La capacidad de predicción de este parámetro ha ido evolucionando desde año 1950. Sin embargo el entendimiento actual de los fenómenos relacionados a la transformación del oleaje, distan de ser procesos altamente conocidos. A continuación se detallará una breve reseña de las modificaciones que ha ido sufriendo el cálculo del Run Up a lo largo de la historia.



### 3.1.1 Cálculo de Run Up en Oleaje Regular

Investigadores como Granthem (1953), Saville (1955, 1956, 1958) y Savage (1958) midieron el Run Up causado por trenes de olas regulares que impactaban sobre distintos tipos de superficies: suaves, rugosas y de diferentes pendientes. El resultado fue que el Run Up era una función de varios parámetros del oleaje y de la estructura. Sin embargo ninguna fórmula fue emitida. Recién en el año 1961 una guía del cuerpo de ingenieros la "Shore Protection Manual" expuso unos nomogramas que fueron utilizados para el cálculo del Run Up por alrededor de 20 años.

Las primeras fórmulas para la estimación del Run Up por oleaje regular fueron realizadas por Hunt en el año 1959. Curiosamente, este ingeniero era un mayor del cuerpo de ingenieros de la armada estadounidense, pero sus descubrimientos no fueron publicados. Huntre conocía que diferentes fórmulas debieran necesitarse para diferenciar entre olas no rotas y olas con distintos tipos de rotura.

Para olas tipo "surging" en pendientes planas e impermeables Hunt recomendaba:

$$\frac{R}{H} \approx 3$$

Donde R es el máximo ascenso vertical desde el nivel en reposo (SWL) y H es la altura de ola. El análisis que Hunt realizó para el caso de olas rompiendo sobre la pendiente resulto en una ecuación dimensionalmente no homogénea:

$$\frac{R}{H} = 2.3 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/T^2}}$$

T es el periodo y  $\alpha$  es el ángulo de pendiente de la estructura.

Para expresarla dimensionalmente homogénea, introducimos la gravedad a la ecuación y queda:

$$\frac{R}{H} = 1.0 \frac{\tan \alpha}{\frac{H}{Lo}} \quad \text{or} \quad \frac{R}{H} = 1.0 \xi_o$$

$\xi_o$  es el número de Iribaren. Este parámetro es calculado con la altura de ola en las cercanías del pie de dique.

### 3.1.2 Cálculo de Run Up en Oleaje Irregular

Los anteriores análisis de Run Up debido a oleaje regular no nos brindan resultados realistas al hablar de oleaje irregular (carácter natural de los estados de mar). El entendimiento sobre fenómenos en oleaje irregular es citado en las ediciones de 1977 y 1984 del SPM (Shore Protection Manual). Basándose en publicaciones anteriores que sugerían que el Run Up debido a oleaje irregular generado por el viento tiene una distribución de Rayleigh, el SPM propone una distribución acumulada de Rayleigh para estimar el Run Up dado por:

$$\frac{R_p}{R_s} = \left( -\frac{\ln P}{2} \right)^2$$

Donde P es la probabilidad de rebase,  $R_p$  es el ascenso asociado a P y  $R_s$  es el Run Up significativo. En otras palabras, El Run Up excedido por el 2% de los Run Ups puede estimarse con  $P=0.02$  y denotado como  $R_{0.02}$ .

En Holanda durante muchos años utilizaron la fórmula dada por Wassing (1957):

$$R_{u2\%} = 8H_{1/3} \tan \alpha$$

$R_{u2\%}$  es el ascenso vertical desde el SWL excedido por el 2% de los Run Ups y  $H_{1/3}$  es la altura de ola significativa (el 1/3 mayor) en el pie de la estructura. Esta fórmula es válida para pendientes con  $\tan \alpha < 1/3$ .

Battjes (1974) demostraba como la fórmula de Hunt podía ser aplicada a olas irregulares rompiendo:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{1/3}} = C_m \xi_o$$

El coeficiente  $C_m$  varía desde 1.49 para oleaje completamente desarrollado hasta 1.87 para oleajes en etapas iniciales de desarrollo. Distintos autores proponen distintos valores para el coeficiente  $C_m$  según distintas características de oleaje y de la pendiente.

### 3.3 FORMULACIONES PARA ESTIMAR EL RUN UP

Las formulaciones existentes en la actualidad sirven para obtener un valor en primera aproximación, debido a que han sido obtenidas mediante ensayos de laboratorio para estudiar en su mayoría procesos marítimos sobre taludes de estructuras costeras de pendientes y materiales normalmente diferentes a los que habitualmente se diseñan para las presas. Por lo tanto, es escasa la información sobre oleajes en taludes muy empinados típicos de las presas.

En lo que respecta a las formulaciones utilizadas para estimar el Run Up en este trabajo se utilizaron tres. Las mismas se adecuan tanto a la pendiente de la presa, como al material impermeable que la constituye. Las formulaciones son:

- 1) Formulación del CEM (2002) correspondiente a Burcharth y Hughes.
- 2) Formulación de Hughes (2004).
- 3) Formulación de Eurotop (2007).

#### 3.3.1 Formulación del CEM (2002) Burcharth y Hughes

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

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

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{mo}} = 1.6 \quad \text{for } \xi_{op} \leq 2.5$$

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

Prácticamente, la mayoría de las formulaciones que se utilizan para estimar el Run Up son dadas en términos del Número de Iribarren ( $\xi$ ), usando la altura de ola local.

#### 3.3.2 Formulación de Hughes (2004)

Debido al mal ajuste de las formulaciones para oleaje que no rompe (que incluye también oleajes que “rompen” por surging/colapsing) y para oleaje que incide en fuertes pendientes, el autor definió un nuevo método basado en el Flujo de Momento del oleaje MF.

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 ecuación empírica que estima el mismo. Las ecuaciones necesarias fueron las siguientes.

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

Siendo

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

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

$\rho$  es la densidad del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad. El autor recomienda utilizar  $H_{m0}$  y  $T_p$  para oleaje irregular.

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

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

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

### 3.3.3 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 el 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

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.0\gamma_b\gamma_f\gamma_\beta \left( 4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right)$$

Donde  $\gamma_b$  es el factor de berma,  $\gamma_f$  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:

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

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

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

Al igual que en la primer formulación, el valor de Run Up varía linealmente con relación al Número de Iribarren ( $\xi$ ) 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 se adjunta una figura con los valores que se utilizan.

Reference type	$\gamma_f$
Concrete	1.0
Asphalt	1.0
Closed concrete blocks	1.0
Grass	1.0
Basalt	0.90
Small blocks over 1/25 of surface	0.85
Small blocks over 1/9 of surface	0.80
¾ of stone setting 10 cm higher	0.90
Ribs (optimum dimensions)	0.75

**Figura 3-1 Factores de rugosidades superficiales para materiales típicos**

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. En nuestro caso experimental el ángulo de ataque era perpendicular al eje longitudinal del dique por lo tanto este valor es la unidad.

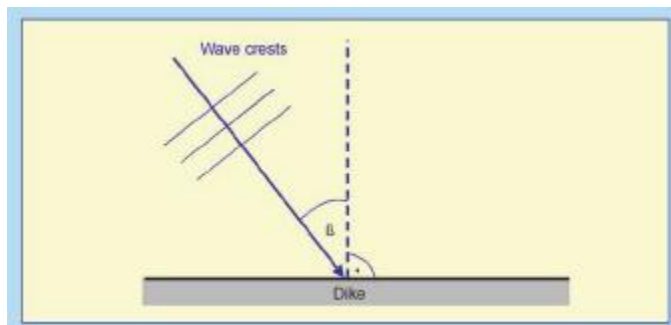


Figura 3-2 Definición del ángulo de ataque

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.

### 3.4 Medición real del RUN UP

La medición de la altura ascenso descenso real sobre la estructura modelo se realizó mediante técnica de video digital. Se montó una cámara digital de alta definición de manera tal que pueda tenerse en el plano de la cámara toda la estructura en contacto con la superficie de agua del canal. Se realizaron filmaciones de los ensayos de 1000 olas, luego estos videos fueron procesados en el programa RIVER (Patalano, 2015) el cual una vez calibrado arroja los valores máximos y mínimos de ascenso descenso que el pelo de agua tomaba sobre la estructura. Estos valores en bruto deben ser procesados nuevamente mediante la técnica "Zero Crossing" para poder tener valores de ascenso correctamente medidos y calibrados. Esta técnica computacional de procesamiento de datos proveyó los valores finales de Run Up sobre el paramento. Básicamente lo que realiza es un análisis de series de tiempo, determinando hasta qué punto la superficie del agua se extiende por encima del nivel medio de agua.

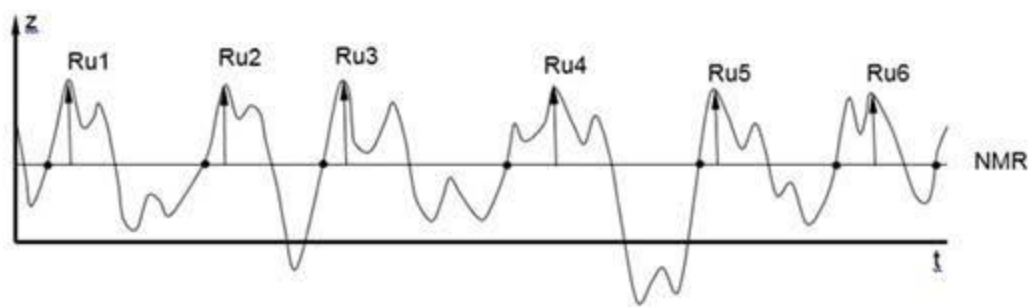


Figura 3-3 Análisis de serie de datos mediante la técnica "Zero Crossing"

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La elección del modelo físico depende de diferentes características del proyecto y del sitio de implantación del modelo entre las que podemos nombrar:

- Los objetivos del modelo.
- El diseño propuesto de la estructura (secciones típicas, diseños de detalle, materiales, etc.)
- Los detalles batimétricos y de las direcciones de acercamiento del oleaje.
- Los parámetros ambientales de diseño: alturas de olas, períodos, niveles de agua, espectros del oleaje y direcciones de propagación.
- Comportamientos característicos de la estructura: máximo nivel de daño tolerado, máximo nivel de ascenso y descenso, valores del rebase y niveles de aguas que se alcanzan.
- Todos los parámetros relacionados con el propósito y funcionamiento de la estructura, como la secuencia constructiva, tolerancias y especificaciones del sitio de emplazamiento.
- Todos estos parámetros deben de ser considerados para determinar el tamaño del modelo requerido, la escala, y los límites de funcionamiento de la pala mecánica generadora del oleaje.

La elección y la definición del modelo se deben hacer casi de forma paralela a la elección de la escala del mismo. En particular, la correcta definición de la escala se realiza considerando los siguientes aspectos:

- La experiencia pasada obtenida realizando otros modelos similares.
- Las condiciones de diseño, los niveles de agua comparados con la potencialidad de la pala generadora y las dimensiones del canal de oleaje o de la piscina.
- La batimetría en prototipo.
- El área de estudio comparada con las dimensiones del laboratorio o instalaciones.
- Rangos de los parámetros a considerar en el modelo.
- Resolución requerida en las mediciones.
- Verificar funcionamiento en régimen turbulento o viscoso (calcular número de  $Re > 30000$ ).
- Disponibilidad de las instalaciones, capacidad de cisternas, caudales de las bombas, etc.
- Requerimientos contractuales y disponibilidad económica.

Normalmente se elige un rango de escalas aplicables tal que se mantenga la similitud de Froude y luego se refina la elección en concordancia con los requerimientos enunciados, tratando siempre de que la escala sea lo más grande posible. Generalmente se realizan modelos a pequeñas escala, pero dependiendo del fenómeno de estudiar se pueden necesitar escalas más grandes ( $>1:10$ ) para reproducir con precisión las fuerzas actuantes y la respuesta del modelo.

La escala de longitudes del modelo se determina con el cumplimiento de la similitud geométrica, cinemática y dinámica. La similitud geométrica se cumple cuando todas las longitudes geométricas en el prototipo ( $L_p$ ) mantienen una relación constante con las correspondientes longitudes en el modelo ( $L_m$ ), tal que:  $N_L = L_p/L_m$ . La similitud cinemática establece que los fenómenos que dependen del tiempo en el modelo conservan una relación constante en el tiempo con los fenómenos en prototipo ( $N_T = t_p/t_m$ ). La similitud dinámica establece que las relaciones entre las fuerzas en prototipo y el modelo se mantienen constantes ( $N_F = F_p/F_m$ ). La similitud dinámica implica el cumplimiento de las similitudes geométricas y cinemáticas.

En modelos físicos de oleaje, normalmente el cumplimiento de la similitud dinámica se obtiene adoptando la similitud de Froude donde la gravedad tiende a equilibrar las fuerzas de inercia. Debido a la preponderancia de las fuerzas de gravedad no es necesario tener en cuenta la acción



de otras fuerzas como las viscosas, de tensión superficial, fuerzas elásticas, etc. La elección de la escala de trabajo para el estudio del Run Up es la resultante de considerar factores como:

- Condiciones de diseño del oleaje, ajustándolos a las dimensiones del canal y a la capacidad del generador de oleaje.
- Niveles de Run Up a medir para que no haya rebase por encima de la estructura.
- Resolución requerida de las mediciones y capacidad instrumental.
- Experiencia propia del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba con modelos físicos hidráulicos de más de cuatro décadas.

Una vez definida la máxima escala posible para el modelo se ha procedido a estimar los *efectos de escala y de laboratorio*. Los efectos de escala son los efectos no deseados que aparecen por haber reducido el prototipo a una determinada escala geométrica. Como consecuencia de esta reducción empiezan a tener efectos otras fuerzas (viscosas, tensión superficial, etc). Los efectos de laboratorio son los efectos no deseados debido a que el fenómeno natural se reproduce en un laboratorio donde se introducen perturbaciones en los procesos simulados debido a la presencia de los contornos, de los instrumentos y de las instalaciones en general.

En el caso a estudiar, las características del flujo aseguran que la viscosidad es despreciable en la capa límite, manteniéndose siempre en condiciones de flujo totalmente turbulento.

- El efecto de la tensión superficial se desprecia para niveles de agua superiores a 2 cm (Vergara, 1995).
- Los efectos de la rugosidad del fondo se consideran despreciables: utilizando la metodología de Keulegan (1950) se aprecia una disminución de la altura de ola, a lo largo del canal, del orden de  $10^{-4}$  m.

## **4.2 EL CANAL DE OLEAJE DEL LH**

Desde comienzos del año 2009, el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC), puso en marcha un nuevo canal de oleaje equipado de un generador bidimensional con absorción dinámica, de características únicas en Argentina. Las capacidades de generación del mismo permiten simular curvas teóricas de oleaje regular e irregular con periodos y amplitudes

predeterminadas (espectros de olas del tipo JONSWAP, PiersonMoskowitz, función Phillips, entre otras).

Para poner en funcionamiento el generador de oleaje fue necesario acondicionar el existente Canal de Pendiente Variable de 14 m de longitud, 0.6 m de altura y 0.5 m de ancho para llevarlo a sus nuevas dimensiones: 23.5 m de largo, 0.8 m de altura y 0.5 m de ancho. Este canal vidriado puede cumplir dos funciones, tanto como canal de pendiente variable como canal de oleaje.

Esta nueva adquisición en el Laboratorio de Hidráulica (LH), permite al grupo de investigadores del mismo, alcanzar una mejor comprensión de los procesos hidrodinámicos de los flujos turbulentos complejos, necesaria y de gran utilidad para realizar un manejo apropiado de los ambientes marítimos, teniendo como campo directo de aplicación el correcto diseño de estructuras hidráulicas, asistiendo a la toma de medidas correctivas en sistemas naturales sometidos a procesos erosivos o de sedimentación, contribuyendo, así, al manejo ambientalmente sustentable de los recursos.



Figura 4-1 Canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la UNC.

Este 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. Este tren de ondas es conocido como oleaje de viento (*windwaves*). También se pueden generar 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 a ola. Los trenes de ondas que se pueden generar, se corresponden a espectros de energía típicos de la naturaleza (JONSWAP, PiersonMoskowitz,

función Phillips, entre otras) o a series temporales medidas directamente por una boya de oleaje en el mar.

Una característica muy importante de este generador es que cuenta con un Sistema de Absorción Dinámica, es decir que permite corregir el oleaje generado, restándole las interferencias u ondas parásitas que se producen en el canal por reflexión en estructuras o en la playa ubicada actualmente al final del canal. Las olas generadas en el canal son controladas por el programa computacional HP Wavemaker. (HR Wallingford, 2008 y 2009).



**Figura 4-2 Generador de oleaje**

Existen ciertas limitaciones relacionadas con la altura máxima de rompimiento de la ola, factible de alcanzar con el desplazamiento máximo del pistón, velocidad y fuerza disponible. Para este instrumento, los valores límites son los siguientes:

- Máxima altura de ola: 0.36 m
- Máximo Desplazamiento:  $S = 0.80$  m
- Máxima Velocidad:  $U = 0.70$  m/s
- Máxima Fuerza:  $F = 1.50$  kN
- Máxima Potencia: 0.305 Kw

El canal cuenta con 8 sensores resistivos utilizados para medir el nivel de agua sobre posiciones determinadas del canal. Estos están conformados con dos varillas metálicas unidas en forma paralela, en el extremo inferior se tiene un aislante, y en la superior un conductor, conectado con un cable a una terminal. El sistema se basa en la respuesta lineal de la corriente a la longitud de la sección de las varillas por la que circula (aumentando la corriente mientras más sumergido está el sensor). La elevación del agua respecto al nivel de la superficie en reposo, se puede medir

indirectamente, a través del voltaje de salida en que es convertida la corriente en cada sensor. El límite de resolución de los sensores es, en general 0.20 mm en vertical.



Figura 4-3 Sensor resistivo

### 4.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología que se describirá a continuación es la utilizada en la *FASE 1* de trabajo. Las distintas actividades desarrolladas se agrupan y explican en los títulos a continuación:

Tabla 4-1 Metodología de trabajo

TAREAS DESARROLLADAS
1-Pruebas de capacidad y generacion de oleaje
2-Determinación de las combinaciones Hs-Tp a pie de dique
3-Calibración de la absorción dinámica
4-Realización de los ensayos finales

#### 4.3.1 Pruebas de capacidad y generación de oleaje (con playa disipativa) y pruebas de escala

En esta etapa del trabajo se ha definido la máxima escala posible y los ensayos se han realizado con la playa disipativa, es decir sin introducir la estructura en el canal. La playa disipativa, como su nombre lo indica absorbe la mayor parte de la energía debida al oleaje. De esta manera nos

encontramos con oleajes prácticamente sin interferencias de ondas parásitas o reflejadas. Esta condición será de suma importancia al momento de calibrar la absorción dinámica de la pala generadora de oleaje, debido a que la finalidad de esta función es eliminar las interferencias u ondas parásitas que se producen en el canal por reflexión en estructuras.

El objetivo ha sido comprobar la correcta circulación de oleajes cercanos a las condiciones de "prediseño". En este caso se estimó el valor máximo de Run Up para verificar la escala de ensayo.

Desde el Instituto Nacional del Agua (INA) se propusieron dos posibles escenarios de oleaje a representar en el canal, correspondientes a situaciones de oleaje en la presa prototipo ya determinados por ellos. Las condiciones de prediseño antes mencionadas son:

**Tabla 4-2 Escenarios propuestos por el INA**

<b>Escenario 1:</b>
Tirante de agua =27,10 m
Altura de ola Hs= 3,10 m
Período de pico espectral Tp=5,3 s
<b>Escenario 2</b>
Tirante de agua =28,10 m
Altura de ola Hs= 2,30 m
Período de pico espectral Tp=4,8 s

Se observa que en el escenario 1 el oleaje tiene mayor Hs y Tp, por lo tanto se comenzó con este para realizar las primeras pruebas. Se adoptó en primera instancia una escala de 1:45, siendo factores determinantes a la hora de determinar la misma: la geometría propia del canal y la altura de ola significativa y la capacidad de la pala generadora. Los valores obtenidos para el modelo son los siguientes:

**Tabla 4-3 Valores obtenidos para el modelo**

<b>ESCENARIO 1</b>		<b>Escala =</b>	<b>45</b>	<b>Valores en modelo</b>	
<b>Valores en prototipo</b>					
<b>h =</b>	<b>27.1</b>	<b>m</b>	<b>====&gt;</b>	<b>0.60</b>	<b>m</b>
<b>Hs =</b>	<b>3.1</b>	<b>m</b>	<b>====&gt;</b>	<b>0.07</b>	<b>m</b>
<b>Tp =</b>	<b>5.3</b>	<b>s</b>	<b>====&gt;</b>	<b>0.79</b>	<b>s</b>

Se ingresaron estos valores en el programa generador de oleaje. La pala tuvo un funcionamiento errático para esas condiciones. Por lo tanto se procedió a buscar el valor crítico que generaba este mal comportamiento. Se comprobó en sucesivas pruebas que valores de periodos menores a  $T_p < 1$  segundo presentaban problemas a la hora de simularlos.

Se probaron diferentes escalas para evaluar la posibilidad de realizar simulaciones a escalas lo suficientemente pequeñas para una correcta generación de oleajes cercanos a las condiciones de "prediseño". En efecto a menores escalas, aumentan los períodos en modelos y se mejora el movimiento de la paleta mecánica. Esta fase ha permitido establecer los funcionamientos de la paleta generadora del oleaje para las condiciones de "prediseño".

Se determinaron las siguientes características en modelo:

**Tabla 4-4 Rango de valores utilizados en los ensayos de prueba**

<b>Hs (m)</b>	<b>Tp (s)</b>	<b>h (m)</b>	<b>Escala</b>
<b>0.05 – 0.12</b>	<b>1.00 – 1.45</b>	<b>0.51 – 0.60</b>	<b>1:30 – 1:45</b>

La escala 1:45 con una profundidad de 0.60 m permite que los oleajes seleccionados se propaguen en condición de aguas profundas, mientras que la elección de escalas mayores cambian la condición de propagación a aguas intermedias, aunque se permite generar oleajes más grandes. En definitiva, una escala mayor permite realizar ensayos con oleajes más grandes pero con la desventaja de tener que reducir los calados (o tirantes de agua) con respecto a los valores en prototipo y con la consecuencia de cambiar la forma de propagarse del oleaje.

#### **4.3.2 Determinación de la combinación (Hs-Tp) a pie de dique**

Una vez obtenidas distintas condiciones de oleajes sin la estructura en el canal, se procedió a determinar las combinaciones de oleajes irregulares que íbamos a simular con la estructura instalada para calcular y medir efectivamente el Run Up.

Como se dijo anteriormente desde el INA se propusieron dos escenarios posibles (con distintos h, hs, Tp). El problema surgió en la dificultad de simular exactamente esos valores en el laboratorio. Es por ello que se comunicó al instituto que se realizarían ensayos varios en el rango de los escenarios dados.

Este procedimiento ha permitido verificar las alturas efectivas del Run Up sobre la estructura (evitando que haya rebase) y verificar que las alturas totales, suma del oleaje incidente y reflejado, quedaran confinadas en el canal, debido al incremento en la altura de ola por los altos valores de reflexión de la estructura, del orden del 70%.

Se definieron entonces los dos escenarios posibles a ensayar, fueron enviados al INA para que determinase si eran correctos. Una vez aprobado los mismos se procedió a la realización de las pruebas.

Ambos escenarios quedan diferenciados por su Periodo de Pico ( $T_p$ ) y en ellos se realizarán ensayos con las mismas alturas de ola significativa ( $H_s$ ).

#### **4.3.3 Calibración de la absorción dinámica**

En esta etapa se busca calibrar la absorción dinámica. Recordemos que la absorción dinámica funciona para corregir el oleaje generado, restándole las interferencias u ondas parásitas que se producen en el canal por reflexión en estructuras o en la playa ubicada actualmente al final del canal.

El procedimiento de calibración se realizó de la siguiente manera. Una vez seleccionados valores de  $h$ ,  $h_s$  y  $T_p$ , se obtuvieron mediciones de oleaje en el canal solo con la playa absorbente. Es necesario recordar que la playa absorbente fue diseñada con el objetivo de amortiguar completamente el oleaje al llegar a la misma. Por lo tanto las mediciones realizadas sobre esta configuración de ensayo dan valores de oleaje con muy poca interferencia. La calibración ha consistido en la búsqueda de la ganancia óptima de la absorción que permitiera obtener a pie de dique valores de la señal incidente a pie de dique (después de haber separado la ola incidente de la reflejada) que fuera equivalente a los valores a pie de dique de la señal incidente obtenidos con la playa disipativa (con valores de reflexión inferiores al 5%), en este caso no se necesitó el tratamiento de datos para separar la ola incidente de la reflejada.

En la Figura 4-4 se resume el procedimiento: ingresando las mismas condiciones de oleaje a la pala generadora,  $(H_s, T_p)_1$ , la absorción dinámica permite encontrar a pie de dique los mismos valores del oleaje incidente  $(H_s, T_p)_2$  para: (a) una geometría con la playa absorbente y (b) una geometría con la estructura.

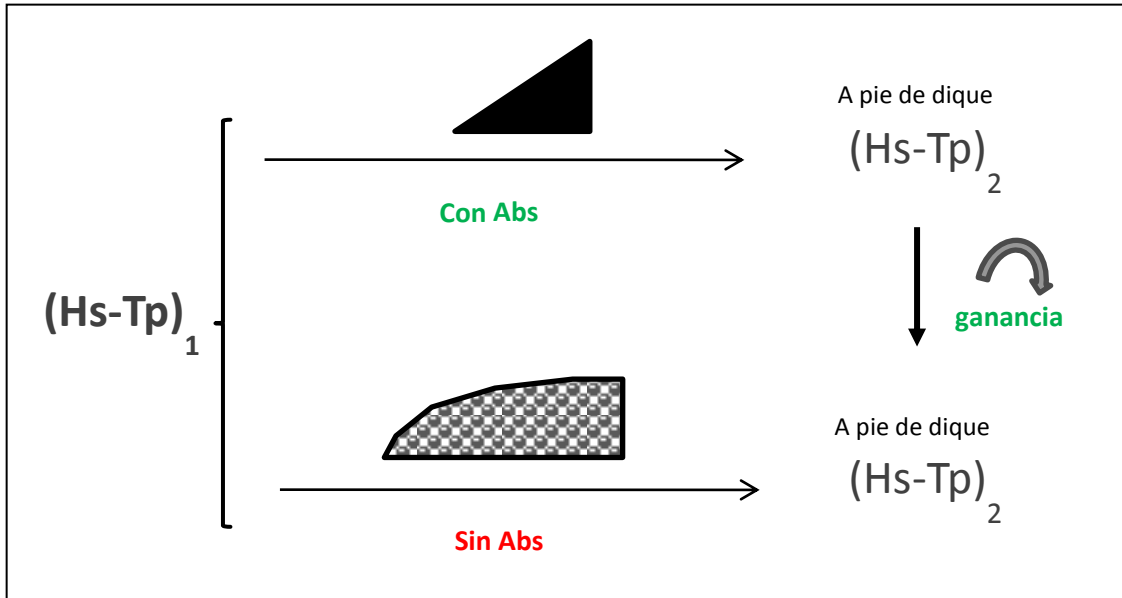


Figura 4-4 Esquema del proceso de calibración de la absorción dinámica

De esta forma se pudo realizar la calibración de la absorción dinámica hasta obtener una señal de oleaje incidente equivalente al oleaje incidente con la playa disipativa. En la Tabla 4-5 se presentan los resultados de los parámetros obtenidos. En la Figura 4-5 se muestra un ejemplo de superposición de señales de los oleajes incidentes con la absorción dinámica y con playa disipativa.



Tabla 4-5 Valores de los parámetros Hs y Tp con playa disipativa y con estructura y absorción dinámica activada.

<i>Ensayo</i>		<i>Con Playa disipativa</i>		<i>Con Absorción</i>	
$H_{s,pala}$ (m)	$T_{p,pala}$ (s)	$H_{s,pie,pd}$ (m)	$T_{p,pie,pd}$ (s)	$H_{s,pie^*}$ (m)	$T_{p,pie^*}$ (s)
0.03	1.1	0.022	1.09	0.021	1.08
0.04	1.1	0.03	1.08	0.029	1.08
0.05	1.1	0.037	1.1	0.037	1.09
0.06	1.1	0.044	1.09	0.044	1.09
0.07	1.1	0.052	1.09	0.052	1.08
0.08	1.1	0.06	1.09	0.059	1.08
0.09	1.1	0.067	1.09	0.065	1.08
0.03	1.3	0.021	1.23	0.022	1.28
0.04	1.3	0.029	1.3	0.03	1.28
0.05	1.3	0.037	1.28	0.04	1.28
0.06	1.3	0.046	1.28	0.045	1.28
0.07	1.3	0.052	1.28	0.053	1.28
0.08	1.3	0.06	1.3	0.06	1.28
0.09	1.3	0.068	1.35	0.067	1.28

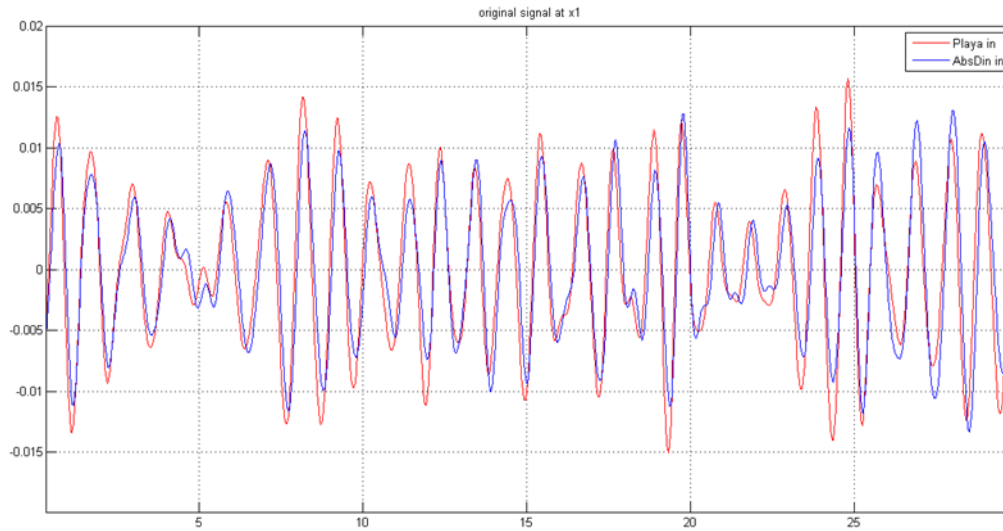


Figura 4-5 Superposición de una señal de ola incidente con playa disipativa y otra con absorción dinámica activada

#### 4.3.4 Diseño de los ensayos finales

Finalmente se realizaron los ensayos finales, donde se midieron los parámetros del oleaje generado y mediante técnica de video se obtuvieron los valores del Run Up 2%.

Los ensayos tienen un mismo periodo de pico y la misma altura de calado del canal,  $T_p=1.1\text{seg}$  y  $H=0.60\text{m}$  para una escala de 1:45. La tabla a continuación resume los parámetros enviados a la pala generadora de oleaje:

Tabla 4-6 Parámetros de los ensayos realizados.

FASE	Ensayo	Señal a la pala	
		Hs	Tp
FASE 1 Puntos 1-4 (T1)	Test_P08	0.03	1.1
	Test_P06	0.04	1.1
	Test_P07	0.05	1.1
	Test_P09	0.06	1.1
	Test_P10	0.03	1.1
	Test_P11	0.04	1.1
	Test_P12	0.05	1.1
	Test_P13	0.06	1.1

Puede observarse que se realizaron ensayos con cuatro alturas significativas, y su correspondiente repetición. En esta fase de trabajo no se activó la absorción dinámica, pero estos mismos ensayos serán repetidos con la absorción dinámica en las fases siguientes de experimentación.

#### 4.4 ESTRUCTURA DE ENSAYO

Sobre el modelo físico se realizaron diversas experimentaciones. La configuración final de estas experiencias fue el resultado de distintas tareas llevadas a cabo en el desarrollo de la práctica supervisada.

Se detallaran a continuación las distintas actividades que se realizaron:

Tabla 4-7 Estructura de ensayo

<b>TAREAS DESARROLLADAS</b>
<b>1-Diseño y construcción de playa absorbente</b>
<b>2-Construcción de la estructura</b>
<b>3-Configuración de los ensayos</b>

#### 4.4.1 Diseño y construcción de playa absorbente

En la extremidad final del canal se ha diseñado y construido una playa de absorción pasiva en piedras. Las formas de playas pasivas en piedras comúnmente utilizadas son: (i) rectas de una pendiente suave, (ii) de dos tramos rectos con diferente pendiente siendo el primero (desde la llegada del oleaje) más pronunciado y el segundo más suave; (iii) parabólicas. Un buen sistema de absorción debe de tener buena absorción para diferentes peraltes del oleaje ("BulkReflection" <10%). En otros trabajos realizados en el Laboratorio de Hidráulica, se han experimentado diferentes geometrías, llegando a determinar que la mejor absorción se verificaba (como era de esperar) para una playa de tipo parabólico.

El diseño de una rampa sin reflexión se basa en que el cambio de las propiedades de la onda al propagarse sobre un fondo de profundidad variable debe ser suficientemente suave como para que se mantenga, localmente, la hipótesis en la que se basan las teorías de onda de forma constante, que asumen fondo horizontal.

Un parámetro adecuado para medir el grado de suavidad de un fondo con respecto a la onda es la relación entre el incremento de profundidad en una longitud de onda y dicha profundidad. La pendiente será suave si dicho parámetro se mantiene pequeño:

$$\delta = \frac{\Delta h_L}{h} = \frac{|n_x|L}{h} \ll 1$$

Donde  $n_x$  es la pendiente del fondo,  $L$  la longitud de onda y  $h$  la profundidad. Investigaciones teóricas de Rosseau (1952) y Ogawa y Yoshida (1959), sugieren que cuando el parámetro  $\delta$  anterior es del orden de la unidad, la energía reflejada será menor del 0.1%, correspondiente, aproximadamente a un coeficiente de reflexión de alrededor del 3%.

La ecuación diferencial anterior puede ser resuelta analíticamente en profundidades reducidas, es decir, cuando  $L=T*(gh)^{0.5}$ , con la condición de  $h=0$  para  $x=0$ , obteniéndose:

$$h = \frac{\delta^2}{4T^2 g} x^2 = Ax^2$$

Es decir, es una parábola con tangente horizontal en  $x=0$ ,  $h=0$ . Como puede verse, la parábola depende del período del oleaje, de manera que, para una profundidad de agua en el canal constante, la distancia  $x$  a la que se corta el fondo horizontal del canal aumenta al aumentar el período.

Si la rampa es impermeable, el oleaje rompe en voluta o descrestamiento, disipándose en la rampa con una gran efectividad, debido a que la pendiente de la rampa se hace prácticamente horizontal en las proximidades del nivel medio.

Si la rampa es porosa, la disipación debida al flujo en el medio poroso hace que el asomeramiento sobre la rampa porosa sea muy inferior al asomeramiento con fondo impermeable, de manera que se produce una disminución de la altura de ola sobre la misma. Esta disminución de altura de ola por la disipación en el medio poroso puede llegar a ser tal que haga que el oleaje se disipe sin romper. Además, el fondo poroso permite aumentar el valor de  $A$  que determina una reflexión fija.

Otra consideración a tener en cuenta es que la disipación sobre la rampa (tanto por rotura como por disipación en el medio poroso), provoca una sobre elevación del nivel medio, máxima al final de la rampa. Por ello, el origen de la rampa debe situarse ligeramente por encima del nivel medio. De esta manera, para una rampa parabólica de grava y para una profundidad de agua de 0.5 m, capaz de soportar sin movimiento de las piedras olas de hasta 30 cm de altura, se obtuvieron las siguientes dimensiones, teniendo en cuenta de las reducidas dimensiones del canal a disposición:

- Longitud de la parábola: 3.5 m
- Profundidad en el fondo del canal: 0.60 m
- Tamaño de la piedra: 0.025 – 0.035 m

Con estas dimensiones, el parámetro  $A$  de la parábola resultó  $A=0.0306$ . La playa parabólica final se muestra en la Figura 4-6



**Figura 4-6 Playa absorbente instalada**

#### **4.4.2 Construcción de la estructura**

La estructura es una de las partes principales del modelo físico de la represa ya que vendría a representar el talud de la presa aguas arriba. El mismo se construyó en el laboratorio de hidráulica con las mismas pendientes de los taludes del prototipo y adaptado a las dimensiones del canal del laboratorio de hidráulica. Se adoptó 1V:1,5H. El material usado para la construcción de la misma fue acrílico con espesor suficiente para soportar el oleaje sin sufrir deformaciones permanentes ni roturas. Se elige este material porque es el que mejor representa al hormigón del prototipo en aspectos como coeficiente de rozamiento. En cuanto al soporte, se diseñó una estructura metálica que le confirió la estabilidad ideal para los ensayos establecidos.



Figura 4-7 Vista de la estructura

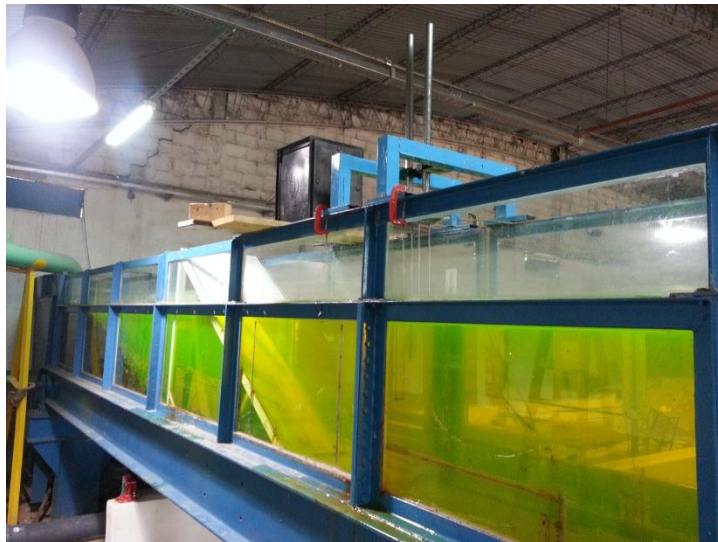


Figura 4-8 Vista de la estructura

#### 4.4.3 Configuración del ensayo

El canal de oleaje donde se han desarrollado los ensayos aquí presentados, está subdividido en diferentes tramos:

### Esquema con playa disipativa

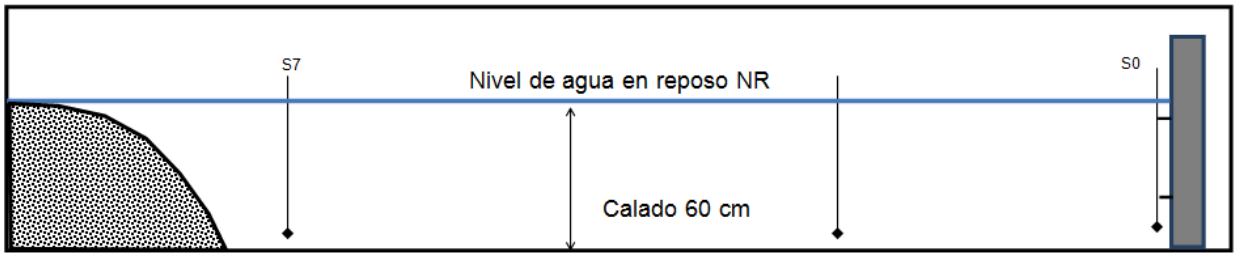


Figura 4-9 Esquema con playa disipativa

1. un tramo de desplazamiento de la pala y estructura absorbente por detrás, de 1.5 m.
2. un tramo plano de 18 m de largo,
3. una playa disipativa parabólica de 3 m de largo

### Esquema con estructura

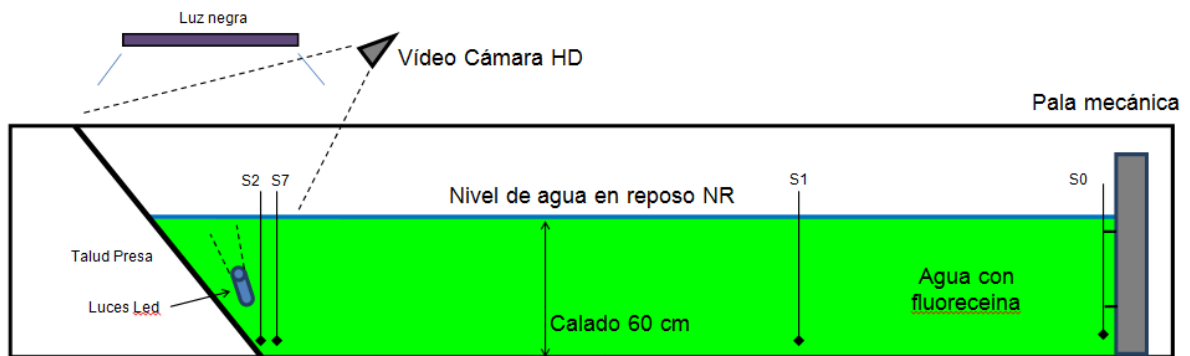


Figura 4-10 Esquema con estructura

1. un tramo de desplazamiento de la pala y estructura absorbente por detrás, de 1.5 m.
2. un tramo plano de 18 m de largo,
3. una estructura de talud 1:1.5.

En el punto de ubicación del pie de dique de la estructura se han posicionados dos instrumentos para medir el oleaje y separar la ola incidente y reflejada. Adicionalmente se ha puesto un sensor a 5 m desde la pala para verificar el oleaje lejos de la estructura.

El método adoptado para la separación del oleaje incidente y reflejado es el método de Baldock (REF). Para ello son necesarios solamente dos sensores de variación de altura de ola. El método separa la señal incidente de la reflejada y calcula el coeficiente de reflexión.

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 del Run-Up en pixel; luego se utilizó una implementación del programa RIVER (Patalano, 2015) para la rectificación de los resultados en metros.

Para mejorar el contraste de las imágenes, y permitir detectar de forma óptima las oscilaciones, se dispuso fluoresceína en el agua del canal, se colocaron luces "led" blancas lateralmente y una luz "negra" arriba del canal en correspondencia con la estructura. Los ensayos se realizaron en semioscuridad para aumentar el contraste entre la lámina de agua en movimiento y el fondo blanco de la estructura.



Figura 4-11 Estructura construida e instalada en el canal de oleaje e instantánea durante un ensayo



## CAPÍTULO 5: RESULTADOS DEL RUN UP

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En la tabla a continuación se detallan los ensayos que se han realizado en la FASE 1, son cuatro valores de altura significativa y sus correspondientes repeticiones. Los valores antes mencionados son los que se colocaron en el programa generador de oleaje.

Tabla 5-1 Ensayos de la FASE 1

FASE	Ensayo	Señal a la pala	
		Hs	Tp
FASE 1 Puntos 1-4 (T1)	Test_P08	0.03	1.1
	Test_P06	0.04	1.1
	Test_P07	0.05	1.1
	Test_P09	0.06	1.1
	Test_P10	0.03	1.1
	Test_P11	0.04	1.1
	Test_P12	0.05	1.1
	Test_P13	0.06	1.1

Estos ensayos han sido realizados con la configuración de ensayo “con playa disipativa” y posteriormente se colocó la estructura para medir allí tanto la altura significativa de ola como distintos parámetros espectrales que se han tenido en cuenta.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores de altura de ola significativa y periodo de pico medidos a pie de dique para los casos antes citados. A su vez luego de realizar las técnicas de separación de ola incidente y ola reflejada se observan los valores del oleaje “separado”, los mismos son los que se utilizarán a la hora de estimar el Run Up mediante formulaciones.

Tabla 5-2 Valores de Hs, Hm0 y Tp para distintas configuraciones de ensayo.

FASE	Ensayo	Valores con Playa disipativa			A pie de dique Total			A pie de dique Sin Abs (separada)		
		Hs	Hm0	Tp	Hs	Hm0	Tp	Hs	Hm0	Tp
FASE 1	Test_P08	0.022	0.02	1.09	0.043	0.04	1.11	0.029	0.03	1.05
	Test_P06	0.03	0.03	1.08	0.055	0.05	1.11	0.037	0.039	1.08
	Test_P07	0.037	0.04	1.1	0.068	0.07	1.11	0.047	0.049	1.09
	Test_P09	0.044	0.04	1.09	0.08	0.08	1.15	0.057	0.059	1.05
	Test_P10	0.022	0.02	1.09	0.041	0.04	1.11	0.028	0.028	1.08
	Test_P11	0.03	0.03	1.08	0.054	0.05	1.11	0.037	0.038	1.05
	Test_P12	0.037	0.04	1.1	0.067	0.07	1.11	0.047	0.047	1.11
	Test_P13	0.044	0.04	1.09	0.077	0.08	1.15	0.055	0.057	1.09

## 5.2 APLICACIÓN FORMULACIONES

En el apartado correspondiente ya se han realizado las aclaraciones sobre la aplicación de las distintas fórmulas que se proponen para estimar el Run Up. En el análisis de resultados podrán observarse gráficas de las distintas curvas teóricas de Run Up para los distintos métodos de cálculo.

## 5.3 VALOR DE RUN UP MEDIDO

Luego de realizar el procesamiento de las imágenes y aplicarles la técnica "Zero Crossing" a los datos otorgados por el programa, los resultados obtenidos del 2% de los mayores valores de Run Up son los siguientes:

Tabla 5-3 Run Up medido mediante técnica de video.

FASE	Ensayo	Señal a la pala		A pie de dique SA (separada)			Medición	
		Hs	Tp	Hs	Hm0	Tp	$\xi_{op}$	$R_{u2\%}$
FASE 1	Test_P08	0.03	1.1	0.029	0.03	1.05	5.0486	0.0690
	Test_P06	0.04	1.1	0.037	0.039	1.08	4.5545	0.1070
	Test_P07	0.05	1.1	0.047	0.049	1.09	4.1009	0.1390
	Test_P09	0.06	1.1	0.057	0.059	1.05	3.6001	0.1360
	Test_P10	0.03	1.1	0.028	0.028	1.08	5.3752	0.0960
	Test_P11	0.04	1.1	0.037	0.038	1.05	4.4858	0.1080
	Test_P12	0.05	1.1	0.047	0.047	1.11	4.2640	0.1480
	Test_P13	0.06	1.1	0.055	0.057	1.09	3.8022	0.1750

## 5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se exhiben los resultados de las distintas pruebas y sus correspondientes análisis. Se organizan de la siguiente forma:

1. Se presentan los principales resultados de las propagaciones de los escenarios medidos y de los valores de Run Up obtenidos en cada ensayo.
2. Se presentan los ajustes de las mediciones del Run Up con las formulaciones propuestas.
3. Se presentan resultados de otras fases de trabajo de las cuales no se participó, pero que se consideraron relevantes para darle un correcto cierre a la práctica supervisada.

### 5.4.1 Propagaciones oleajes y Run Up

En la Tabla 5-4 se muestran los resultados de las mediciones del  $R_{u2\%}$  relativos a los casos con período de pico  $T_p=1.1s$ . Se ensayaron 4 casos con alturas de olas desde 0.03m hasta 0.06m sin absorción dinámica, para posteriormente realizar una repetición de las mismas pruebas.

En la Figura 5-1 se muestran los resultados de los valores de altura de ola significativa, relativos al período  $T_p=1.1s$ , obtenidos a pie de estructura con respecto a la altura de ola significativa frente a la pala generadora de oleaje. Se consideraron dos casos:

1. Sin estructura con playa disipativa.
2. Con estructura sin absorción dinámica (parámetros de oleaje incidente menos los reflejados).

Como análisis de los resultados mostrados en las gráficas 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 es siempre ligeramente inferior al oleaje que se impone como señal a la pala debido al efecto de fricción del canal sobre la propagación del oleaje.
- Cuanto más elevada es la altura de ola significativa que se propaga (para un mismo período) tanto más elevada es la diferencia entre los valores impuestos a la pala y resultantes a pie de dique.
- Las alturas de ola a pie de dique en los ensayos con estructura y sin absorción son más elevadas que las alturas de ola obtenidas en el mismo lugar solo con la playa disipativa.

- Se observa una relación lineal entre los valores de  $H_s$  y  $H_{m0}$  con respecto a los valores de Run Up.

Tabla 5-4 Valores de Run Up medidos en FASE 1 (\* valor del oleaje incidente separado del reflejado)

$H_{s,pala}$ (m)	$H_{s,pie^*}$ (m)	$H_{mo,pie^*}$ (m)	$T_{p,pie^*}$ (s)	$\xi_{op}$	$R_{u2\%}$ (m)
0.03	0.029	0.03	1.05	5.0486	0.069
0.04	0.037	0.039	1.08	4.5545	0.107
0.05	0.047	0.049	1.09	4.1009	0.139
0.06	0.057	0.059	1.05	3.6001	0.136
0.03 R	0.028	0.028	1.08	5.3752	0.096
0.04 R	0.037	0.038	1.05	4.4858	0.108
0.05 R	0.047	0.047	1.11	4.2640	0.148
0.06 R	0.055	0.057	1.09	3.8022	0.175

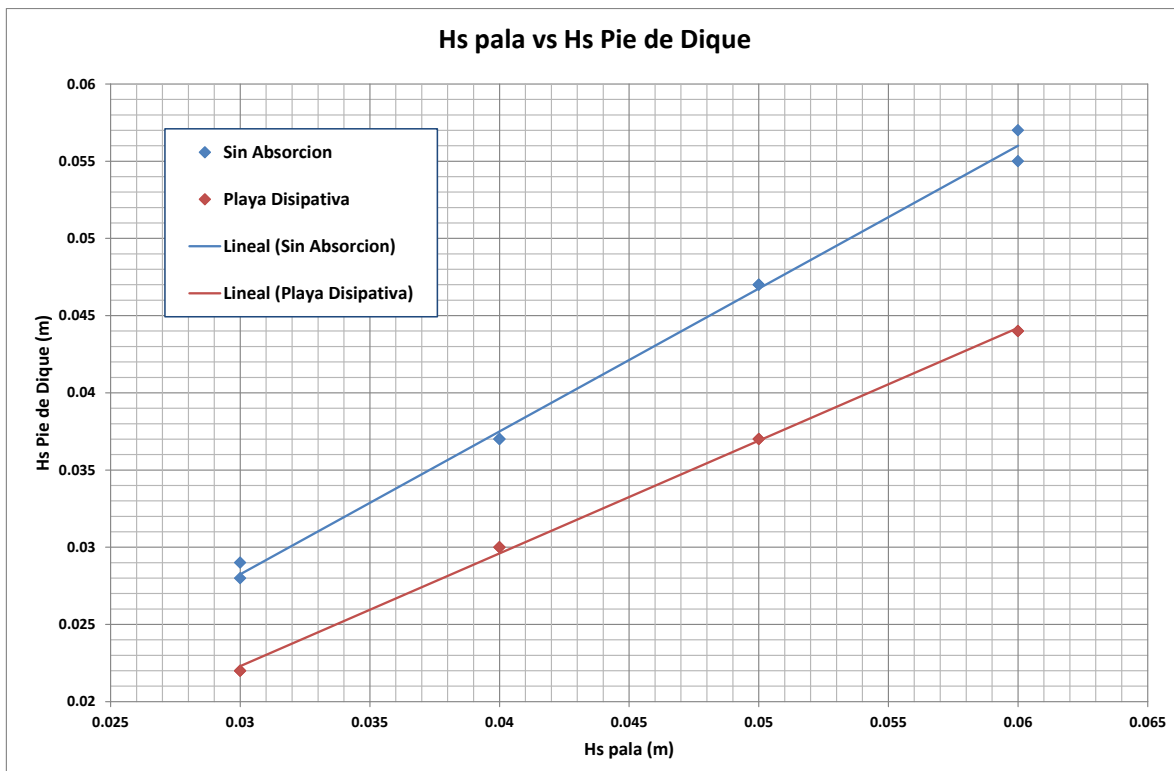


Figura 5-1 Gráfica  $H_s$  pala vs  $H_s$  Pie de dique

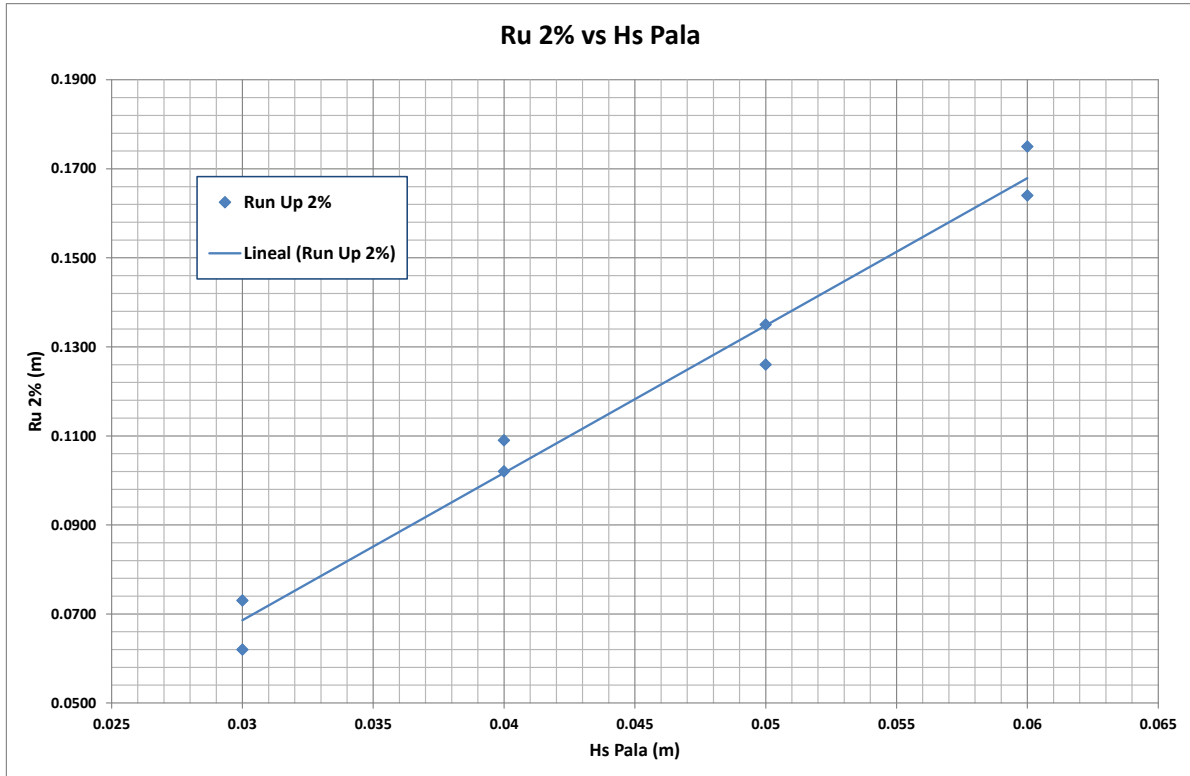


Figura 5-2 Gráfica del Run up medido en función de la altura de ola significativa para la FASE 1

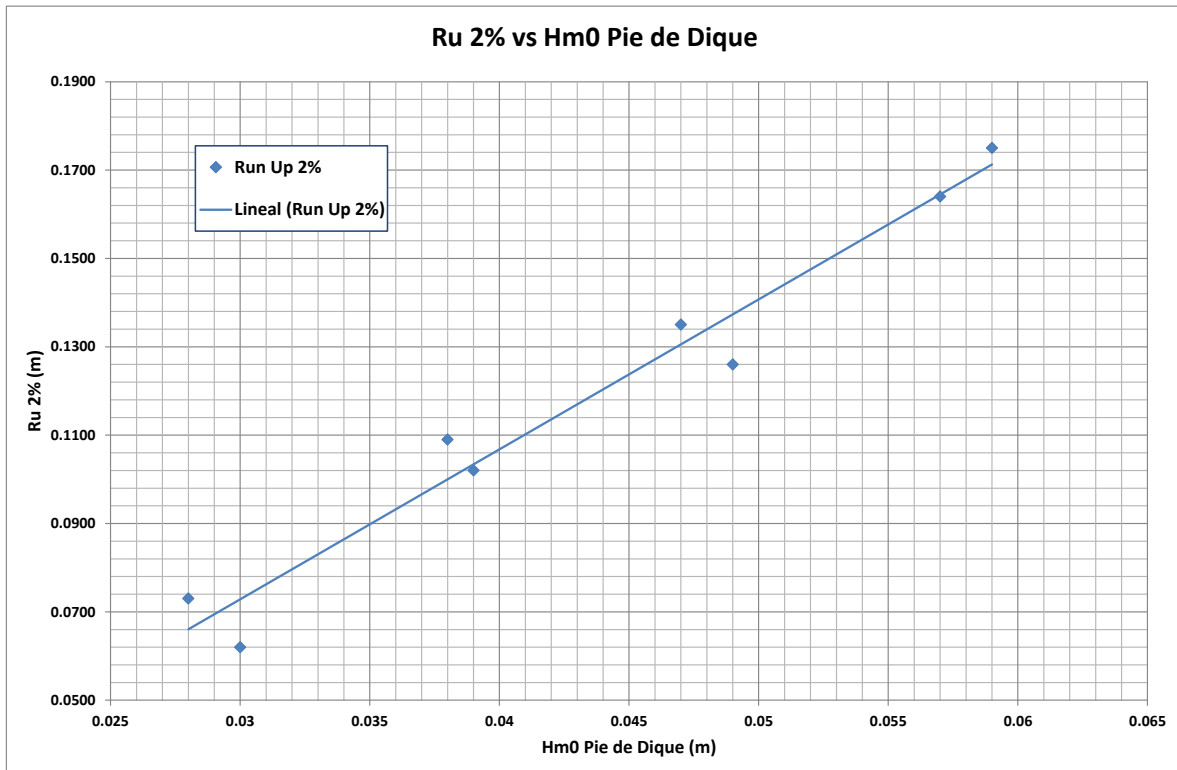


Figura 5-3 Gráfica del Run up medido en función de la altura de ola significativa espectral para la FASE 1

#### 5.4.2 Comparación entre valores medidos y obtenidos por formulaciones.

Se muestran los principales resultados obtenidos en los ajustes de las formulaciones teóricas aplicadas con los datos experimentales. Es importante hacer las siguientes consideraciones:

1. 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.
2. Las formulaciones teóricas han sido obtenidas con ensayos sin absorción dinámica. En esta fase de trabajo no ha sido activada, pero en las posteriores etapas si se incorpora esta herramienta experimental.

En la Figura 5-4 se muestran los ajustes con las formulaciones del *Coastal Engineering Manual* (CEM) y de EUROTOP en función del parámetro de Iribarren  $\xi_{op}$  que delimita la zona entre dos tipos fundamentales de rotura, descrestamiento-voluta y colapso-oscilación. Se observa que hay un mejor ajuste de los datos con la formulación del EUROTOP.

En la Figura 5-5 se representan los valores del Run Up 2% (Ru2%) obtenido con las formulaciones teóricas con respecto los valores medidos. Se observa también que el mejor ajuste se obtiene con la formulación EUROTOP.

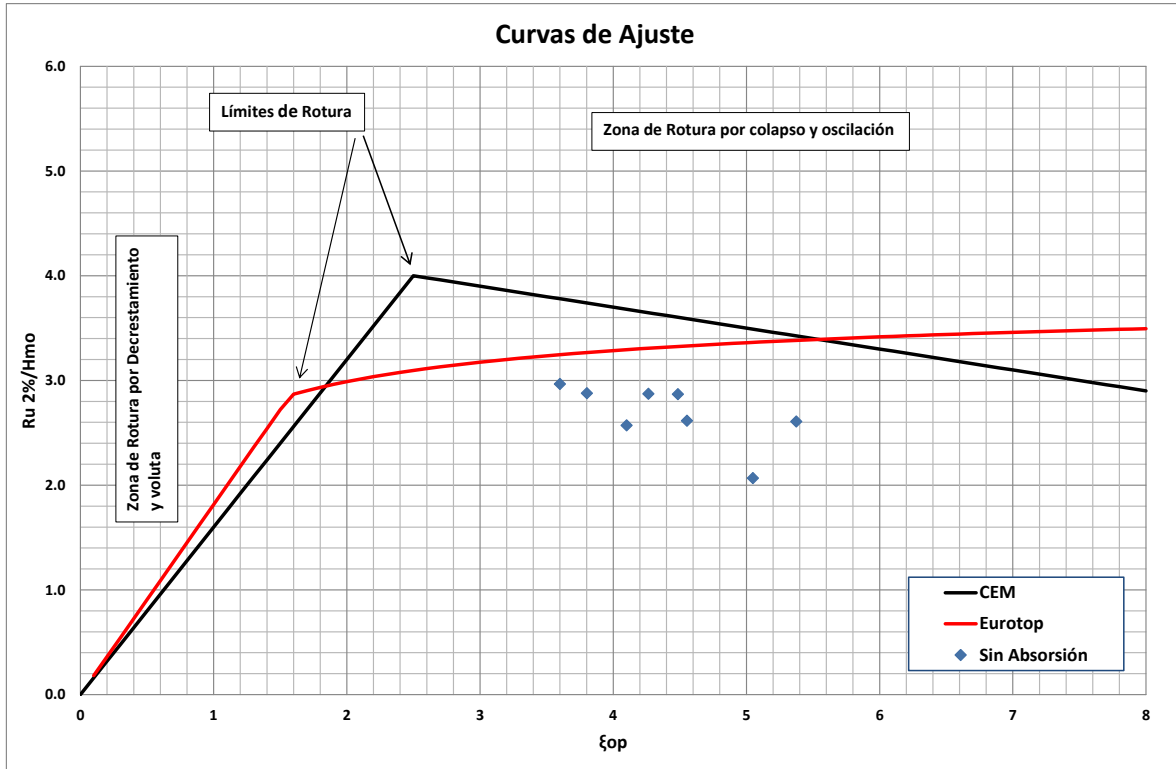


Figura 5-4 Curvas de ajuste del Run Up medido en función de las curvas de cálculo del CEM y Eurotop

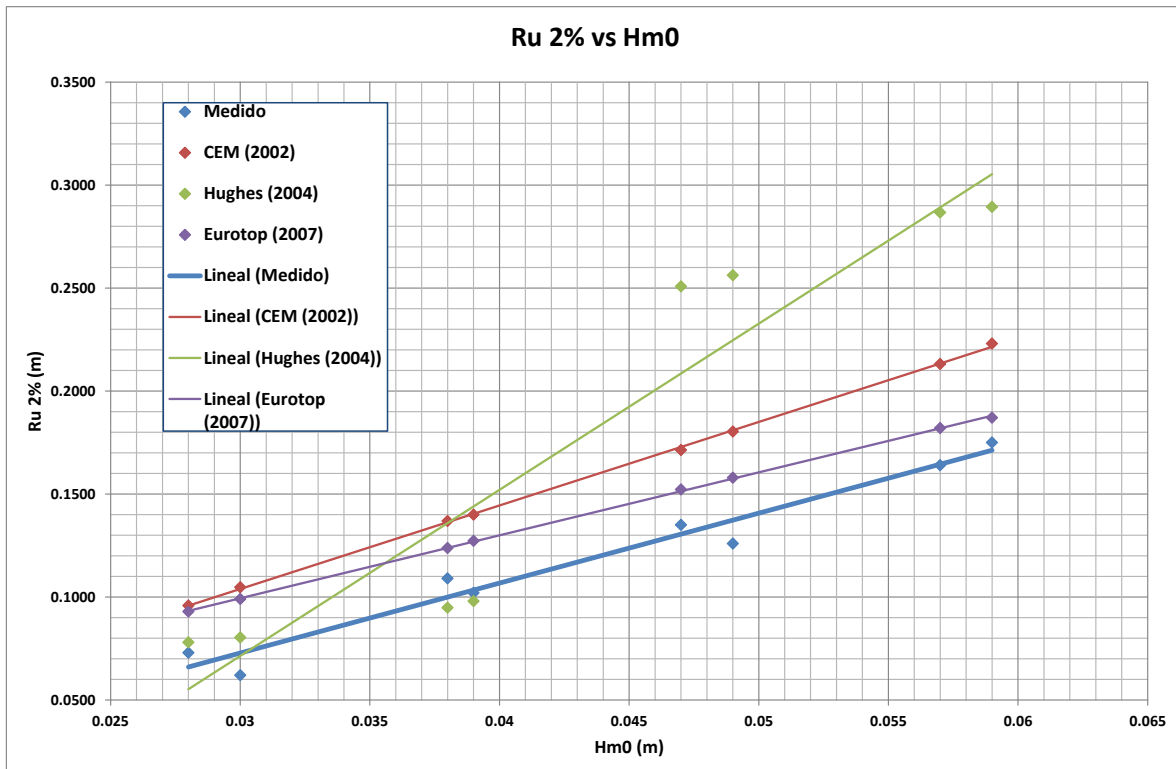


Figura 5-5 Gráfica del Run Up por fórmula y medidos en función de la altura de ola espectral

Los cálculos de la dispersión de los resultados de la Tabla 5-5 se han realizado utilizando el coeficiente de correlación lineal (R2) definido por la siguiente ecuación:

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

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 5-5 Factores de correlación lineal**

Formulación	R2
CEM (Burchart y Hughes, 2002)	0.98
Eurotop (2007)	0.98
Hughes (2004)	0.91

Al igual que el análisis gráfico, la formulación que mejor ajusta es la Eurotop y la del CEM.

#### **5.4.3 Incorporación de resultados de otras fases de trabajo**

Durante la elaboración de este informe de la práctica supervisada se tuvo acceso a datos de otras fases de trabajo. Si bien no se participó en la obtención experimental de estos valores, se considera pertinente hacer un breve análisis de los mismos. Con ello se podrá valorar la importancia de la cantidad y calidad de los datos, así como también el uso de la absorción dinámica en la modelación del oleaje.

La presentación de los resultados se realizará en el mismo orden que se nombró al principio del apartado ANÁLISIS DE RESULTADOS.

#### ***Propagaciones: oleajes y Run Up***

La Tabla 5-6 Serie de valores de oleaje obtenida de otras fases de trabajo (\* valor del oleaje incidente separado del reflejado en el caso que corresponda) muestra los principales resultados de medición del  $R_{u2\%}$ , que a diferencia del anterior en este se exponen más ensayos. Para el periodo  $T_p=1.1$  seg se ensayaron un total de 7 casos con altura de olas desde 0.03m hasta 0.09m sin



absorción dinámica, su correspondiente repetición y posteriormente se ensayaron los mismos 7 casos esta vez con absorción dinámica activada.

- 1) sin estructura con playa disipativa,
- 2) con estructura sin absorción dinámica (parámetros de oleaje incidente menos los reflejados).
- 3) con estructura con absorción dinámica activada

En la Figura 5-6 se muestran los resultados de los valores de altura de ola significativa, relativos al período  $T_p=1.1s$ , obtenidos a pie de la estructura con respecto al valor de altura de ola significativa frente a la pala generadora de oleaje,  $H_s$  pala.

Podemos mencionar que 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 a la playa disipativa.

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 período de pico. Este resultado es de esperarse considerando que para un mismo valor de altura de ola significativa enviado a la pala generadora, los valores de altura de ola a pie de la estructura en los casos que se activa la absorción son menores.

En los gráficos de valores de Run Up con respecto a la altura de ola espectral a pie de la estructura, se observa que para una misma altura de ola espectral incidente el Run Up es el mismo con absorción dinámica y sin absorción dinámica.

Para un mismo valor de altura de ola significativa ( $h_s$ ) enviado a la pala generadora, la altura de ola espectral ( $h_{m0}$ ) que se tiene en ensayos sin absorción es mayor que la de ensayos con absorción activada. Por lo tanto para obtener mismos valores de Run Up necesitaremos igualar las  $h_{m0}$  y eso se consigue solo aumentando el valor  $h_s$  enviado a la pala en ensayos con absorción dinámica activa.

Tabla 5-6 Serie de valores de oleaje obtenida de otras fases de trabajo (\* valor del oleaje incidente separado del reflejado en el caso que corresponda)

$H_{s,pala}$ (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	4.5	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	0.28
0.09	0.079	0.081	1.28	3.8	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	3.8	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	0.11
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

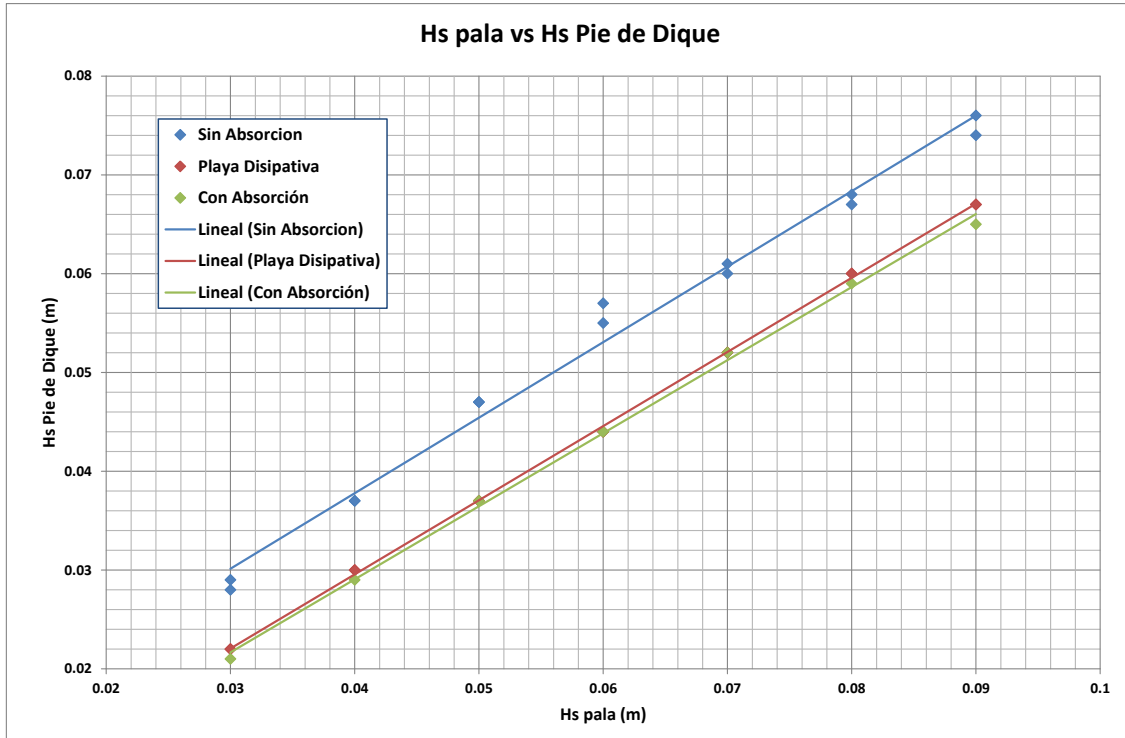


Figura 5-6 Gráfica comparativa entre altura de ola significativa a la salida de la pala generadora y al pie de la estructura

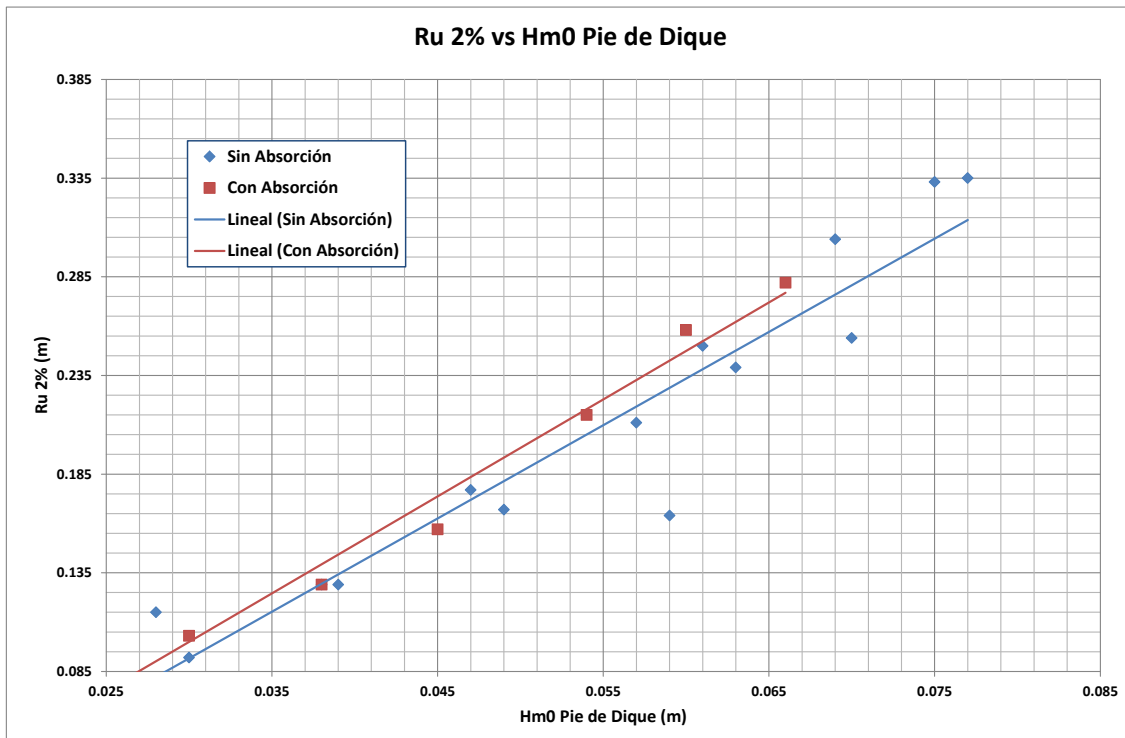


Figura 5-7 Gráfica del Run Up medido en función de la altura de ola espectral a pie de dique

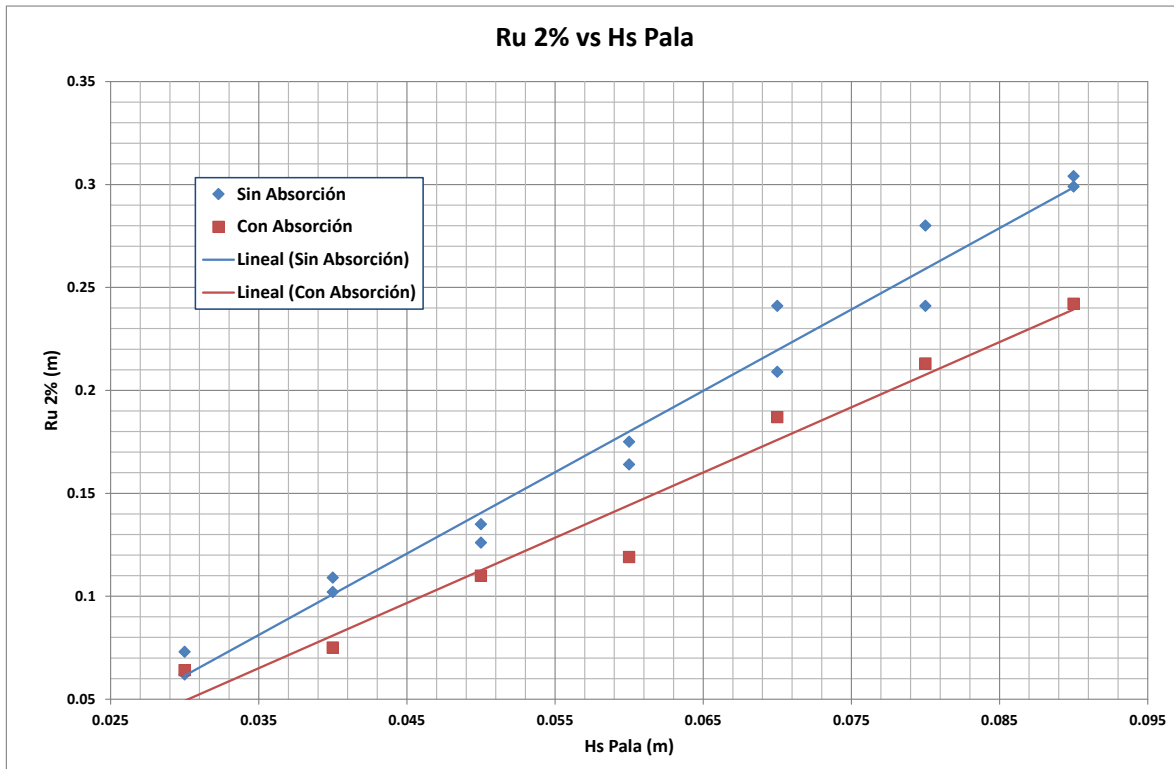


Figura 5-8 Gráfica del Run Up medido en función de la altura de ola significativa

**Comparación entre valores medidos y obtenidos por formulaciones.**

Se realizaron los ajustes de las formulaciones utilizadas para todo los datos (con y sin absorción). De esta manera puede obtenerse una correlación para la nueva condición experimental de absorción activa, pudiendo verificar si la aplicación de los métodos estimativos se modifica en este caso.

Para la nueva cantidad de datos, los ajustes tanto gráficos como de correlación cambian notablemente.

En lo que respecta al coeficiente de correlación lineal el método que mejor ajusta es el del CEM. Que se comprueba con las curvas de ajustes.

Tabla 5-7 Factores de correlación lineal

Formulación	R2
CEM (Burchart y Hughes, 2002)	0.97
Eurotop (2007)	0.96
Hughes (2004)	0.91

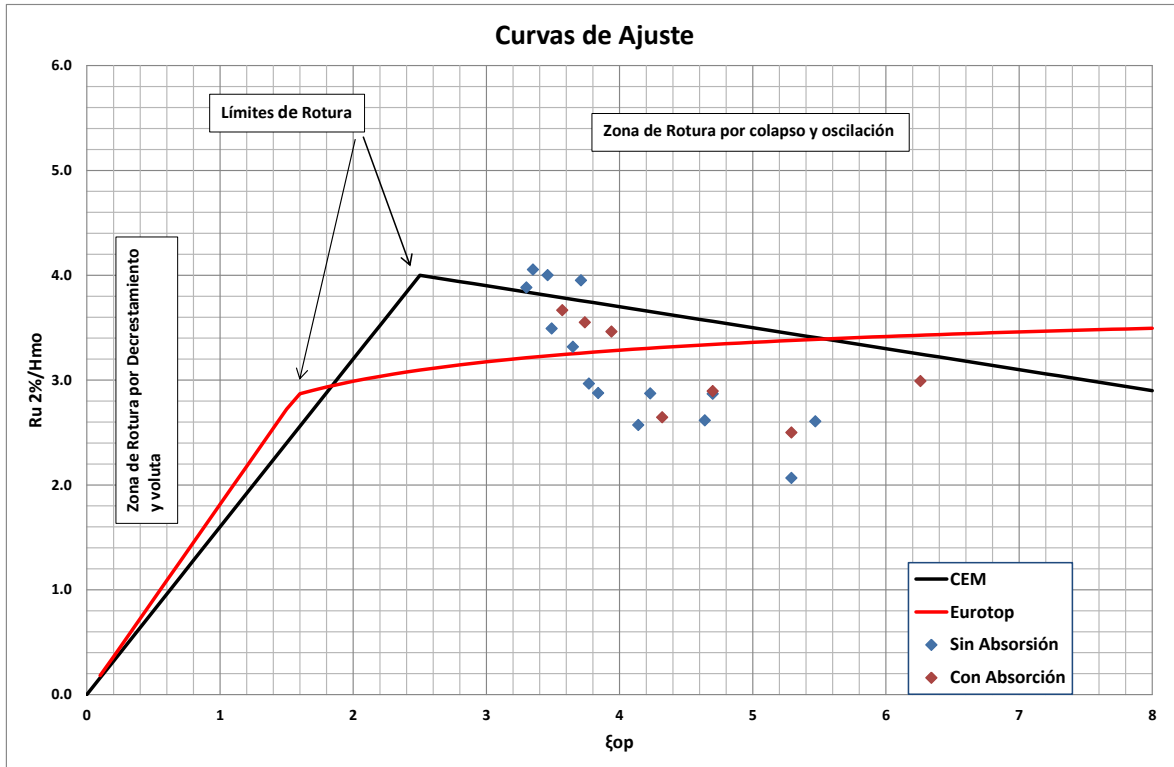


Figura 5-9 Curvas de ajuste del Run Up medido en función de las curvas de cálculo del CEM y Eurotop

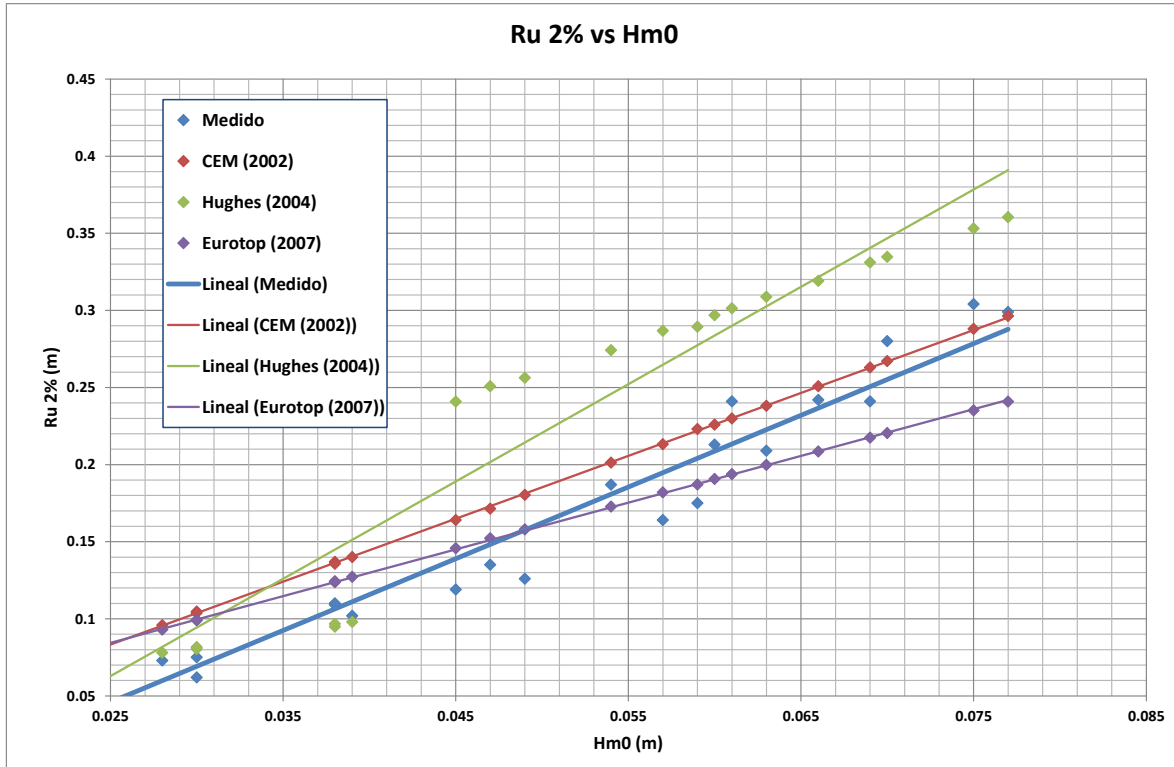


Figura 5-10 Gráfico del Run Up medido y calculados en función de la altura de ola espectral

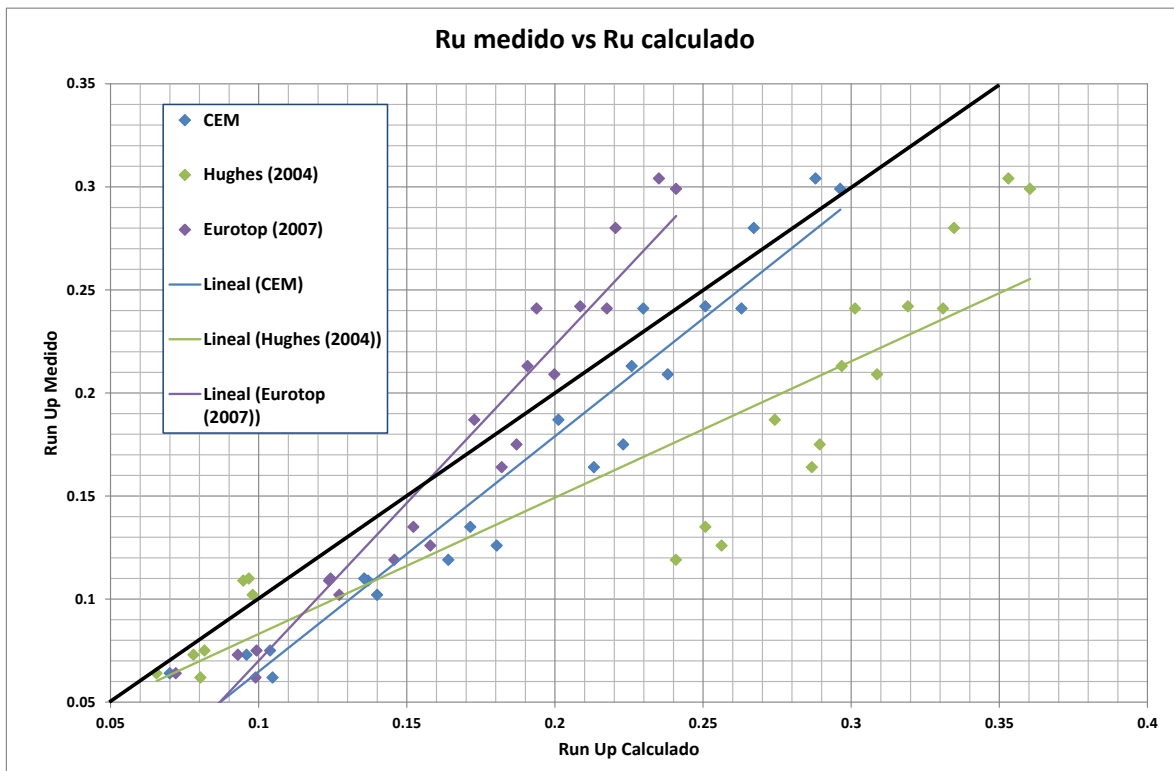


Figura 5-11 Gráfica comparativa entre Run Up medido y de fórmula.

## CONCLUSIONES

---

Se puede concluir que para las condiciones de oleaje ensayadas ( $T_p=1.1$  s,  $H= 60$  cm y distintas  $H_s$ ) y un talud de presa de 1V:1.5H se obtuvieron valores de Run Up 2% variables entre 6.2 cm y 30.4 cm (SA) y entre 6.4 cm y 24.2 (CA) cm. El análisis de resultados arroja una relación lineal entre los valores de  $H_s$  ingresados a la pala generadora y el Run Up medido sobre la estructura.

Existe una buena correspondencia entre los valores obtenidos con playa disipativa y con estructura con absorción activada. Lo anterior implica un correcto funcionamiento de la absorción dinámica. Cabe recordar que la misma fue calibrada respecto a la playa disipativa. Se observa además que 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.

Respecto a las formulaciones teóricas consideradas, la que mejor ajustó fue la del CEM (Burcharth y Hughes, 2002). Realizando una comparación entre escenarios con absorción y sin absorción, puede concluirse que no hay una marcada diferencia entre los ajustes obtenidos para las distintas formulaciones.

Se destaca la importancia de la modelación de los fenómenos físicos. Muchas veces durante el transcurso de la carrera, se aplican fórmulas empíricas o analíticas asumiendo como irrefutable el resultado que nos otorgan. Al realizar esta experiencia en laboratorio es posible tomar real magnitud de lo primordial que es la experimentación y el modelado para terminar de definir distintos parámetros de la ingeniería.

Es necesario recalcar el valor de la información y el correcto tratamiento de la misma. Se observa cómo la cantidad de datos y el cuidado de obtención de los mismos puede modificar notablemente el resultado final.

Finalmente se destaca que en la aplicación de la ingeniería nos debemos rodear de otros colegas, otras visiones y otras opiniones para hacer de un trabajo una experiencia enriquecedora.

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

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.

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.

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.

Universidad de Cantabria para la Dirección General de Costas, Ministerio de medioambiente (España). "Documento de Referencia", textos elaborados para el proyecto: Modelo de ayuda a la gestión del litoral.

J. William Kamphuis (2000). "Introduction to coastal engineering and management.