



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 JORGE CEPERNIC"**

CARRERA: INGENIERIA CIVIL

ALUMNO: PIEROBON, JUAN

TUTOR INTERNO: DR. ING. GYSSELS, PAOLO

TUTOR EXTERNO: INGA. PAGOT, MARIANA

AÑO 2016

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar quiero agradecer a mi familia que me apoyó durante toda la carrera. Mis viejos, Graciela y Néstor, que me bancaron todos estos años y que sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Mis hermanos, Santiago, Pablito, Mateito que siempre estuvieron ahí para distenderme, alentarme y bancarme.
- A mis amigos de la facultad, que siempre estuvieron acompañándome en las buenas y malas.
- A mi tutor Paolo Gysels que me dio la oportunidad de trabajar junto a él en este proyecto.
- Al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que me permitió realizar la Practica Supervisada.
- A la Universidad Nacional de Córdoba.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS	3
INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	7
CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.	8
1.1 Introducción	8
1.2 Ámbito de desarrollo de la PS	8
1.3 Complejo hidroeléctrico “Presidente Néstor Kirchner, Gobernador Jorge Cepernic”	8
1.3.1 Generalidades	8
1.3.2 Ubicación y aspectos característicos	9
1.3.3 Financiación	10
1.3.4 Cota de coronamiento Represa Gobernador Jorge Cepernic	11
1.3.5 Tipo de Presa	12
1.4 Objetivos generales.....	13
1.5 Objetivos específicos.....	13
1.6 Objetivos personales.....	13
1.7 Alcance de la PS	14
1.8 Plan de actividades desarrolladas	14
CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE	15
2.1 MECANICA DE ONDAS.....	15
2.1.1 Introducción	15
2.1.2 Movimiento oscilatorio, Magnitudes características de las ondas.	16
2.1.3 Definición de parámetros adimensionales	21
2.1.4 Regímenes y teorías de ondas	23
2.1.5 Teoría lineal de ondas.	25
2.2 ANALISIS DE OLEAJE	27
2.2.1 Descripción estadística.....	27
2.2.2 Parámetros del oleaje	27
2.2.3 Espectros de oleaje	30
2.2.4 Espectros de un estado del mar.....	31

2.2.5 Espectros de frecuencia más utilizados	32
2.2.6 Separación del oleaje incidente y reflejado.....	33
2.3 TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN CANAL 2D.....	34
2.3.1 Asomeramiento	34
2.3.2 Rotura.....	34
2.3.3 Ascenso-descenso (Run-Up)	36
2.3.4 Reflexión	37
2.3.5 Transmisión	38
CAPITULO 3: ENSAYOS EXPERIMENTALES	38
3.1 El canal de oleaje del LH.....	38
3.2 Metodología.....	41
3.3 Configuración experimental.....	44
3.3.1 Construcción de la estructura	44
3.3.2 Instrumental y software de análisis.....	44
3.3.3 Diseño y construcción de playa absorbente	45
3.3.4 Absorción Dinámica	48
CAPITULO 4: RESULTADOS ANÁLISIS DEL OLEAJE.....	50
4.1 Pruebas de capacidad y generación de oleaje. Fase 1.....	50
4.2 Determinación de combinación (Hs-Tp) a pie de dique. Fase 2	51
4.3 Calibración de la absorción dinámica. Fase 3	53
4.4 Diseño de los ensayos finales. Fase 4	62
CAPITULO 5: CONCLUSIONES.....	64
5.1 Conclusiones	64
5.2 Conclusiones de la práctica supervisada	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Represas Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. Imagen ilustrativa.	9
Figura 2. Comparación de potencias de las diferentes represas del país.	9
Figura 3. Ubicación de las represas en Santa Cruz. Imagen de Google Earth.	10
Figura 4. Ubicación de represa Gobernador Cepernic. Imagen de Google Earth.	10
Figura 5. Distribución energética de las ondas de superficie.	15
Figura 6. Definición de parámetros asociados a la onda	17
Figura 7. Ondas de cresta larga. Parámetros.	19
Figura 8. Definición de ejes y parámetros. Incidencia oblicua.	20
Figura 9. Perfiles de onda de acuerdo a las diferentes teorías.	25
Figura 10. Representación de una onda de Airy.	26
Figura 11. Parámetros representativos del oleaje.	27
Figura 12. Error cometido en la estimación del estado del mar con cada parámetro estadístico.	29
Figura 13. Serie temporal en el dominio del tiempo con su respectivo espectro energético. ...	30
Figura 14. Superposición de estados del mar.	31
Figura 15. Espectros energéticos.	31
Figura 16. Evolución del espectro con el fetch	32
Figura 17. Esquema de Asomeramiento (shoaling).	34
Figura 18. Tipo de rotura Spilling.	35
Figura 19. Tipo de rotura Plunging.	35
Figura 20. Tipo de rotura Collapsing.	36
Figura 21. Tipo de rotura Surging.	36
Figura 22. Canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la UNC	39
Figura 23. Generador de oleaje	40
Figura 24. Sensor de tipo resistivo	41
Figura 25. Esquema con playa disipativa	41
Figura 26. Esquema con estructura	42
Figura 27. Estructura usada en modelo físico de la represa.	44
Figura 28. Sensores de nivel de tipo resistivo para medir la altura de ola y separar la señal incidente y reflejada.	45

Figura 29. Playa parabólica vista lateral	47
Figura 30. Playa disipativa vista desde arriba	48
Figura 31. Esquema de oleaje con Absorción Dinámica.	48
Figura 32. Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica.	49
Figura 33. Esquema del proceso de calibración de la absorción dinámica.	53
Figura 34. Señales Test_T011 (eje vertical Hs- eje horizontal Tiempo)	56
Figura 35. Superposición de oleaje total con suma incidente + reflejado.....	57
Figura 36. Señales Test_T021 (eje vertical Hs- eje horizontal Tiempo).....	57
Figura 37. Comparación espectros Test_T011 (Playa disipativa, Estructura sin Absorción, Estructura con Absorción).....	58
Figura 38. Comparación espectros Test_T021 (Playa disipativa, Estructura sin Absorción, Estructura con Absorción).....	59
Figura 39. Comparación en Test_T011 “señales con Playa Disipativa vs Con estructura con Absorción dinámica”	59
Figura 40. Comparación en Test_T021 “señales con Playa Disipativa vs Con estructura con Absorción dinámica”	60
Figura 41. Comparación de espectros energéticos de ensayo T011 con Espectro Jonswap.....	61
Figura 42. Comparación de espectros energéticos de ensayo T021 con Espectro Jonswap.....	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de onda con sus características.	16
Tabla 2. Coeficientes de reflexión típicos de estructuras costeras.	37
Tabla 3. Rango de valores utilizados en los ensayos de prueba	51
Tabla 4. Ensayos realizados sin Absorción Dinámica, con estructura.	52
Tabla 5. Comparación entre valores objetivos y reales de Hs (metros), Tp (segundos) con estructura.	52
Tabla 6. Comparación entre valores objetivos y valores reales de Hs, Tp con playa disipativa. .	52
Tabla 7. Ensayos analizados, comparación resultados oleajes sin separar, separados y con playa disipativa.	54
Tabla 8. Tabla resumen de los Test analizados. (FR= Factor de Reducción de la energía, GANANCIA= suma de la ola reflejada)	55
Tabla 9. Serie 0: Ensayos sobre playa disipativa, con Tp=1.1seg, Tp=1.3seg, Hs (0.03m-0.09m).	62
Tabla 10. Serie 1: Ensayos sobre estructura, Test_P01 a Test_P06 con Hs objetivo (0.03m-0.06m), Tp (1.1s-1.4s).	63

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.

1.1 Introducción

El presente informe resume los trabajos realizados durante la Práctica Supervisada del alumno Pierobon Juan, para cumplimentar con los requerimientos y adquirir el título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

1.2 Ámbito de desarrollo de la PS.

La presente práctica supervisada se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfyN), en un trabajo conjunto con el INA(Instituto Nacional del Agua)de Buenos Aires. Bajo el acompañamiento del Ing. Paolo Gysels, Inga. Leticia Tarrab e Inga. Mariana Pagot, se trabajó con el generador bidimensional de oleaje, el cual se encuentra dentro del Laboratorio, ubicado sobre Bv. Dr. Juan Filloy dentro de Ciudad Universitaria.

El trabajo se desarrolló dentro del convenio “Hidráulica contratación- Modelación bidimensional del clima de olas y evaluación de Run-Up por oleaje en el paramento en escollera de la presa Cepernic”. La medición del Run-Up sirve para poder definir la altura de coronamiento de la presa.

1.3 Complejo hidroeléctrico “Presidente Néstor Kirchner, Gobernador Jorge Cepernic”.

1.3.1 Generalidades

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. Los estudios preliminares de los proyectos se remontan a 1970.

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

1.3.2 Ubicación y aspectos característicos

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

La represa Gobernador Jorge Cepernic está localizada a 170 kilómetros de la ciudad de Comandante Luis Piedra Buena. Cuenta con una capacidad instalada de 600 MW y 45 metros de altura. La extensión del muro es de 2700 metros. La casa de máquinas está compuesta por 5 turbinas Kaplan y producirá 1866 GW/h al año. La superficie del embalse será de 200 kilómetros cuadrados (Figura 1).



Figura 1. Represas Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. Imagen ilustrativa.

A continuación se puede observar que esta obra es íntegramente nacional con mayor potencia del país. Se hace una comparación con las otras represas del país. (Figura 2)

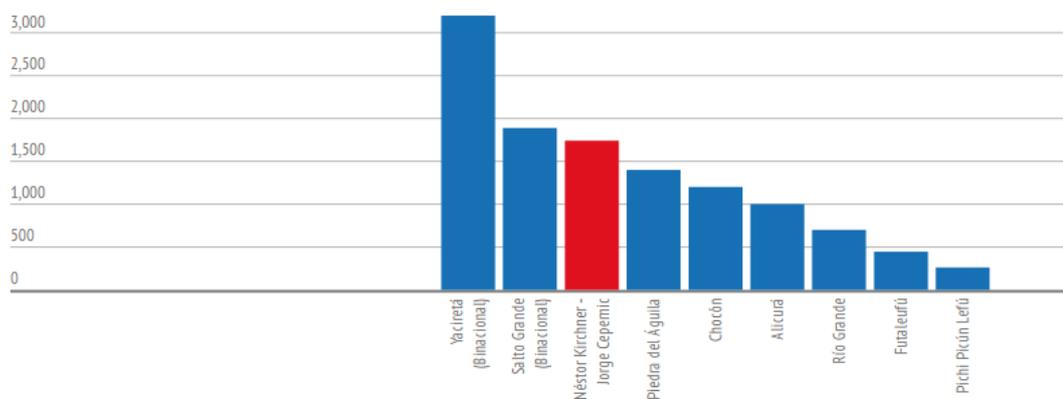


Figura 2. Comparación de potencias de las diferentes represas del país.

A continuación se muestra la ubicación de las presas en Santa Cruz. (Figura 3)(Figura 4)



Figura 3. Ubicación de las presas en Santa Cruz. Imagen de Google Earth.



Figura 4. Ubicación de presa Gobernador Cepernic. Imagen de Google Earth.

1.3.3 Financiación

La financiación del proyecto es uno de los aspectos más destacados, por inédito en el país: la financiación de infraestructura por Bancos chinos, a largo plazo, por muy altos montos, con bajas tasas de interés comparables con las del resto de Latinoamérica, que alcanza al 121 % del proyecto. Ningún otro oferente alcanzó ese porcentaje. El Estado deberá aportar solo un porcentaje menor al 15% del valor total de la obra. El resto se repaga con la generación de energía que producirán las centrales. Esto permite garantizar el flujo financiero durante los 6 años de la obra y de esta manera asegurar que se realice en tiempo y forma. O sea que la obra comience, concluya, genere para su repago y se realice la Operación y Mantenimiento (O&M) en forma exitosa.

1.3.4 Cota de coronamiento Represa Gobernador Jorge Cepernic

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 m. Se realizó un estudio de antecedentes que permitió conocer las características del viento en la zona “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/hs, 96 km/hs y 128 km/hs. Como datos adicionales se incorporaron registros de viento y ráfagas mayores a 60 km/hs en el periodo octubre de 1962 a 1964 y valores de ráfagas máximas mensuales mayores a 70 km/hs 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/hs a 156 km/hs. 5. Finalmente se consideraron como vientos de diseño un valor de 100 km/hs como valor de viento máximo y un valor de 156 km/hs 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/hs 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/hs. 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. 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.

1.3.5 Tipo de Presa

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 m³.

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 la 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.

1.4 Objetivos generales.

El principal objetivo de esta 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, Jorge Cepernic (Santa Cruz). También, la realización de mediciones con los sensores de niveles y de velocidad en dotación al Laboratorio, para poder establecer el Run-Up sobre el talud del modelo. Se realizará el análisis de los resultados acorde a los procedimientos de laboratorio para los ensayos establecidos.

Entre los objetivos de la presente práctica profesional supervisada pueden nombrarse los siguientes:

- 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.

1.5 Objetivos específicos.

Realizar el análisis completo de todos los ensayos, en particular:

- verificar la reflexión de la estructura,
- separar las señales de oleaje incidente y reflejado,
- realizar un tratamiento estadísticos de los resultados para calcular los parámetros de interés,
- analizar el funcionamiento de la absorción dinámica de la pala generadora del oleaje,
- Comparar señales con absorción dinámica y playa disipativa, para verificar buen comportamiento de la pala generadora de oleaje.

1.6 Objetivos personales.

Como objetivos personales, durante el desarrollo de la práctica supervisada, me propuse lo siguiente:

- Lograr una interacción permanente con un grupo de profesionales aplicados a la ingeniería hidráulica y costera.

- Alcanzar un desarrollo personal y profesional en un ámbito de trabajo cotidiano, aprovechando las instancias de trabajo respectivas, buscando comprender la correlación entre ambas.
- Aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

1.7 Alcance de la PS

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, armado 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 el análisis de la Serie 0, Serie 1 (de la cual se participó activamente).

1.8 Plan de actividades desarrolladas.

- 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 los oleajes generados en una serie de ensayos.
- E. Análisis y tratamientos de los resultados: separación de señales incidentes y reflejados, análisis espectral del oleaje, análisis del Run-Up.
- F. Elaboración del informe final.

CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE OLEAJE

2.1 MECANICA DE ONDAS

2.1.1 Introducción

En el océano siempre existe algún tipo de onda que pone de manifiesto la propagación de energía mecánica a lo largo de la interfase agua-atmosfera que constituye la superficie del mar. Los mecanismos que aportan esta energía son de diferente naturaleza: viento, perturbaciones meteorológicas, terremotos, atracción planetaria, etc. Como consecuencia de la variabilidad en las características de los distintos forzamientos mencionados, las características de las ondas-respuesta difieren tanto en su periodo y longitud como en sus mecanismos de control. La

Figura 5 muestra, de forma esquemática, la energía de las ondas de superficie asociada a cada frecuencia. Como puede observarse, el tipo de ondas superficiales abarca desde ondas capilares con periodos inferiores a 1 seg hasta oscilaciones inducidas por la marea con periodos del orden de horas e incluso días.

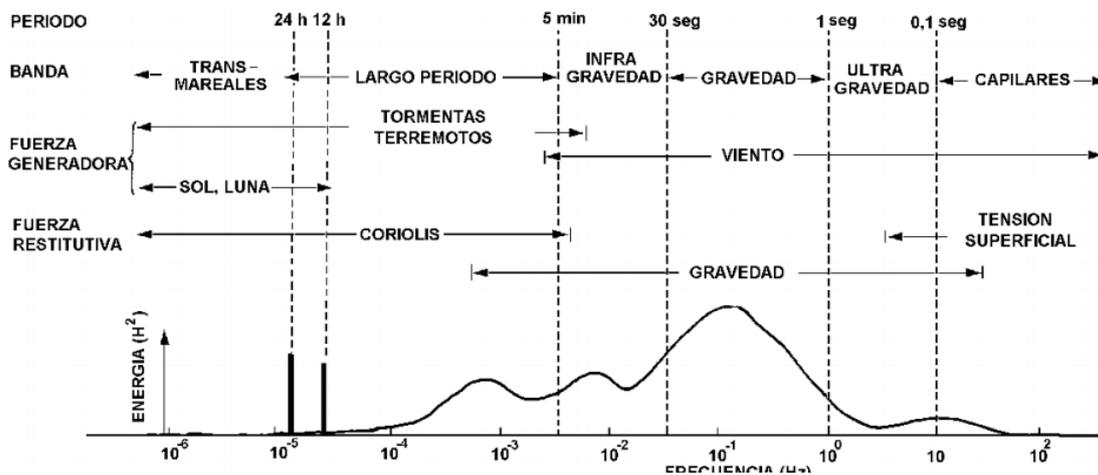


Figura 5. Distribución energética de las ondas de superficie.

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

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

Tabla 1. Tipos de onda con sus características.

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

2.1.2 Movimiento oscilatorio, Magnitudes características de las ondas.

La descripción matemática de las ondas considera, en general, que las ondas son oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie de agua. Es decir, se asume que estas ondas se repiten una y otra vez distinguiendo entre dos tipos de oscilaciones: **las ondas progresivas y las ondas estacionarias**. Las ondas progresivas se propagan en una profundidad

constante manteniendo su forma, mientras que las ondas que no se propagan se denominan estacionarias. Al desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto a un nivel medio de referencia NM (MWL) del fluido, se lo denomina desplazamiento de la superficie libre, η .

Si se observa el paso de una onda por una superficie fija a lo largo del tiempo, se puede definir como **periodo de la onda T**, al tiempo que transcurre hasta que se observa un punto idéntico de la superficie libre. Si se toma una imagen de la superficie libre en un instante determinado, se puede definir la **longitud de onda L** como la distancia horizontal más corta entre dos puntos idénticos sucesivos de la superficie libre. Es conveniente aplicar estas definiciones utilizando puntos significativos de la superficie libre tales como el punto en el que la superficie libre alcanza un máximo, llamado **cresta**, el punto donde alcanza un mínimo llamado **seno**, o los puntos de **paso por cero** que son aquellos en los que la superficie libre interseca al nivel medio de referencia (Figura 6).

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

$$H = A_c + A_s$$

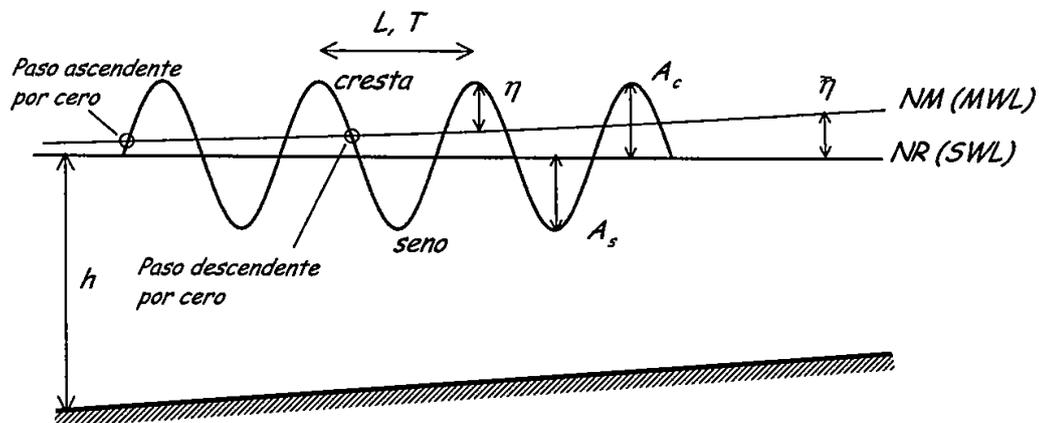


Figura 6. Definición de parámetros asociados a la onda

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

definen siempre respecto a un cierto nivel de referencia. El nivel en reposo NR (SWL) corresponde al nivel del fluido en ausencia de ondas. A la distancia entre el fondo y el NR se le llama **profundidad o calado, h**. Por el contrario, en presencia de ondas o una corriente la referencia es el nivel medio NM (MWL) que generalmente no coincide con el nivel de reposo. La altura de la onda, H presenta la ventaja de ser una distancia definida sin necesidad de un nivel de referencia.

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

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

Y la **frecuencia angular, ω**

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

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

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

En general, se suele hacer uso de un sistema de referencia cartesiano (x, y, z) tal que el eje x define la dirección de propagación, el eje z tiene su origen en el nivel en reposo y se considera positivo por encima de dicho nivel y el eje y es ortogonal a los ejes x y z . La onda de la Figura 7 progresa en el sentido positivo del eje x y por tanto, las crestas, se extienden en la dirección del eje y sin variación hasta el infinito. Este tipo de ondas suele denominarse ondas de **crestas largas**. De una forma más precisa, este tipo de movimiento puede definirse como aquel en el que las variaciones en la dirección del eje y son despreciables en comparación con las que se producen en la dirección del eje x .

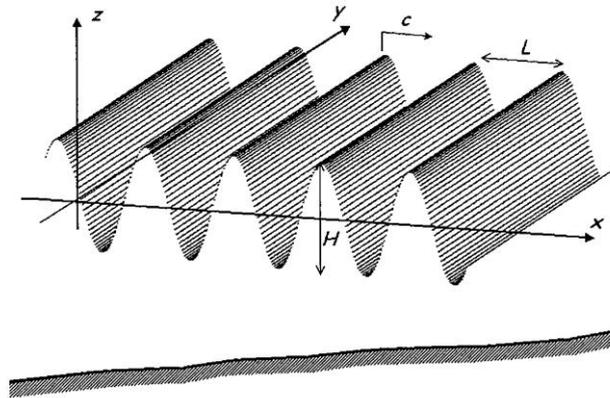


Figura 7. Ondas de cresta larga. Parámetros.

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

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

O teniendo en cuenta las definiciones anteriores, como

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

Uno de los primeros objetivos de cualquiera teoría de ondas que se va a presentar, necesarias para realizar el modelado matemático de la onda, es determinar C cuando las magnitudes H, L y h son conocidas. Una vez conocida la celeridad, la descripción de la cinemática de las partículas (velocidades, aceleraciones y desplazamientos) así como el campo de presiones bajo el paso de las ondas es el siguiente objetivo.

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

$$L_x = \frac{L}{\cos\alpha}$$

$$L_y = \frac{L}{\sen\alpha}$$

Definiéndose asimismo

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

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

Donde

$$k_x = k \cos \alpha$$

$$k_y = k \sin \alpha$$

Por tanto, se puede definir un vector número de ondas, k (modulo), cuya dirección coincide con la dirección de propagación de las ondas, cuyas componentes son k_x y k_y (Figura 8).

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

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

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

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

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

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

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

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

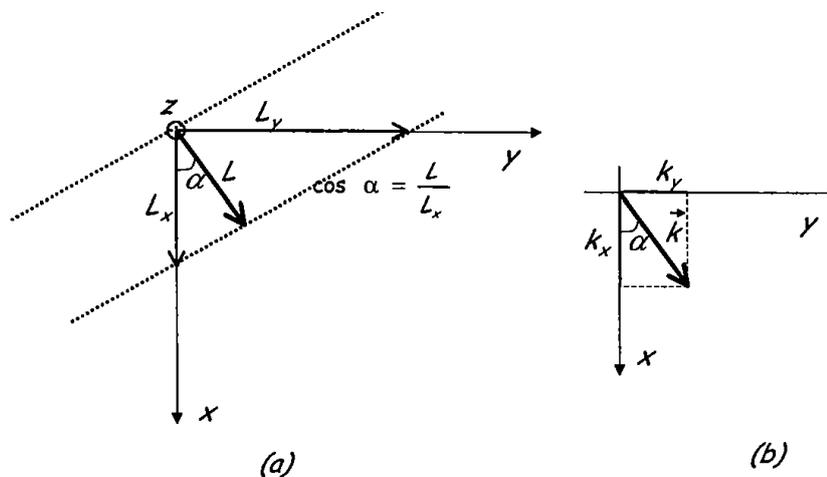


Figura 8. Definición de ejes y parámetros. Incidencia oblicua.

2.1.3 Definición de parámetros adimensionales

Como se ha dicho anteriormente el objetivo fundamental de cualquier teoría de ondas es determinar la celeridad de la onda C cuando las magnitudes H , L , h o H , T , h son conocidas. Por 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:

$$\epsilon = k A \quad \text{ó} \quad \frac{H}{L} \quad \text{ó} \quad k H$$

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

$$\mu = k h \quad \text{ó} \quad \frac{h}{L}$$

El primer parámetro, ϵ es el **peralte de la onda** y da la variación del movimiento vertical de la onda en una longitud de onda. El parámetro δ es **la altura relativa de la onda**, y da una indicación de la importancia de la oscilación vertical de la onda respecto a la profundidad. El parámetro μ es conocido como **la profundidad relativa** y muestra la penetración del movimiento de la onda con la profundidad. Asimismo, este parámetro sirve como medida de la dispersividad de las ondas pues, como se verá, indica si la celeridad está afectada o no por el periodo de las ondas.

Obsérvese que solo dos parámetros son independientes y que, por tanto, cualquiera de ellos puede ser expresado en función de los otros dos. Por ello, suelen emplearse también los parámetros:

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

Los parámetros adimensionales son utilizados para caracterizar el movimiento de las ondas. Además, y como se verá más adelante, 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, lo cual facilita un mejor entendimiento de los fenómenos asociados a las ondas.

Si la altura de la onda H es pequeña con respecto a L o h , es decir $H/L \ll 1$ o $H/h \ll 1$, al movimiento resultante se lo denomina de pequeña amplitud, de amplitud infinitesimal o lineal. Cuando el valor de estos parámetros es grande las ondas se denominan de amplitud finita o no lineal. Obsérvese que para que una onda sea considerada de amplitud finita, no es necesario que la altura de la misma sea excepcionalmente grande sino que su altura sea grande respecto a L o h .

Dependiendo de su profundidad relativa, h/L las ondas se clasifican en:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad \textit{profundidades indefinidas}$$

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad \textit{profundidades intermedias}$$

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad \textit{profundidades reducidas}$$

En profundidades indefinidas la onda no es capaz de sentir la presencia del fondo.

Dado que la profundidad relativa puede ser expresada igualmente en función del parámetro número de onda, k , esta clasificación puede hacerse también basándose en kh .

$$kh > \pi \quad \textit{profundidades indefinidas}$$

$$\frac{\pi}{10} < kh < \pi \quad \textit{profundidades intermedias}$$

$$kh < \frac{\pi}{10} \quad \textit{profundidades reducidas}$$

Esta clasificación es importante pues se verá que en función de la misma pueden encontrarse expresiones asintóticas de más magnitudes asociadas a las ondas que simplifican notablemente el cálculo.

Dado que el movimiento de las ondas se caracteriza por H, L y h y que hasta ahora solo se han presentado parámetros adimensionales que toman dos de estas magnitudes, parece lógico pensar que estas tres magnitudes se puedan utilizar para definir un parámetro adimensional único que pueda ser utilizado para clasificar los diferentes tipos de movimientos. Este parámetro es conocido como el **número de Ursell, Ur** y se define como:

$$Ur = H \frac{L^2}{h^3} = \frac{\delta}{\mu^2}$$

Como se puede apreciar, este número resulta del cociente entre un parámetro que define la no linealidad de la onda considerada, δ (podría ser ε) y otro que tiene la información relativa a la dispersividad de la onda en cuestión, μ .

Es necesario hacer constar, dependiendo de los autores, que el número de Ursell se define en función de la amplitud de la onda o del número de onda en lugar de la altura y longitud respectivamente. Por ello, y aunque conceptualmente el significado de este parámetro es siempre el mismo, sus valores numéricos varían de forma importante por lo cual es preciso tener clara la definición empleada antes de realizar cualquier interpretación.

El número de Ursell es un parámetro importante pues sirve para definir el régimen al que corresponden las ondas y, por tanto, ayuda a seleccionar la teoría más adecuada en cada caso.

2.1.4 Regímenes y teorías de ondas

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

Más aún, desde el punto de vista matemático las ecuaciones generales que gobiernan la mecánica de ondas pueden ser adimensionales de tal forma que los parámetros ε, δ, μ queden aparentes. En función del valor que tomen estos parámetros puede realizarse la manipulación de las ecuaciones más generales, llegando a expresiones de las ecuaciones más simples a través de las que se pueden obtener soluciones analíticas, especialmente utilizando teoría de las perturbaciones cuando alguno de estos parámetros es pequeño.

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

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

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

Régimen	kh o h/L
<i>Stokes</i>	≥ 1
<i>Onda larga</i>	$\ll 1$

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

Por ejemplo, en el **régimen de Stokes**, si las ondas son de pequeña amplitud, es decir $\delta \ll 1$ o $\varepsilon \ll 1$, la teoría correspondiente es la **teoría lineal de ondas, teoría de ondas de pequeña amplitud, teoría de Airy** o **teoría de Stokes de 1er orden**, donde todos los nombres corresponden a la misma teoría. Esta teoría es la más simple de todas y de gran aplicación por lo que será desarrollada con más detalle más adelante. A medida que el valor de ε aumenta, aumenta también el carácter de no lineal de la onda y dentro del régimen de Stokes es necesaria la aplicación de otras teorías como son **Stokes II, Stokes III**, y de órdenes superiores. Es decir, a medida que se aumenta el orden de la solución y la no linealidad

umenta, la solución obtenida mediante el 1er orden o teoría lineal se va corrigiendo con nuevos términos.

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

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

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

El caso en el que el término de dispersión es tan importante como el de no linealidad, $\delta \sim O(\mu^2)$ da lugar a la teoría de Boussinesq. Las ondas solución de la teoría de Boussinesq se consideran débilmente no lineales, puesto que $\delta \sim O(\mu^2) \ll 1$ y débilmente dispersivas, dado que la celeridad de la onda depende débilmente de la longitud y periodo de onda.

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

La Figura 9 representa la superficie libre correspondiente a las ondas más comúnmente empleadas con el fin de mostrar las diferencias.

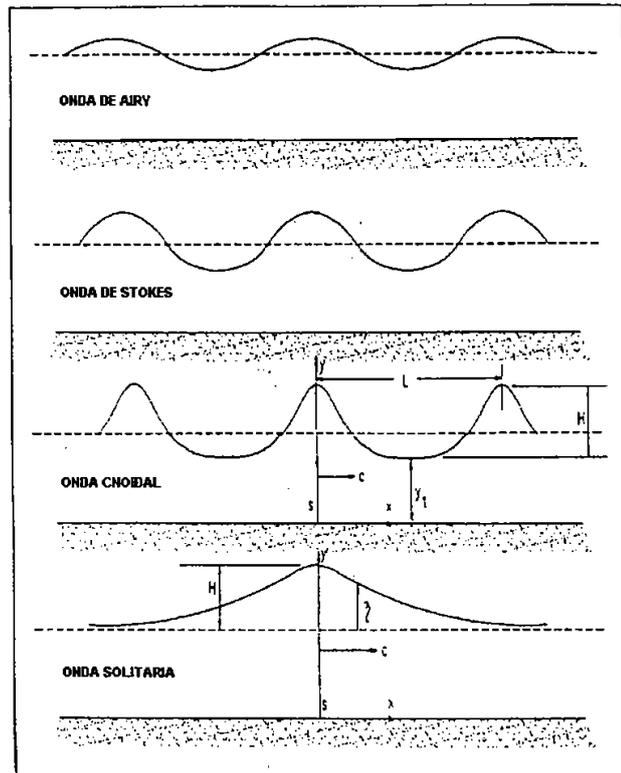


Figura 9. Perfiles de onda de acuerdo a las diferentes teorías.

2.1.5 Teoría lineal de ondas.

Para poder llevar a cabo el estudio del oleaje, y del movimiento oscilatorio en general, es necesario dotarse de una herramienta matemática que permita su representación. 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 (es la teoría de oleaje más simple, también denominada teoría de **Airy**), 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 10.

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

Donde 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; λ 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, ρ , 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).

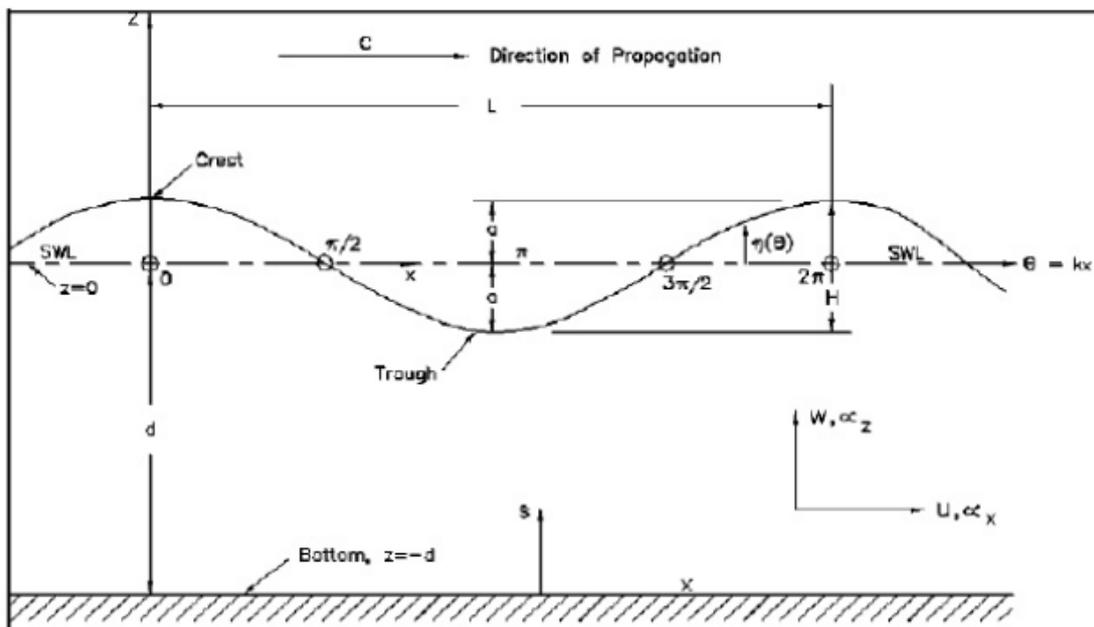


Figura 10. Representación de una onda de Airy.

2.2 ANALISIS DE OLEAJE

2.2.1 Descripción estadística

La descripción estadística del oleaje se basa en un análisis pormenorizado, ola por ola, del registro de estado del mar. En la Figura 11 se observa un registro de oleaje en el cual, con una serie de criterios, se separan las olas, obteniendo para cada una su altura H , periodo T , longitud L , etc.

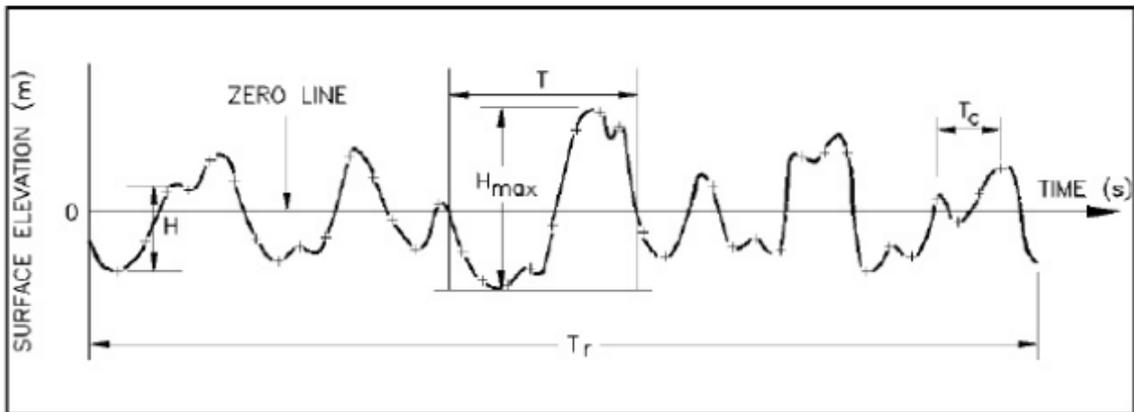


Figura 11. Parámetros representativos del oleaje.

De esta manera se obtendrá una muestra, consistente en una serie de datos representando cada una de las características de cada una de las olas. Y es en esta muestra en la que se obtienen los parámetros estadísticos que representan el estado del mar.

2.2.2 Parámetros del oleaje

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

Dado que se asumen que una variable del oleaje en un estado de mar es un proceso estacionario ergódico gaussiano, dos parámetros estadísticos son suficientes para caracterizar probabilísticamente el proceso. Los parámetros estadísticos más empleados son: un **parámetro de altura de ola** y **uno de periodo**. Estos parámetros estadísticos se pueden definir de diferentes maneras. Entre ellos, los más utilizados se describen a continuación:

- **Altura de ola significativa**

Tradicionalmente, se ha definido la altura de ola significativa como aquella que percibe un observador habituado al mar. Para calcularla, supóngase que se ordena de mayor a menor el registro de oleaje. Pues bien, la altura de ola significativa, denotada como H_s o $H_{1/3}$, es la media aritmética del tercio de olas más altas del registro. Escrito matemáticamente, si el registro ordenado de mayor a menor tiene N olas, la altura de ola significativa será:

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

- **Altura de ola media**

La altura de ola media del registro es simplemente, la media de las alturas de ola simples, es decir:

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

- **Altura de ola media cuadrática**

Algunos autores sostienen que es la ola que mejor representa la energía de un estado del mar. Su expresión es la siguiente:

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

- **Otras alturas significantes**

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

En la siguiente Figura 12 se muestran los errores cometidos al escoger uno u otro parámetro para describir el estado del mar.

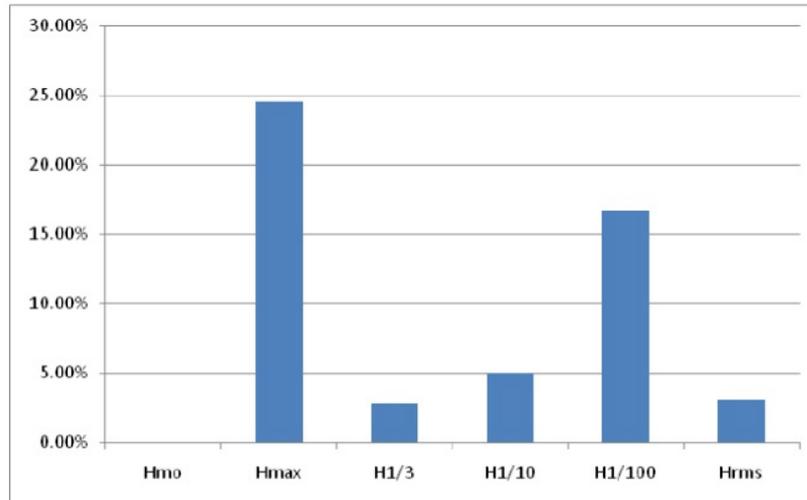


Figura 12. Error cometido en la estimación del estado del mar con cada parámetro estadístico.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2.3 Espectros de oleaje

El espectro de energía describe como la energía se distribuye sobre un rango de frecuencias y direcciones. La energía (m_2s ó 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 (η, 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.

El espectro energético representa el oleaje objeto de interés en el dominio de la frecuencia, de la misma forma que la serie temporal lo representa en el dominio del tiempo. Así, como muestra la Figura 13, una serie temporal (dominio del tiempo) la podemos transformar a su espectro energético (dominio de la frecuencia).

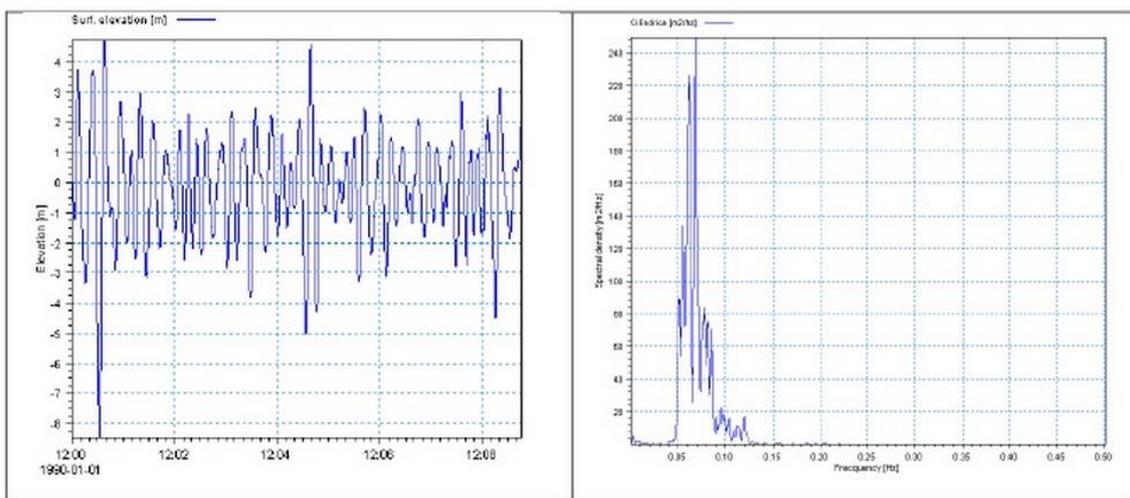


Figura 13. Serie temporal en el dominio del tiempo con su respectivo espectro energético.

2.2.4 Espectros de un estado del mar

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, como se puede observar en la Figura 14. Hallando y superponiendo los espectros (líneas verticales) de cada oleaje simple, se puede hallar el espectro energético del temporal, que tendrá un aspecto similar a la Figura 15. Obviamente, este sistema es inabordable, y por ello se utilizan herramientas como la FFT (transformada rápida de Fourier).

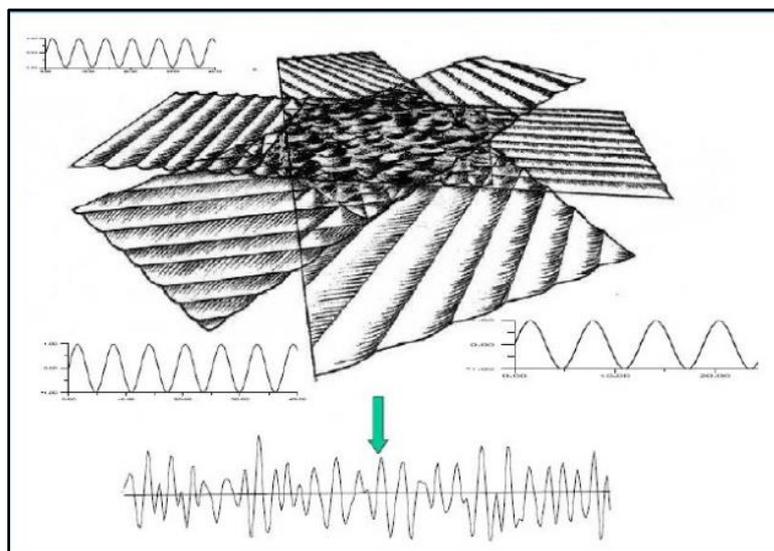


Figura 14. Superposición de estados del mar.

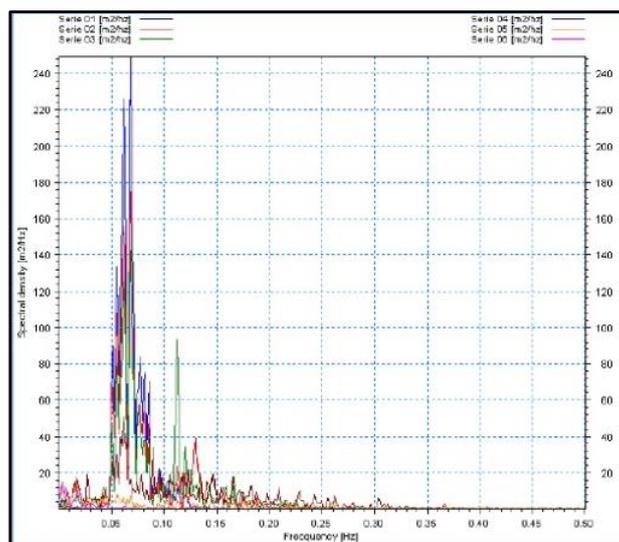


Figura 15. Espectros energéticos.

2.2.5 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 16).

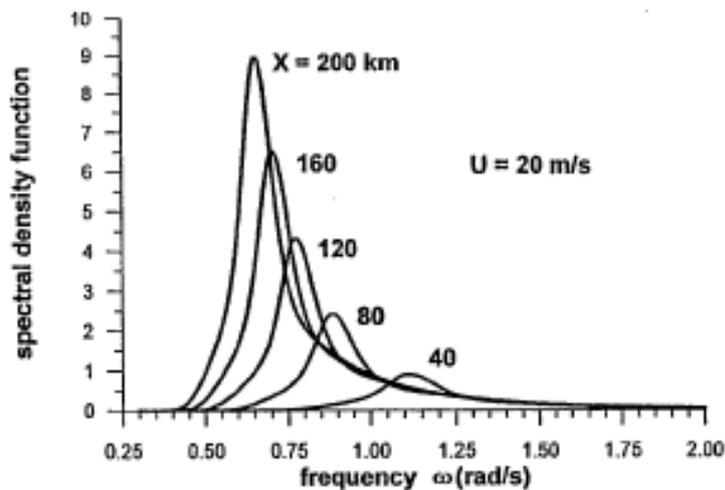


Figura 16. Evolución del espectro con el fetch

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, 'α' parámetro de escala, γ coeficiente de apuntamiento, 'U10' velocidad del viento a 10 m. sobre el nivel del mar, g la aceleración de la gravedad (9.80m/s²) y σ es el desvío del espectro con relación a la frecuencia pico.

2.2.6 Separación del oleaje incidente y reflejado

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

La reflexión de un tren de olas es el proceso por el cual parte de la energía no disipada del tren genera, en incidir sobre un obstáculo, otro tren de olas en sentido contrario al incidente. La superposición de los dos trenes compone la **ola total**. La formación de esta ola total dependerá de factores como el coeficiente de reflexión, la distancia respecto a la estructura, el periodo, la profundidad y la pendiente del talud. Para poder obtener estos coeficientes de reflexión pueden utilizarse diferentes métodos de separación del oleaje total en incidente y reflejado.

Las técnicas más utilizadas para un fondo cuasi horizontal y propagación en una dirección, son las técnicas de Mansard y Funke (1980), Goda y Suzuki (1976) o Frigaard y Brorsen (1995). Se basan en medir las olas en 2 o 3 puntos puestos a corta distancia entre

ellos. Las técnicas descritas se aplican a fondos horizontales o casi-horizontales, donde la longitud de onda no varía de manera significativa sobre la longitud del sistema de sensores. Para un fondo variable se puede utilizar el método de Baldock. Y Simmonds (1999) o de Battjes et al. (2004), para ondas largas. En este trabajo se utiliza el método de Baldock. Y Simmonds (1999) que presenta la ventaja de utilizar solamente dos sensores.

2.3 TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN CANAL 2D

2.3.1 Asomeramiento

En la naturaleza, a medida que un tren de onda se aproxima hacia la costa con la consiguiente variación en la profundidad, se observa un cambio en la altura y en la longitud de onda. A este proceso de transformación de la onda se le llama asomeramiento (Figura 17).

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

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

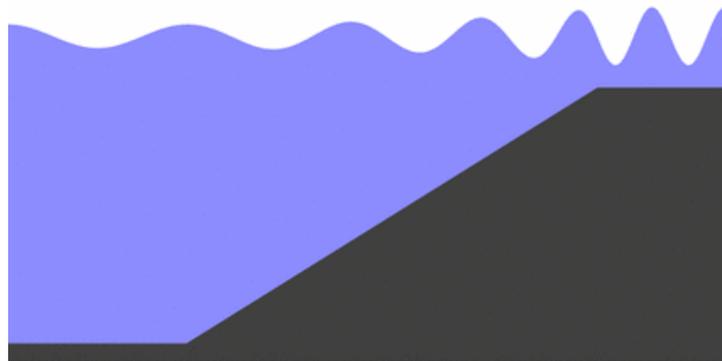


Figura 17. Esquema de Asomeramiento (shoaling).

2.3.2 Rotura

A medida que las ondas se propagan hacia la costa se asomeran aumentando su altura de ola progresivamente. Sin embargo, este aumento no es limitado sino que a una profundidad

determinada, una onda de características dadas se vuelve inestable hasta que rompe disipando una enorme cantidad de energía en forma de turbulencia, fundamentalmente. En definitiva, las olas rompen cuando alcanzan un estado crítico en su movimiento que está afectado por la configuración del fondo así como por otros factores.

La ola shoaling causa que la altura de la ola se incremente hasta el infinito en aguas poco profundas. Esto tiene un límite físico dado por la pendiente de la ola: H/L . Cuando este límite es excedido, la ola rompe y se disipa energía.

La altura de ola es función de la profundidad. Los parámetros de rotura se identificarán con el subíndice (b). El tipo de rotura es función de la pendiente de la playa (m) y la relación (H/L). Esta se combina en el parámetro de similaridad de surf:

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

Varios autores han clasificado el proceso de la rotura en los siguientes tipos:

- Decrestamiento (spilling): En la cresta de la ola aparecen espuma, burbujas y turbulencia y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se decresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda. Pendientes de playas poco elevadas y/o olas con pendiente (playas disipativas). Figura 18



Figura 18. Tipo de rotura Spilling.

- Voluta (plunging): La mayor parte del frente de la onda adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire precipita contra la base de la onda originando un salpicón y roción de agua. Pendientes de playas más elevadas y/o olas "planas". Figura 19



Figura 19. Tipo de rotura Plunging.

- Colapso (collapsing): La parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta truncada, ya que el punto del frente, donde la onda voltea o se desmorona, está delante y por debajo de la cresta de la ola. Pendientes de playas aún más elevadas y con sedimento grueso. Figura 20



Figura 20. Tipo de rotura Collapsing.

- Oscilación (surging): El frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia. Pendientes de playas mucho más elevadas y con sedimento grueso. Figura 21



Figura 21. Tipo de rotura Surging.

2.3.3 Ascenso-descenso (Run-Up)

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

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

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.

2.3.4 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.

El grado de reflexión de una estructura suele cuantificarse mediante el coeficiente de reflexión, el cual representa el cociente entre la altura de la ola reflejada y la altura de la ola incidente, en la hipótesis lineal de que un tren regular de ondas se refleja parcialmente sin cambio de frecuencia. Cuando las olas son muy peraltadas, o la estructura provoca fuertes disipaciones de energía o la rotura del oleaje, los procesos no lineales del flujo sobre la estructura hacen que la composición frecuencial del tren reflejado sea sustancialmente diferente del incidente, por lo que la reflexión debe definirse mediante la función de transferencia entre el espectro incidente y el reflejado. A continuación en la Tabla 2 se presentan algunos valores característicos del coeficiente de reflexión de las estructuras:

Tabla 2. Coeficientes de reflexión típicos de estructuras costeras.

Tipo de Estructura	Coefficiente de reflexión
Dique vertical no rebasable	0.7 - 1
Dique vertical rebasable	0.5 - 0.7
Dique en talud de escollera (pendiente 1:2 a 1:3)	0.3 - 0.6
Dique en talud de bloques artificiales de hormigón	0.3 - 0.5
Dique vertical dissipador de energía	0.3 - 0.8
Playa natural	0.05 - 0.2

2.3.5 Transmisión

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

CAPITULO 3: ENSAYOS EXPERIMENTALES

3.1 El canal de 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 predeterminados (ejemplo espectros de olas del tipo JONSWAP, Pierson Moskowitz, 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 (Figura 22). 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 22. 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, vistas en la Figura 22. Este tren de ondas es conocido como oleaje de viento (*wind waves*). 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, Pierson Moskowitz, 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 (Figura 23) es que cuenta con un Sistema de Absorción Dinámica, es decir que permite corregir el oleaje generado, restándole las interferencias u ondas parasitas 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 23. 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 (Figura 24) 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.

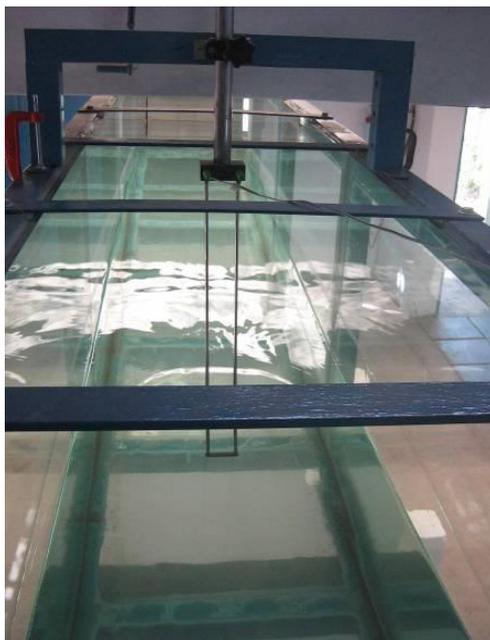


Figura 24. Sensor de tipo resistivo

3.2 Metodología

El canal de oleaje donde se desarrollarán los ensayos, está subdividido en diferentes tramos (Figura 25):

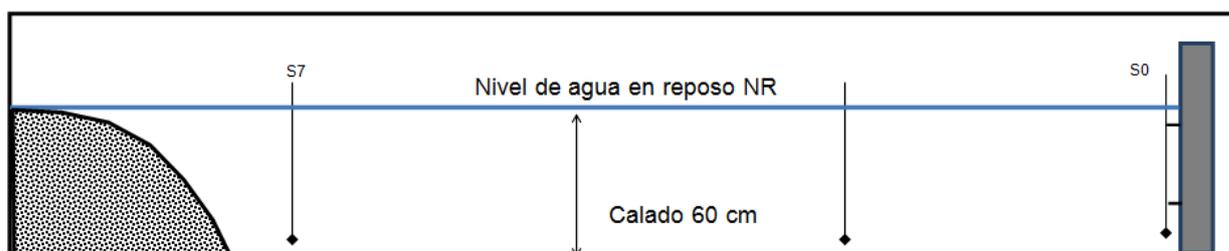


Figura 25. Esquema con playa disipativa

- Un tramo de desplazamiento de la pala y estructura absorbente por detrás, de 1.5 m.
- Un tramo plano de 18 m de largo,
- Una playa disipativa parabólica de 3 m de largo

A continuación se muestra el esquema con la estructura puesta en el canal (Figura 26).



Figura 26. Esquema con estructura

- Un tramo de desplazamiento de la pala y estructura absorbente por detrás, de 1.5 m.
- Un tramo plano de 18 m de largo,
- 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 3 m desde la pala para verificar el oleaje lejos de la estructura. Originalmente se tenían más sensores a lo largo del canal pero para realizar las mediciones, en este caso, solo se necesitan los sensores mostrados en la Figura 26.

Se describen las actividades realizadas para definir las combinaciones de (H_s, T_p) a ensayar. Se utilizaron espectros de oleaje tipo JONSWAP con parámetro de apuntamiento $\gamma=3.3$. La metodología adoptada se describe a continuación. Se separó el trabajo en diferentes fases:

- 1- Fase 1:** Pruebas de capacidad de generación de oleajes;
- 2- Fase 2:** Determinación de las combinaciones (H_s, T_p) a obtener a pie de dique;
- 3- Fase 3:** Calibración de la absorción dinámica;
- 4- Fase 4:** Ensayos finales;

Por datos obtenidos de forma estadística, se tienen dos tipos de escenarios probables para el oleaje sobre la Represa Jorge Cepernic. En un trabajo conjunto con el INA se definen cuál de estos dos escenarios es el que mejor se puede reproducir en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica. Los escenarios están definidos por tres parámetros característicos: tirante de agua, altura de ola y periodo espectral. Teniendo en cuenta la geometría del canal se elige el escenario que mejor se adapta a las condiciones.

En lo que corresponde a la **Fase 1**, se intentó reproducir los parámetros de oleaje nombrados anteriormente en el canal con playa disipativa, sin la presencia de la estructura. Lo que se observó fue que la pala generadora de oleaje presentaba un comportamiento errático, haciendo no posible la generación de esta condición. Se supuso que el error en principio podía

deberse a periodos de pico pequeños y alturas de olas significantes grandes. Es por ello que se decidió buscar los valores límites de T_p y h_s que la pala sea capaz de reproducir. Se realiza los siguientes ensayos:

- Pruebas conservando la altura y aumentando el periodo, manteniendo la escala.
- Conservando periodo y disminuyendo altura, manteniendo la escala.

Se encontró problemas en la simulación de oleajes por cortos periodos se probaron diferentes escalas para evaluar la posibilidad de realizar simulaciones a escalas lo suficientemente grandes para una correcta generación de oleajes cercanos a las condiciones de "prediseño".

Luego de estos análisis se halló rangos de los parámetros de oleaje donde la pala generadora se comparta satisfactoriamente.

Después de haber obtenido un rango de oleajes admisibles sin la estructura puesta en el canal, se comienza con la **Fase 2** donde se determinan diferentes combinaciones de oleajes irregulares que son posibles simular en el canal, ahora con la estructura puesta.

Ahora bien, los valores que se le ingresó a la pala generadora de oleaje no eran los mismos que se obtenían a pie de dique (a pie de la estructura), por el fenómeno de reflexión que tiene el oleaje cuando se ensaya con la estructura puesta. Por ello es necesario separar la ola incidente de la reflejada. El método adoptado para la separación del oleaje incidente y reflejado es el método de Baldock. 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. 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 3 m desde la pala para verificar el oleaje lejos de la estructura.

Luego se comienza con la **Fase 3**, donde se realizó la calibración de la absorción dinámica para las combinaciones de oleajes seleccionados. La calibración ha consistido en la búsqueda de la ganancia óptima 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%).

Hasta aquí, todo el trabajo sirvió para conocer el comportamiento de la pala generadora de oleaje y las limitaciones de la misma en el canal de análisis.

Luego de todos estos ensayos previos, inicia la **Fase 4** donde se definen los ensayos finales a realizar por ambos laboratorios (UNC, INA). Y sobre los mismos, se analizan todos los parámetros de oleaje:

- Sobre pie de dique (con estructura y separación de ola incidente-reflejada).
- Sobre pie de dique (con playa disipativa).

Teóricamente, ambos resultados deberían dar igual ya que la absorción dinámica permite “tomar” esa ola reflejada y “restarla o sumarla” a la incidente para lograr a pie de dique los valores estipulados. Además se hace un análisis energético total del espectro.

3.3 Configuración experimental

3.3.1 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 27



Figura 27. Estructura usada en modelo físico de la represa.

3.3.2 Instrumental y software de análisis

En una primera fase, con la playa disipativa y con estructura pero sin absorción activada se han utilizado 6 sensores de tipo resistivos: 1 sensor próximo a la pala, 4 sensores para medir la reflexión con el método de HR Wallingford y un sensor en la posición

correspondiente a pie de dique. Se ha comprobado que la reflexión medida con el método de HR es equivalente a la reflexión obtenida con el método de Baldock que utiliza solamente dos sensores. Por lo tanto, el método de Baldock permite utilizar menos sensores. El esquema final prevé el uso de un sensor próximo a la pala y dos sensores localizados a pie de dique para obtener la señal incidente y, al mismo tiempo, señal reflejada. Figura 28



Figura 28. Sensores de nivel de tipo resistivo para medir la altura de ola y separar la señal incidente y reflejada.

3.3.3 Diseño y construcción de playa absorbente

En la extremidad final del canal se ha diseñado y construido una playa de absorción pasiva en piedras. La misma resulta de suma importancia en el análisis ya que al disipar más del 95% de la energía del oleaje, sirve para poder calibrar la absorción dinámica de la pala mecánica, tema que será abordado en el próximo capítulo.

Las formas de playas pasivas en piedras comúnmente utilizadas son:

- Rectas de una pendiente suave,
- De dos tramos rectos con diferente pendiente siendo el primero (desde la llegada del oleaje) más pronunciado y el segundo más suave;
- Parabólicas.

Un buen sistema de absorción debe de tener buena absorción para diferentes peraltes del oleaje (“Bulk Reflection” $<10\%$). En otros trabajos realizados en el LH, 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:

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

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 δ 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 $L=T\sqrt{gh}$, con la condición de $h=0$ para $x=0$, obteniéndose:

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

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 decrecimiento, 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 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 $A=0.0306$. Se puede observar la playa desde distintos puntos en la Figura 29, Figura 30.



Figura 29. Playa parabólica vista lateral



Figura 30. Playa disipativa vista desde arriba

3.3.4 Absorción Dinámica

La absorción dinámica funciona para corregir el oleaje generado restándole las interferencias u ondas parásitas que se producen por reflexión en la estructura o la playa, que se vuelven a reflejar en la pala mecánica (Figura 31).

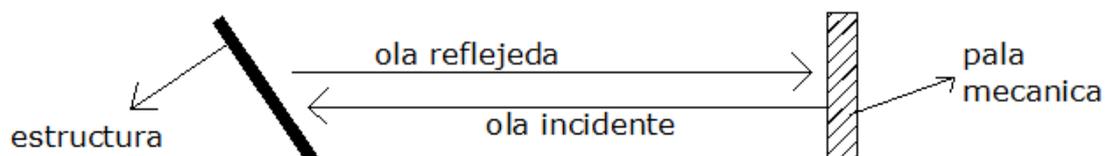


Figura 31. Esquema de oleaje con Absorción Dinámica.

Si no se tuviese absorción dinámica se generaría el efecto de ola re-reflejada (Figura 32).

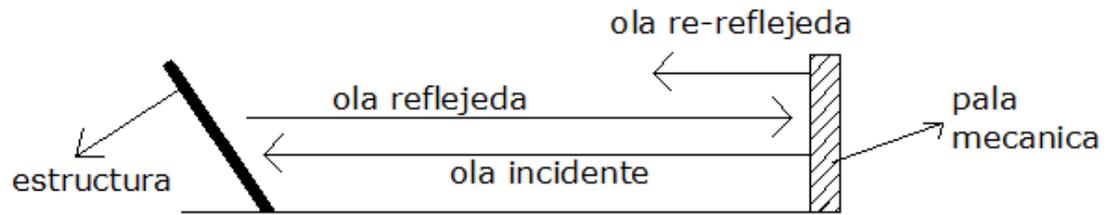


Figura 32. Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica.

CAPITULO 4: RESULTADOS ANÁLISIS DEL OLEAJE

4.1 Pruebas de capacidad y generación de oleaje. Fase 1

En esta primera fase del trabajo se ha definido la máxima escala posible y los ensayos se han realizado colocando la playa disipativa, sin introducir la estructura en el canal. El objetivo ha sido comprobar la correcta circulación de oleajes cercanos a las condiciones de “prediseño”.

Los parámetros iniciales (prototipo) que fueron asignados desde el INA son dos escenarios correspondientes a dos niveles de presa.

Escenario 1:

Tirante de agua =27,10 m	27.1
Altura de ola Hs= 3,10 m	3.1
Período de pico espectral Tp=5,3 s	5.3

Escenario 2

Tirante de agua =28,10 m	28.1
Altura de ola Hs= 2,30 m	2.3
Período de pico espectral Tp=4,8 s	4.8

Lo primero que se hizo fue definir la escala y ver si la pala generadora podía reproducir esa condición. Teniendo en cuenta la geometría del canal, para definir la escala de modelo, se logró abordar a que la escala 1:45, en principio, era la más adecuada. Así se definió el escenario de trabajo N°1.

ESCENARIO 1	Escala = 45	
h =	27,1	m =====> 0,60 m
Hs =	3,1	m =====> 0,07 m
Tp =	5,3	s =====> 0,79 s

Estos parámetros de oleaje se intentaron reproducir en el canal con playa disipativa, sin la presencia de la estructura. Lo que se observó fue que la pala generadora de oleaje presentaba un comportamiento errático, haciendo no posible la generación de esta condición. Se supuso que el error en principio podía deberse a “Periodos Pico” pequeños y “Alturas de olas significantes” grandes.

Es por ello que se decidió buscar los valores límites de Tp y Hs que la pala sea capaz de reproducir. Conservando la escala 1:45 se realizaron los siguientes ensayos:

- a) Pruebas conservando la altura y aumentando el periodo, manteniendo la escala.

b) Conservando periodo y disminuyendo altura, manteniendo la escala.

Al encontrar problemas en la simulación de oleajes por cortos períodos (con $T_p < 1$), se probaron **c) Diferentes escalas**, para evaluar la posibilidad de realizar simulaciones a escalas lo suficientemente grandes para una correcta generación de oleajes cercanos a las condiciones de “prediseño”. En efecto, a mayores escalas, aumentan los períodos en modelos y se mejora el movimiento de la paleta mecánica. Esta fase ha permitido establecer el funcionamiento de la paleta generadora del oleaje para las condiciones de “prediseño”.

En cuanto a las pruebas **a)** se realizaron 3 ensayos manteniendo la altura en $H_s = 0.07$ y variando el periodo entre T_p (1 – 1.10).

En cuanto a las pruebas **b)** se realizó un solo ensayo manteniendo $T_p = 0.79$ y $H_s = 0.044$.

En cuanto a las pruebas **c)** se hicieron 30 ensayos con una variación de escala entre E(30-45), h (0.515-0.60), H_s (0.04-0.12), T_p (1.1-1.45).

Como conclusión de esta etapa se propuso trabajar con la escala 1:45 con una profundidad de 0.60m, la cual permite que los oleajes seleccionados se propaguen en condición de aguas profundas, mientras que la elección de escalas superiores cambian la condición de propagación a aguas intermedias, aunque se permite generar oleajes más grandes. En definitiva, una escala más grande 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. Tabla 3

Se determinaron las siguientes características en modelo:

Tabla 3. Rango de valores utilizados en los ensayos de prueba

H_s (m)	T_p (s)	h(m)	Escala
0.04-0.12	1.10-1.45	0.515-0.60	1:30-1:45

4.2 Determinación de combinación (H_s - T_p) a pie de dique. Fase 2

Después de haber obtenido un rango de oleajes admisibles sin la estructura puesta en el canal, se han determinado diferentes combinaciones de oleajes irregulares que han sido posibles simular en el canal, ahora con la estructura puesta.

Es importante saber la diferencia entre “la combinación de H_s , T_p como valor objetivo a pie de dique” y “la combinación H_s , T_p como valor real medido por sensor a pie de dique”. La idea de hacer tantos ensayos es ver y calcular esa diferencia, buscando el menor ΔH entre ambos. Se realizaron 4 ensayos sin absorción dinámica con la estructura puesta: T011, T021, T031, T041 (Tabla 4).

Tabla 4. Ensayos realizados sin Absorción Dinámica, con estructura.

Ensayo	Calado (h)	Hs(m)	Tp(s)
T011	0,6	0,09	1,1
T021	0,6	0,09	1,2
T031	0,6	0,05	1,1
T041	0,6	0,05	1,2

Lo que se pudo observar es que los Test_T011 y Test_T021 mostraban mejor resultado y menor ΔH . Cabe aclarar que cuando se habla de “valor objetivo” es aquel que sale de escalar el prototipo al modelo físico empleado de forma directa. Y en cuanto “al valor real” es aquel medido con los sensores a pie de dique (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación entre valores objetivos y reales de Hs (metros), Tp (segundos) con estructura.

Test	Escala	Señal a la pala		Valor objetivo a pie de dique		Valor real en sensor		Diferencia ΔH
		Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)
Test_T011	45	0,09	1,1	0,069	0,79	0,077	1,19	0,008
Test_T021	45	0,09	1,2	0,069	0,79	0,08	1,23	0,011

Se realizan los mismos ensayos para el caso de playa disipativa mostrando los siguientes resultados (Tabla 6)

Tabla 6. Comparación entre valores objetivos y valores reales de Hs, Tp con playa disipativa.

Test	Escala	Señal a la pala		Valor objetivo a pie de dique		Valor real en sensor		Diferencia ΔH
		Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)
Test_T011	45	0,09	1,1	0,069	0,79	0,068	1,08	-0,001
Test_T021	45	0,09	1,2	0,069	0,79	0,068	1,23	-0,001

Como conclusión de esta etapa se observa que la diferencia de alturas (ΔH) entre ensayos **con estructura** y **con playa disipativa** es muy notable. Esto se debe a que en el caso de la playa se tiene una reflexión muy pequeña, menor al 5 % del oleaje incidente, lo que deriva en ΔH pequeños. No sucede lo mismo con la estructura, que se obtienen ΔH considerables y porcentajes de reflexión del orden del 60-70%. Por esta razón, se utiliza la absorción dinámica para contrarrestar ese efecto, desarrollado en el próximo capítulo.

4.3 Calibración de la absorción dinámica. Fase 3

En esta etapa se persigue la calibración propiamente dicha de la absorción dinámica. Recordemos que la absorción dinámica funciona para corregir el oleaje generado restándole las interferencias u ondas parásitas que se producen por reflexión en la estructura o la playa, que se vuelven a reflejar en la pala mecánica

Para las combinaciones de oleajes seleccionados, se realizó la calibración de la absorción dinámica. La calibración ha consistido en la búsqueda de la **ganancia óptima** que se le debe aplicar a la pala mecánica para que los oleajes incidentes con estructura sean similares a los oleajes incidentes con playa disipativa. Es decir restar los efectos de reflexión.

La ganancia óptima se compone de dos partes. La **ganancia 1 (Factor de reducción de la energía)**, que tiene un intervalo de valores entre 0 y 1, básicamente es un factor de escala. Por ejemplo si se tiene un $H_1=0.1$, $T_p=1.1$ y se le aplica una ganancia de 0.5, el oleaje conserva el periodo y el $H_s=0.5 H_1$. La **ganancia 2** es un factor de calibración.

En el esquema de la Figura 33 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.

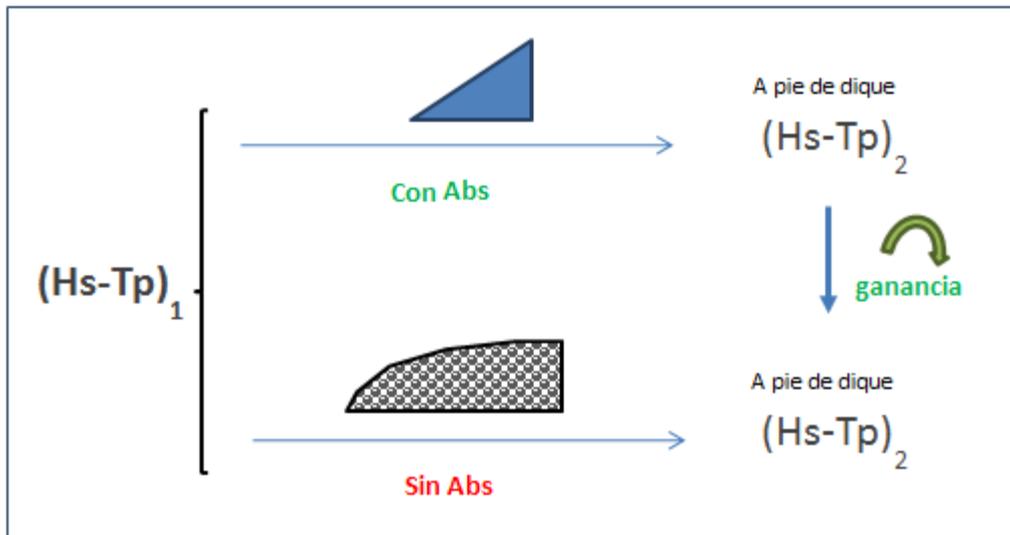


Figura 33. Esquema del proceso de calibración de la absorción dinámica.

Luego de realizar muchas pruebas y combinaciones de oleaje en el canal, se decide avanzar y focalizar el análisis en dos ensayos particulares. Siempre siguiendo el Escenario 1, ya definido anteriormente, desarrollamos los siguientes Test:

- Test_T011
- Test_T021

Se eligen estos dos ensayos por la misma razón que se especificó en el apartado anterior. (Tabla 7).

Tabla 7. Ensayos analizados, comparación resultados oleajes sin separar, separados y con playa disipativa.

Test T	E	h	Hs	Tp	VALORES DE LAS SERIES SIN SEPARAR				VALORES DE LAS SERIES INCIDENTES DESPUES DE SEPARAR						
					Gain	Hs(S7)	Hmo(S7)	Tp(S7)	Gain	Hs(S7)	Hmo(S7)	Tp(S7)	Hs(S7)	Hmo(S7)	Tp(S7)
					OLA con estructura en S7				OLA con estructura en S7				OLA con playa DISIPATIVA S7		
Test_T011	45	0,6	0,09	1,1	sin	0,102	0,11	1,11	sin	0,077	0,08	1,19	0,069	0,07	1,08
					sin (0.8)	0,091	0,1	1,11	sin (0.8)	0,066	0,067	1,11			
					sin (0.9)	0,097	0,09	1,11	sin (0.9)	0,072	0,075	1,18			
					100(0.5)	0,083	0,09	1,11	100(0.5)	0,06	0,06	1,11			
					100(0.6)	0,096	0,1	1,11	100(0.6)	0,071	0,072	1,19			
					100(0.7)	0,106	0,11	1,11	100(0.7)	0,08	0,08	1,19			
Test_T021	45	0,6	0,09	1,2	sin				sin	0,079	0,081	1,22	0,068	0,07	1,23
					100(0.5)				100(0.5)	0,058	0,06	1,23			

Tabla 8. Tabla resumen de los Test analizados. (FR= Factor de Reducción de la energía, GANANCIA= suma de la ola reflejada)

Test		Sin Ganancia 2	Ganancia 1(FR)	Con Ganancia 2	Ganancia 1(FR)
Test_T011	Variabilidad	-	0.8-0.9	50-250	0.5-0.7
	Óptimo	-	-	100	0.5
Test_T021	Variabilidad	-	-	50-250	0.5
	Óptimo	-	-	100	0.5

En la Tabla 8 se puede observar que no se tienen valores para la columna “sin ganancia 2” ya que como se dijo anteriormente, se le debe aplicar una ganancia al ensayo con estructura para poder sumarle esa diferencia por la ola reflejada, que en el caso de la playa disipativa es menor al 5% y no afecta. Por otro lado la columna “Con Ganancia 2” expresa por un lado la **variabilidad o rango de parámetros ensayados**, llegando a un óptimo de 100. Para el Test_T021 se realizan los mismos ensayos llegando a la misma conclusión que el Test_T011 por lo que se puede concluir que la variación del periodo ingresado a la pala mecánica no varía la calibración de la absorción dinámica.

Analizando los ensayos se determinó que la **ganancia 1** que se le debe aplicar a la pala es de 0,5 y la **ganancia 2** de 100.

Como observación a esta etapa de calibración se pueden establecer algunas reglas de comportamiento:

- Ganancias superiores a 200, la pala hace movimientos erráticos y genera muchas salpicaduras sin formar bien la ola.
- Ganancias menores a 100, la pala genera olas más grandes.
- Factores de reducción mayores a 0,5 genera olas más grandes con periodos mayores también.

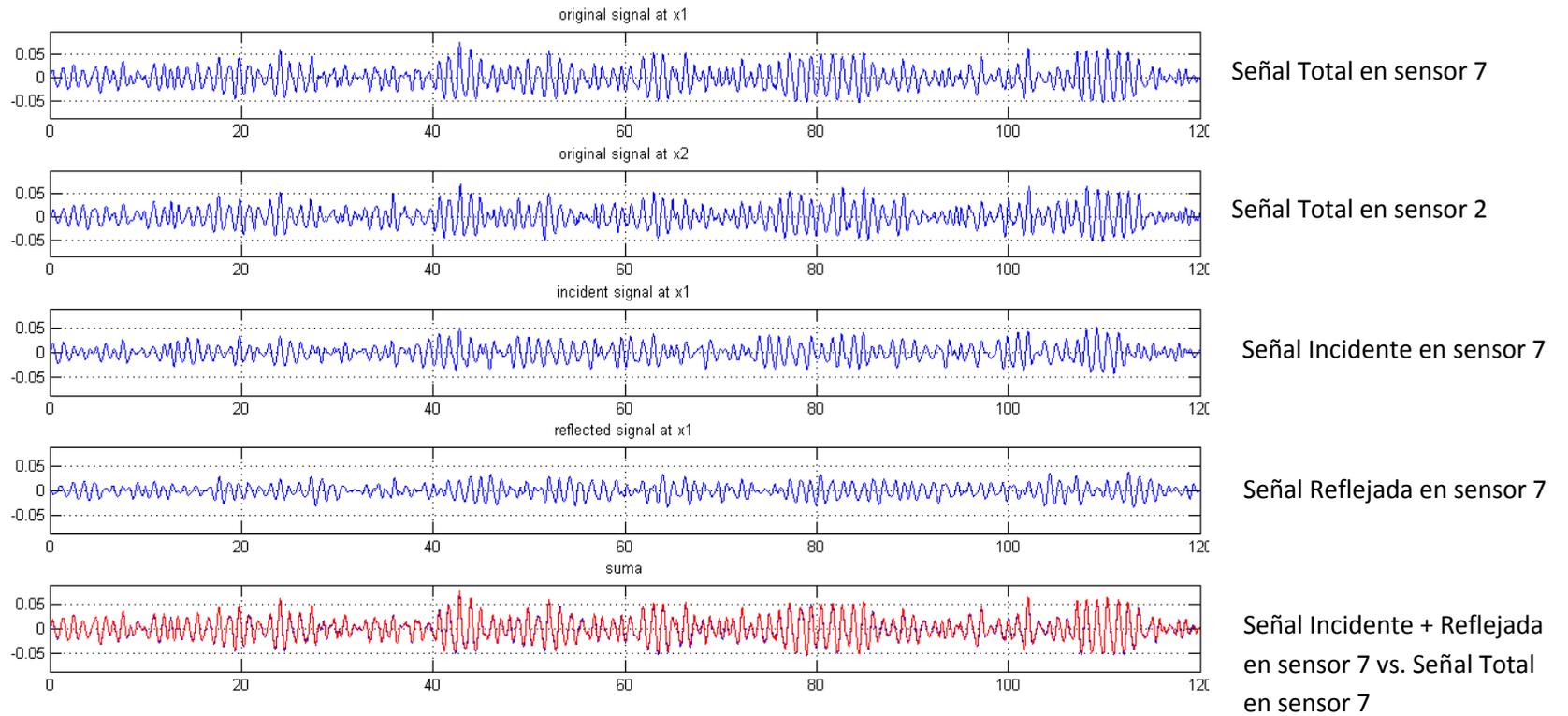


Figura 34. Señales Test_T011 (eje vertical Hs- eje horizontal Tiempo)

En la (Figura 34) se pueden ver 5 señales:

- Primer gráfico: señal total en sensor 7, último sensor (incidente + reflejada)
- Segundo gráfico: señal total en sensor 2, penúltimo sensor (incidente + reflejada)
- Tercer gráfico: señal incidente en sensor 7
- Cuarto gráfico: señal reflejada en sensor 7
- Quinto gráfico: Tercer gráfico + Cuarto gráfico en comparación con el primero.

En el último grafico se ve que las señales superpuestas son prácticamente iguales verificando la correcta separación de las mismas. En la Figura 35 vemos una imagen ampliada del Quinto gráfico para ver la superposición de forma más clara.

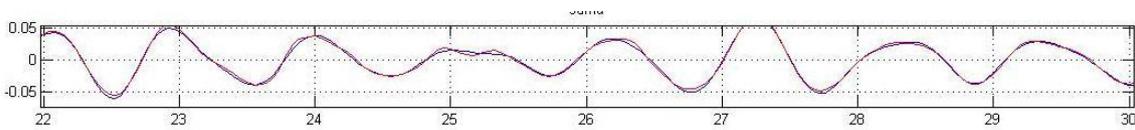


Figura 35. Superposición de oleaje total con suma incidente + reflejado.

El mismo análisis anterior se hace para el Test_T021 llegando a idénticas conclusiones (

Figura 36).

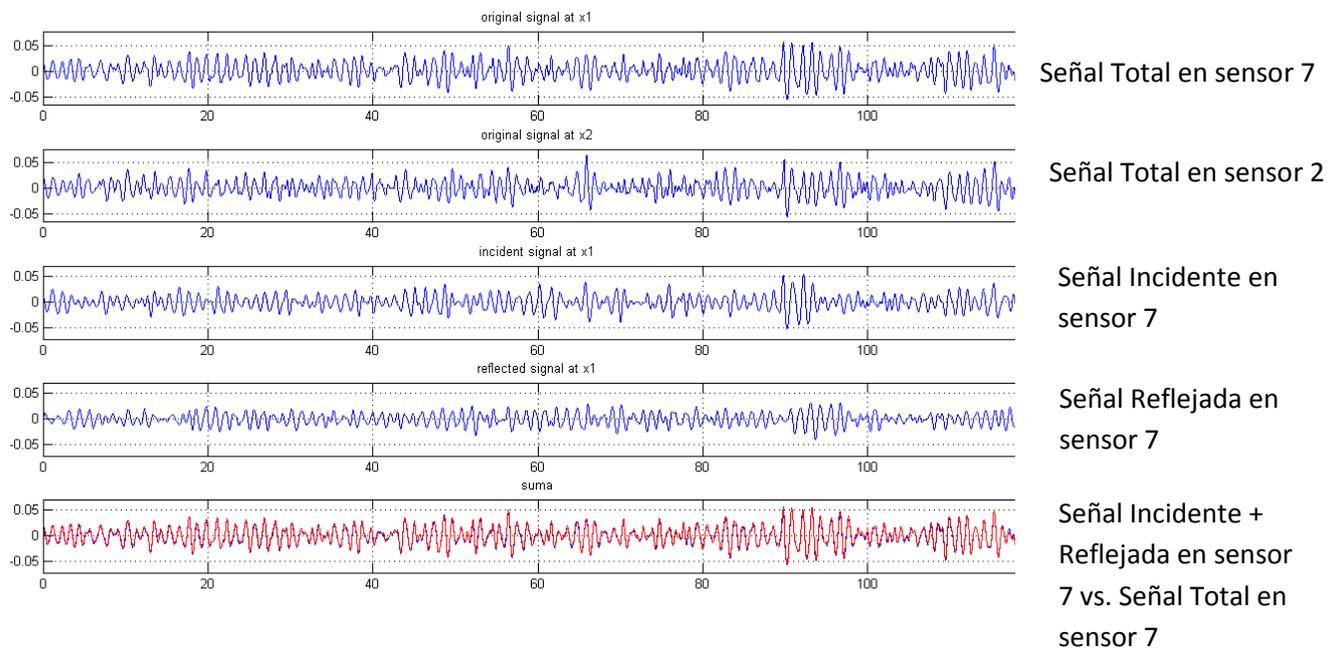


Figura 36. Señales Test_T021 (eje vertical Hs- eje horizontal Tiempo).

Luego de separar las ondas incidentes y reflejadas se procede a **comparar** los oleajes:

- Primero: Playa disipativa.
- Segundo: Con estructura sin Absorción.
- Tercero: Con estructura con Absorción.

Si se comparan los espectros 1 y 3 de la Figura 37 se ve claramente que tienen la misma forma y comportamiento, lo que demuestra el correcto funcionamiento de la absorción dinámica.

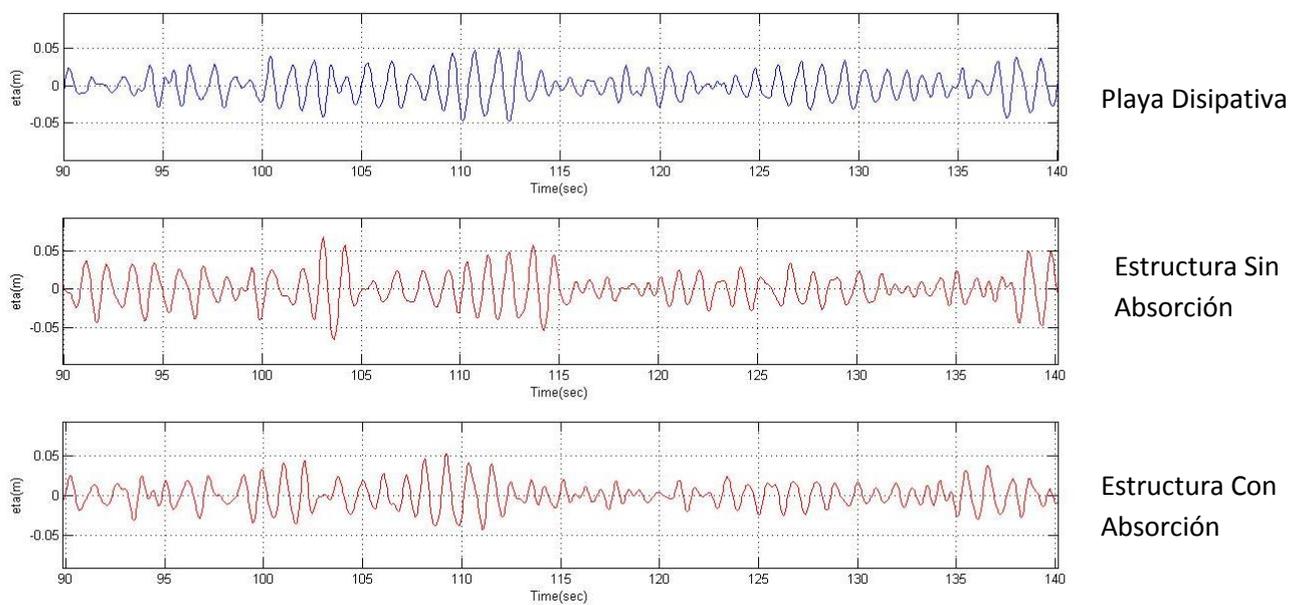


Figura 37. Comparación espectros Test_T011 (Playa disipativa, Estructura sin Absorción, Estructura con Absorción)

Se realizó el mismo análisis para el Test_T021 (Figura 38).

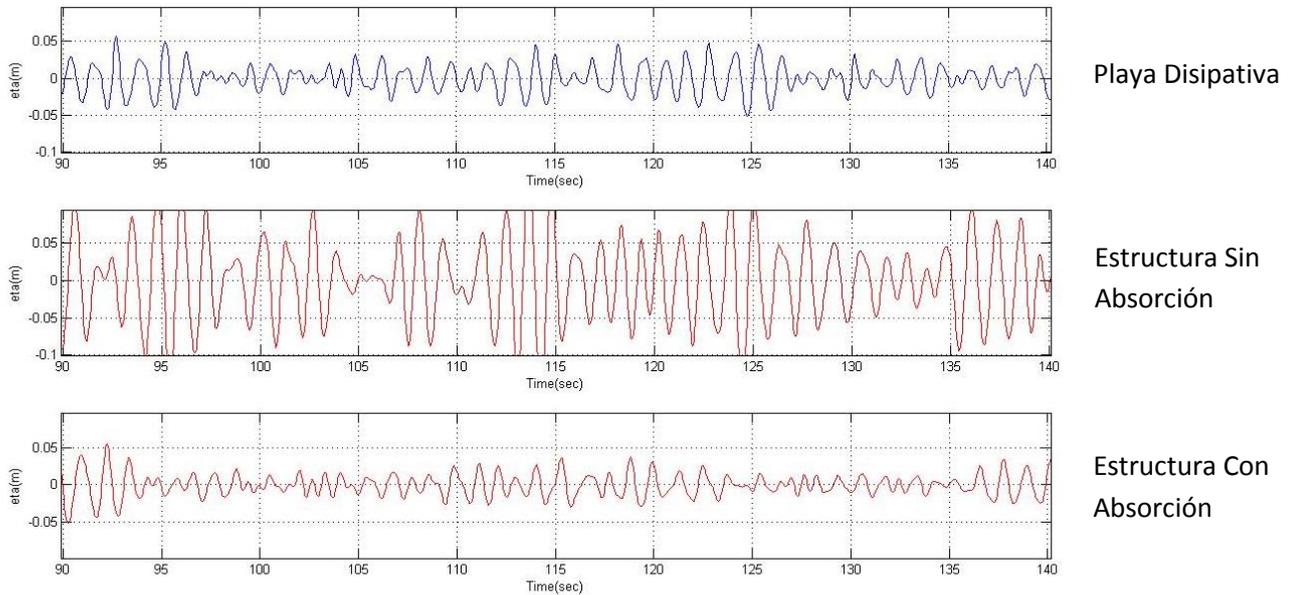


Figura 38. Comparación espectros Test_T021 (Playa disipativa, Estructura sin Absorción, Estructura con Absorción)

Para una mejor apreciación de la similitud entre espectros de Playa Disipativa y Estructura con Absorción se realiza una ampliación de los mismos (Figura 39-Figura 40).

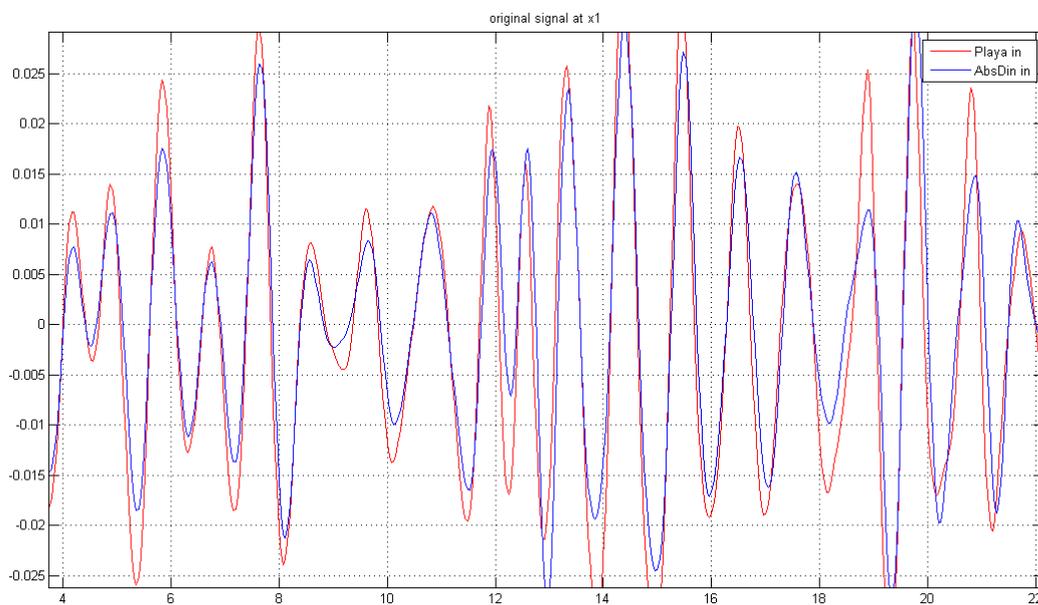


Figura 39. Comparación en Test_T011 "señales con Playa Disipativa vs Con estructura con Absorción dinámica".

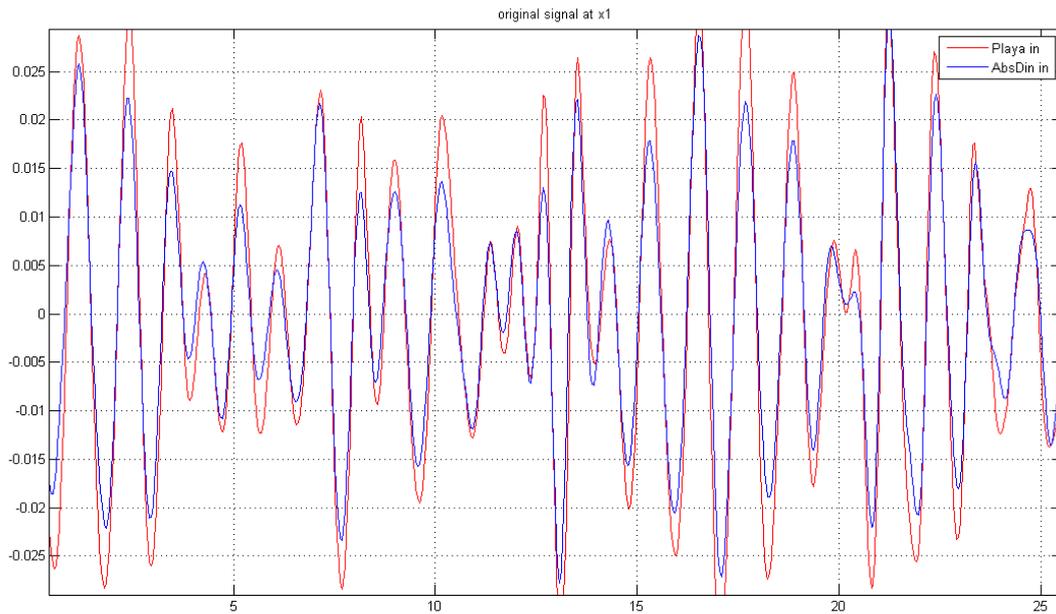


Figura 40. Comparación en Test_T021 “señales con Playa Disipativa vs Con estructura con Absorción dinámica”.

Se ve claramente como ambos casos se comportan de la misma forma, confirmando así el buen funcionamiento y calibrado de la absorción dinámica.

La serie temporal analizada T011 y T021 ahora se expresan en espectros energéticos para poder compararlos con el Espectro Jonswap teórico. Lo que se observa es que en el caso de la playa disipativa y en el caso de la estructura con absorción dinámica las series tienen la misma distribución que el espectro Jonswap. Lo único diferente que se puede recalcar es en la serie con absorción dinámica, donde se ven picos que se repiten de forma periódica. Esto sucede por la presencia de la estructura, que transforma la onda de progresiva a parcialmente estacionaria (Figura 41-Figura 42).

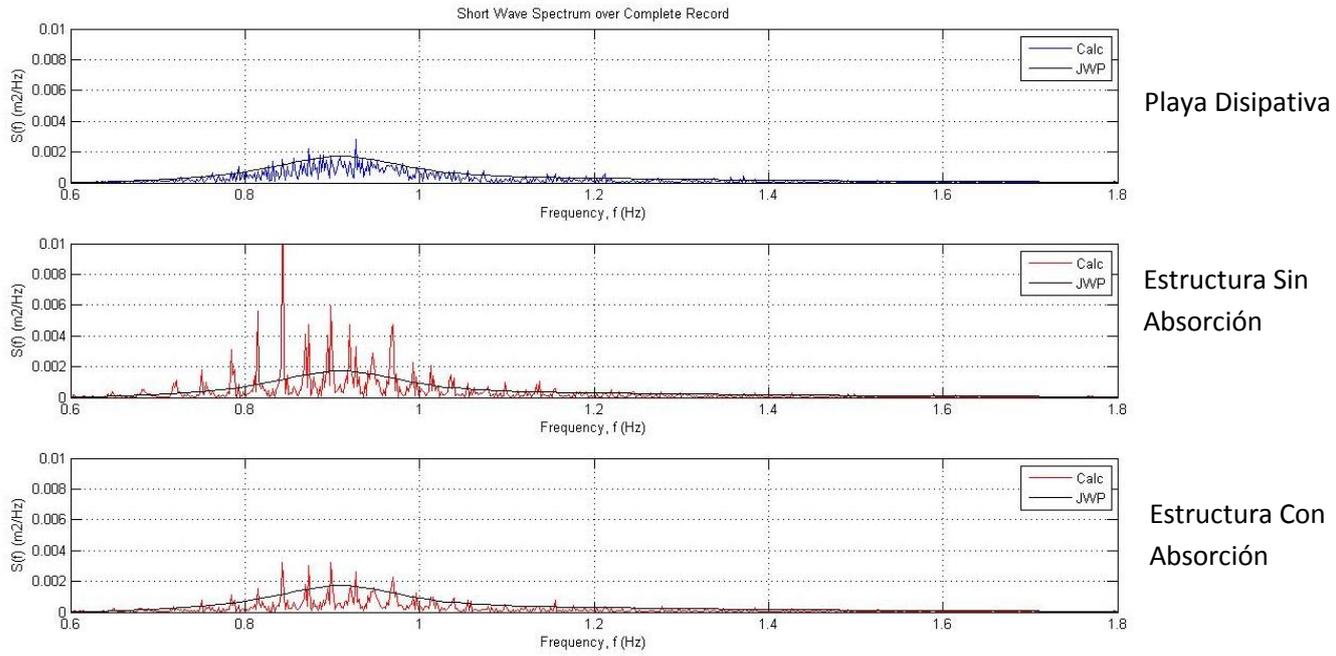


Figura 41. Comparación de espectros energéticos de ensayo T011 con Espectro Jonswap

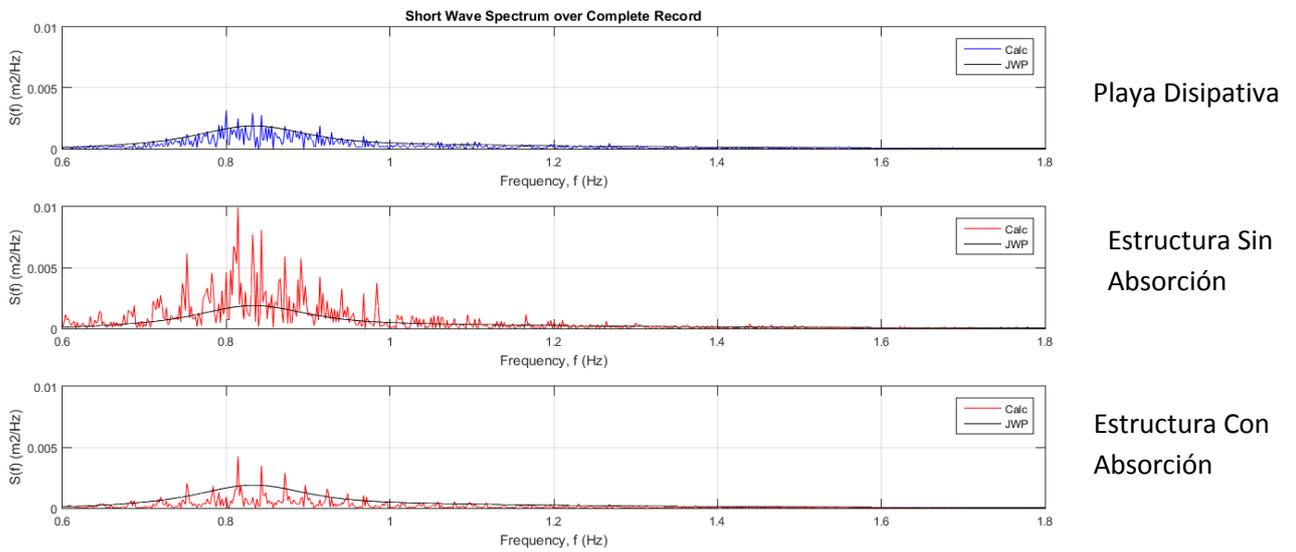


Figura 42. Comparación de espectros energéticos de ensayo T021 con Espectro Jonswap.

4.4 Diseño de los ensayos finales. Fase 4

Luego de un intercambio de información y resultados con el INA sobre el correcto comportamiento de la pala generadora de oleaje, calibración de la absorción dinámica y del factor de reducción de la energía de oleaje, se establecen los ensayos finales. El fin de los mismos es reproducir en ambos canales (Laboratorio de UNC y Laboratorio del INA) una serie de oleajes con sus respectivas mediciones de Run-Up, comparativas de Run-Up medidos y formulación teórica, para obtener finalmente las alturas de las olas en el talud aguas arriba del dique. Se separó el trabajo en 4 Series:

- Aproximándose a condición de Diseño
- **Serie 0:** Test_T con Hs(0.03-0.09), Tp=1.1; Tp=1.3, con playa disipativa
 - **Serie 1:** Test_P01 a Test_P06 con Hs objetivo (0.03-0.06), Tp (1.1-1.4), con estructura.
- Escenarios Posibles de Fetch y viento
- **Serie 2:** Test_P06 a Test_P09 con Hs (0.03-0.06), Tp=1.1, con estructura.
 - **Serie 3:** Test_F2.1 a Test_F2.4 con Hs (0.03-0.06), Tp=1.3, con estructura.
 - **Serie 4:** Test_F31 Con Absorción dinámica, con estructura.

Este informe solo incluye las primeras dos series, solamente el **análisis del oleaje**.

La fase 0 fueron una serie de ensayos realizados sobre la playa disipativa, con dos condiciones de periodos pico: Tp=1.1; Tp=1.3. En ambos casos las alturas de olas variaron entre Hs (0.03-0.09). (Tabla 9)

Tabla 9. Serie 0: Ensayos sobre playa disipativa, con Tp=1.1seg, Tp=1.3seg, Hs (0.03m-0.09m).

	Ensayo	Señal a la pala		Valores con Playa disipativa		
		Hs(m)	Tp(s)	Hs(m)	Hmo(m)	Tp(s)
PLAYA DISIPATIVA	T1	0,03	1,1	0,022	0,02	1,09
		0,04	1,1	0,03	0,03	1,08
		0,05	1,1	0,037	0,04	1,1
		0,06	1,1	0,044	0,04	1,09
		0,07	1,1	0,052	0,05	1,09
		0,08	1,1	0,06	0,06	1,09
		0,09	1,1	0,067	0,07	1,09
	T2	0,03	1,3	0,021	0,02	1,23
		0,04	1,3	0,029	0,03	1,3
		0,05	1,3	0,037	0,04	1,28
		0,06	1,3	0,046	0,05	1,28
		0,07	1,3	0,052	0,05	1,28
		0,08	1,3	0,06	0,06	1,3
		0,09	1,3	0,068	0,07	1,35

En la Serie 1 se realizaron 6 ensayos con valores estipulados de Hs, Tp a obtener a pie de dique. Para lograr esos valores, fueron de gran ayuda todas las experimentaciones previas ya que los valores ingresados a la pala mecánica no son los mismos que los valores obtenidos a pie de dique. Al saber el comportamiento y la variación de los mismos, estos ensayos pudieron realizarse de forma rápida y concreta. Estos ensayos se llaman Test_P y a continuación se muestran los resultados (Tabla 10).

Tabla 10. Serie 1: Ensayos sobre estructura, Test_P01 a Test_P06 con Hs objetivo (0.03m-0.06m), Tp (1.1s-1.4s).

Ensayos	Señal a la pala		Objetivo a pie de dique		En prototipo		Comparación de Resultados		
	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs	Tp	Hs(S7)	Tp(S7)	ΔH
Test_P01	0,069	1,21	0,05	1,25	2,250	8,385	0,053	1,24	0,003
Test_P02	0,069	1,35	0,05	1,4	2,250	9,391	0,054	1,38	0,004
Test_P02bis	0,067	1,37	0,05	1,4	2,250	9,391	0,052	1,4	0,002
Test_P03	0,08	1,22	0,06	1,25	2,700	8,385	0,063	1,25	0,003
Test_P04	0,08	1,35	0,06	1,4	2,700	9,391	0,062	1,38	0,002
Test_P05	0,04	1,18	0,03	1,2	1,350	8,050	0,03	1,21	0,000
Test_P05bis	0,04	1,18	0,03	1,2	1,350	8,050	0,031	1,21	0,001
Test_P06	0,04	1,1	0,03	1,1	1,350	7,379	0,031	1,11	0,001

En algunos casos se tuvo que repetir el ensayo para mejorar la diferencia entre la altura de ola a pie de dique y la medida realmente en el sensor 7. No fue de gran complicación ya que se conocía, como se dijo anteriormente, el comportamiento y la variación de valores cuando se cambiaban las condiciones ingresadas a la pala mecánica.

Las series 2, 3,4 no están incluidas en este informe, ya que forman parte de un análisis posterior de escenarios posibles de Fetch y viento. En las mismas se midieron los parámetros del oleaje generado y mediante técnica de video se obtuvieron los valores del Run Up 2%. Puede observarse que se realizaron ensayos con cuatro alturas significativas, y su correspondiente repetición.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

El desarrollo de esta práctica supervisada permitió el aprendizaje sobre oleajes en general. Se trataron temas como la separación de olas incidentes y reflejadas, transformación de oleajes, fenómenos que ocurren a pie de dique tales como: asomeramiento, rotura, transmisión, reflexión, Run-Up.

Específicamente en este informe, las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- El canal del Laboratorio de Hidráulica UNC se adaptó correctamente a las necesidades cumpliendo con las **medidas mínimas** necesarias para la realización de los ensayos de oleajes previstos en el proyecto.
- Se analizaron numerosos ensayos, para obtener **parámetros y comportamientos** de la pala generadora de oleaje.
- Se lograron **separar olas incidentes y reflejadas** en la estructura para que no influya el fenómeno de REFLEXION en las mediciones.
- Se logró realizar la **calibración de la absorción dinámica** del Sistema Generación de Oleaje. Con esto se logra absorber las olas reflejadas en la pala mecánica, lo que permite mantener los parámetros iniciales de oleajes dados al sistema.
- Todos los ensayos realizados sirven como **base para futuros análisis de oleaje, Run-Up.**

5.2 Conclusiones de la práctica supervisada

Esta práctica supervisada constituyo una experiencia laboral en la cual pude aplicar conocimientos aprendidos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil, como así también temas específicos dados en la Maestría de Hidráulica, como hidráulica costera. Al mismo tiempo se presentaron muchos desafíos que me permitieron involucrarme más en el proyecto. Se tuvo la oportunidad de aprender nuevas técnicas de medición y metodologías específicas de trabajo.

Se trabajó en un grupo donde primó la buena predisposición y el compañerismo. Todos los ensayos realizados y presentados en el trabajo fueron realizados con la ayuda y colaboración de los integrantes del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Nacional de Córdoba.

Quiero aprovechar para agradecer a mi tutor Paolo Gysels que tuvo una gran voluntad y dedicación conmigo, para poder llevar a cabo esta Práctica Supervisada.

Por ultimo también quisiera agradecer al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que me permitieron realizar la Practica Supervisada en sus instalaciones y sus integrantes igualmente por estar predispuestos a aclarar cualquier duda en todo momento.

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 medio ambiente (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.