

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**  
**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**



**PRÁCTICA SUPERVISADA**

**DETERMINACIÓN DE RUN-UP POR OLEAJE EN  
LABORATORIO EN TALUDES DE PRESAS MEDIANTE  
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

**CARRERA:** INGENIERÍA CIVIL

**AUTOR:** VELASCO, JUAN VALENTÍN

**TUTOR INTERNO:** DRA ING. TARRAB, LETICIA

**TUTOR EXTERNO:** MS.SC. ING.PATALANO, ANTOINE

**AÑO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, principalmente a mis padres por el apoyo brindado en todo momento de forma incondicional.

A mi tutora Leticia Tarrab por todo el tiempo dedicado, su excelente predisposición ante cualquier consulta y paciencia.

A la Universidad Nacional de Córdoba y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por permitirme realizar los estudios y formarme como profesional y persona.

Al Laboratorio de Hidráulica por permitirme realizar la Practica Supervisada y en especial a Antoine Patalano y Paolo Gysseis por su amabilidad y ayuda .

A mis amigos por las horas compartidas y estar presentes en los buenos y malos momentos.

## **RESUMEN**

En el presente informe se trata la técnica utilizada para la determinación del valor Run-Up por oleaje a través del procesamiento de imágenes, se explica el procedimiento realizado para validar dicha técnica y se adjuntan los resultados obtenidos junto con sus errores. El procesamiento de imágenes fue realizado en un programa creado en código MATLAB, explicándose el funcionamiento del mismo.

Una vez validada la técnica, se comparó los resultados obtenidos de Run-Up con el programa y con formulaciones teóricas de distintos ensayos en el laboratorio.

Se explica los diferentes ensayos realizados en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, haciendo referencia al instrumental utilizado y su disposición.

Además se complementa el informe con un marco teórico, en donde se mencionan conceptos generales del Run-Up por oleaje y su forma de obtención, técnicas de ensayos realizados en otros laboratorios e información de la presa Gobernador Jorge Cepernic, sobre la cual se realizó el modelo físico en donde se llevaron a cabo los distintos ensayos.

## **PALABRAS CLAVES**

Run-Up, Run-Up 2%, Ensayos experimentales, Canal de oleaje.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	9
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	9
1.2.	ÁMBITO DE DESARROLLO .....	9
1.3.	PROBLEMÁTICA .....	10
1.4.	OBJETIVO GENERAL .....	14
1.5.	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	14
1.6.	OBJETIVOS PERSONALES .....	14
2.	REVISIÓN DE ANTECEDENTES .....	15
2.1.	MECÁNICA DE ONDAS.....	15
2.1.1.	Movimiento oscilatorio, Magnitudes características de las ondas.....	15
2.2.	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN 2D .....	17
2.2.1.	Introducción .....	17
2.2.2.	Asomeramiento.....	18
2.2.3.	Rotura .....	18
2.2.4.	Reflexión.....	20
2.3.	RUN-UP POR OLEAJE .....	20
2.3.1.	Conceptos generales .....	20
2.3.2.	Cálculo de Run Up en Oleaje Regular.....	20
2.3.3.	Cálculo de Run Up en Oleaje Irregular.....	21
2.3.4.	Formulaciones Para Determinar Run-Up .....	22
2.3.4.1	Formulación del CEM (2002) Burcharth y Hughes.....	22
2.3.4.2	Formulación de Eurotop (2007) .....	23
2.3.5.	Cálculo del Run-Up en una presa .....	25
2.4.	ANTECEDENTES DE MEDICIONES DEL RUN-UP EN LABORATORIO 32	
2.5.	CÁLCULO DE ERRORES.....	33
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	35
3.1.	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL .....	35
3.1.1.	Canal de oleaje .....	35

3.1.2.	Playa absorbente .....	38
3.1.3.	Diseño de la estructura .....	40
3.2.	INSTRUMENTAL EMPLEADO.....	41
4.	PROGRAMA RIM (RUN-UP IMAGE MEASUREMENT) .....	46
5.	VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE RUN-UP .....	48
5.1.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	48
5.2.	RESULTADOS.....	51
6.	DETERMINACIÓN DEL RUN-UP .....	54
6.1.	ENSAYOS REALIZADOS .....	54
6.2.	RESULTADOS.....	56
7.	CONCLUSIONES.....	60
8.	BIBLIOGRAFIA.....	62
9.	ANEXO.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo del fenómeno .....	11
Figura 2. Represa Gobernador Jorge Cepernic .....	11
Figura 3. Parámetros asociados a la onda.....	15
Figura 4. Rotura tipo decrestamiento .....	18
Figura 5. Rotura tipo voluta.....	19
Figura 6. Rotura tipo colapso .....	19
Figura 7. Rotura tipo oscilación.....	19
Figura 8. Esquema Run-Up y run-down.....	20
Figura 9. Definición del ángulo de ataque .....	24
Figura 10. Croquis ilustrativo de la nomenclatura .....	25
Figura 11. Gráfico de solución de la ecuación de Zuider-Zee .....	26
Figura 12. Fetch efectivo .....	27
Figura 13. Altura de ola en función del fetch efectivo y velocidad del viento .....	29
Figura 14. Periodo de las olas en función del fetch y la velocidad del viento .....	29
Figura 15. Definición del ángulo de ataque .....	30
Figura 16 Uso de Abaco .....	31
Figura 17. Medición en Stellenbosh.....	32
Figura 18. Canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica de la UNC.....	36
Figura 19. Generador de oleaje .....	36
Figura 20. Sensor de tipo resistivo.....	37
Figura 21. Esquema de oleaje con Absorción Dinámica .....	38
Figura 22. Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica .....	38
Figura 23. Playa absorbente .....	40
Figura 24. Estructura utilizada en modelo físico.....	41
Figura 25. Trípode y cámara de video .....	42
Figura 26. Sensores en el extremo derecho y regla en el canal.....	43
Figura 27. Sensores en el centro y regla en el canal.....	43
Figura 28. Sensor HRIA-1014.....	44

Figura 29. Canal durante ensayo .....	44
Figura 30. Regla para medir altura de agua.....	45
Figura 31. Esquema de los elementos.....	45
Figura 32. Perfil de intensidad a lo largo del tiempo.....	46
Figura 33. Puntos de control .....	47
Figura 34. Zero crossing .....	49
Figura 35. Superposición de oleaje.....	49
Figura 36. Imagen para comparar .....	50
Figura 37. Imagen tipo para usar de referencia (CP) .....	63
Figura 38. RIM líneas 1 a 6.....	63
Figura 39. Obteniendo coordenadas.....	64
Figura 40. RIM líneas 15 a 26.....	64
Figura 41. RIM líneas 33 a 34.....	65
Figura 42. Resultado de correr línea 33 y 34 .....	65
Figura 43. RIM líneas 38 a 41 .....	65
Figura 44. RIM q_a .....	66
Figura 45. RIM-Set Automatic Thresholds .....	66
Figura 46. RIM líneas 52 a 67.....	67
Figura 47. RIM líneas 35 a 107.....	68
Figura 48. RIM resultado de correr línea (35 a 107).....	68
Figura 49. RIM líneas 109 a 148.....	69
Figura 50. RIM resultado de líneas 109 a 148 .....	70
Figura 51. RIM línea 164 .....	70
Figura 52. RIM línea 153 a 184.....	71
Figura 53. RIM línea 186 a 192.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de rugosidades superficiales para materiales típicos.....	24
Tabla 2. Ajustes de velocidad por viento.....	28
Tabla 3. Casos analizados.....	48
Tabla 4. Comparación de valores .....	50
Tabla 5. Comparación RIM-Visual .....	50
Tabla 6. Comparación Sensores-Visual.....	51
Tabla 7. Comparación RIM-visual por tramo.....	51
Tabla 8. Comparación sensores-visual por tramo .....	52
Tabla 9. Comparación RIM-visual valor máximo hasta R-Up2%.....	52
Tabla 10. Comparación sensores-visual valor máximo hasta R-Up2% .....	52
Tabla 11. Comparación RIM-visual de todos los ensayos.....	53
Tabla 12. Comparación sensores-visual de todos los ensayos.....	53
Tabla 13. Parámetros de ensayo .....	54
Tabla 14. Calculo de R-Up2%.....	56
Tabla 15. Errores Burcharth-Hughes .....	57
Tabla 16. Errores Eurotop.....	57
Tabla 17 Cálculo de Run-Up.....	58
Tabla 18. Errores Leliavsky.....	59
Tabla 19. Errores ábaco Saville, McClendon y Cochran .....	59

## **1. MARCO REFERENCIAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente informe se describen las distintas actividades desarrolladas por el alumno Velasco Juan Valentín, de la carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba durante la práctica supervisada. La misma tiene como objetivo que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en la carrera en una problemática en particular.

### **1.2. ÁMBITO DE DESARROLLO**

La presente práctica supervisada se realizó bajo la dirección de la Dra. Inga. Leticia Tarrab, Ms.Sc. Ing Antoine Patalano y Dr. Ing. Gyssels Paolo, bajo la modalidad de pasante interno/becario en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ubicado en Boulevard Dr. Juan Filloy en Ciudad Universitaria.

El Laboratorio de Hidráulica perteneciente al departamento de Hidráulica de la FCEFYN de la UNC es el único en su tipo en la Provincia de Córdoba. Creado a mediados de la década de 1940 presta servicios académicos a las Universidades Nacional de Córdoba y realiza actualmente actividades de investigación científico-tecnológica financiada en proyectos provinciales de la Agencia Córdoba Ciencia, nacionales de CONICET, Agencia Nacional de Promoción Científica, SECYT e Internacionales para la Unión Europea. Los servicios técnicos y de consultoría especializada en hidráulica se han realizado para numerosas Direcciones Provinciales del País, y los principales organismos Nacionales. Para estos clientes se han realizado numerosos modelos físicos reducidos a fondo fijo y móvil de obras y estructuras hidráulicas, incluyendo presas, azudes, sifones, vertederos, alcantarillas, disipadores de energía, como así también modelos fluviales bidimensionales y tridimensionales. Adicionalmente se realizan tareas de reparación y calibración de instrumental hidrométrico. El Laboratorio cuenta con el equipamiento propio de ensayos físicos en canal vidriado de pendiente variable apto para ríos de montaña de 14 m x 0,5m x 0,6 m, bombas mayores (2 sumergibles de 100 l/s c/u) y menores, instrumental hidrométrico de campo y laboratorio como limnímetros ópticos, limnógrafos digitales, vertederos de aforo, molinetes y mini molinetes, velocímetro Doppler 3D, tubos Pitot, instrumental de mediciones limnológicas y sedimentológicas, etc., diversos modelos reducidos a fondo fijo y móvil en una nave cubierta de más de 400 m<sup>2</sup>. El personal

disponible en el LH de la UNC incluye profesionales del campo de la Ingeniería en áreas técnicas que incluyen mecánica de fluidos, hidrología, limnología, obras hidráulicas, hidráulica fluvial, hidráulica marítima, hidráulica computacional, hidráulica ambiental, análisis digital de imágenes, todas con sus correspondientes modelos computacionales y software específico de pre y pos proceso, análisis de datos.

### **1.3. PROBLEMÁTICA**

La formación de embalses artificiales por la construcción de las presas constituye un espejo de agua de tales dimensiones que un viento de una cierta magnitud, dirección y duración puede generar un oleaje relativamente importante. El oleaje que se propaga hacia la presa, genera un movimiento de ascenso-descenso (Run-Up y run-down), cuando alcanza su talud interno y cuya magnitud depende de la pendiente del mismo talud, del material que lo constituye, del peralte del oleaje, del ángulo de incidencia del oleaje, entre otras cosas.

Se entiende por revancha o resguardo a la diferencia de cotas entre el nivel máximo de las aguas en el embalse, en contacto con el de la presa, y el de su coronación, por lo cual el diseño de la cota del coronamiento de la presa depende del valor del ascenso sobre el talud en cuanto se quiere evitar el sobrepaso de caudales líquidos (Figura 1).

El resguardo se fija en función del régimen de oleaje que sea previsible en el embalse. Se proyecta en la cuantía precisa para que las olas, una vez rotas en el paramento aguas arriba, no sobrepasen la coronación, sino en un número muy limitado, que no produzcan daños aparentes en la misma.

En el caso de presas ubicadas en regiones con altos valores de velocidad de viento como es el caso de la presa en estudio, Gobernador Jorge Cepernic, resulta fundamental determinar con exactitud este valor ya que permitirá diseñar una obra más segura y con mayor eficiencia económica. Sobre estimar el Run-Up puede significar un aumento en los costos de la obra, mientras que por el contrario el rebase de la represa puede derivar en daños estructurales, en maquinaria, equipamiento y personales.

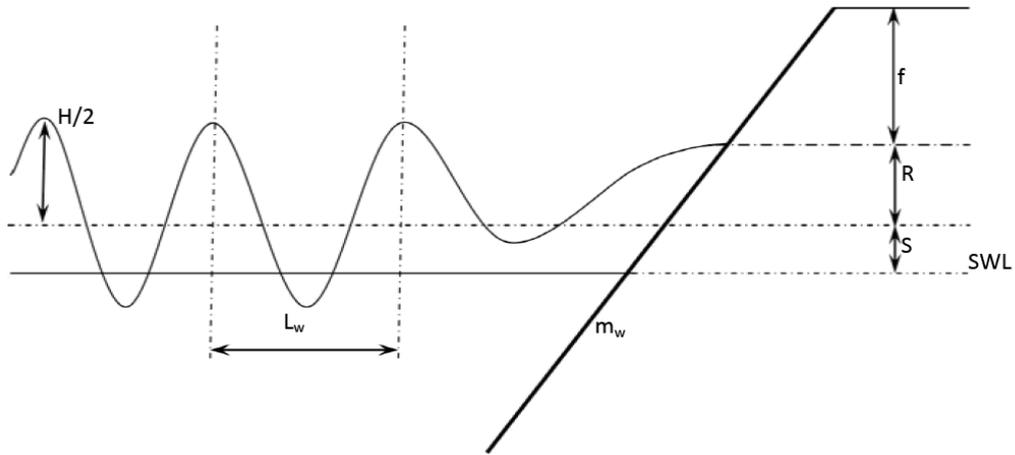


Figura 1. Modelo del fenómeno

Siendo en la figura:

- SWL = Nivel del agua en reposo
- F = revancha
- S = Set-Up, ola de viento
- R = Run-Up
- H = altura de ola
- $L_w$  = longitud de ola
- $M_w$  = inclinación del talud

La represa Gobernador Jorge Cepernic (Figura 2) se encuentra localizada a 170 kilómetros de la ciudad de Comandante Luis Piedra Buena y forma parte del proyecto del aprovechamiento hidroeléctrico del río San Cruz que prevé la construcción de esta represa junto con la represa Presidente Néstor Kirchner.



Figura 2. Represa Gobernador Jorge Cepernic

Cuenta con una capacidad de 360 mw y 45 m de altura. La extensión del muro es de 2700 m y la superficie del embalse será de 200 km<sup>2</sup>.

La casa de maquina está compuesta por 5 turbinas Kaplan y producirá 1903 Gw/h al año.

Con respecto a los niveles de embalse seleccionados, a los efectos de satisfacer las demandas resultantes de los objetivos de generación de energía y en función de las restricciones impuestas al proyecto, se ha seleccionado una disposición de obras con las siguientes características de embalse:

- Nivel de Agua Máximo de Operación Normal (NAON) **112.20 msnm**
- Nivel de Agua Máximo Extraordinario (NAME) **112.20 msnm**
- Cota de Cresta de Vertedero con Compuertas **130.70 msnm**

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.

Se realizó un estudio de antecedentes que permitió conocer las características del viento en la zona de El Calafate y Lago Argentino. Se consideraron como vientos de diseño: un valor de 100 km/h como valor de viento máximo y un valor de 156 km/h correspondiente a un valor extremo desarrollados sobre un Fetch de 8.8 Km.

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

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

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

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

El coronamiento de presa tiene un ancho de 12 m, 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.

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 m de altura desde el

fondo actual del cauce. La longitud del coronamiento es de 2900 m y el volumen del terraplén es de unos 6.000.000 m<sup>3</sup>.

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

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

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. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de la práctica supervisada es la validación e implementación de una técnica por imágenes para la determinación del Run-Up por oleaje. Los datos experimentales corresponden a ensayos realizados en el modelo físico del talud interno de la presa que se construirá sobre el río Santa Cruz, Jorge Cepernic (Santa Cruz). El modelo físico fue construido en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica (LH) de una UNC para evaluar Run-Up de diseño para distintos escenarios hidráulicos.

#### **1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Con el fin de alcanzar el objetivo general, se plantean distintos objetivos específicos:

- Búsqueda de antecedentes de medición de Run-Up en laboratorio.
- Conocer y comprender la hidrodinámica y métodos de medición del Run-Up en laboratorio sobre taludes impermeables por el impacto de oleaje.
- Evaluar la técnica por imágenes desarrollada en el LH por los supervisores del alumno para la estimación del run-rp por oleaje y validarla con ensayos.

Implementar la técnica en los ensayos realizados en el modelo físico de la Presa Jorge Cepernic para determinar el Run-Up para diferentes escenarios hidráulicos y efectuar un análisis de los resultados comparando las mediciones con formulaciones teóricas.

#### **1.6. OBJETIVOS PERSONALES**

A modo de objetivos personales me propuse:

- Interiorizarme con el ámbito laboral en la rama de la ingeniería hidráulica.
- Interactuar constantemente con un grupo de profesionales afines a la misma.
- Aplicar y profundizar conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

En el siguiente capítulo se mencionan conceptos generales del Run-Up por oleaje, comenzado con una información teórica acerca de la mecánica de las ondas en el agua, luego se analiza la transformación del oleaje en canal de 2D definiendo ciertas magnitudes que intervienen.

Se comenta sobre el avance en la determinación del valor de Run-Up tanto para oleaje regular como irregular acompañado por una serie de formulaciones teóricas para determinarlo.

Por último se hace referencia a diferentes estudios realizados en otros laboratorios sobre mediciones de Run-Up.

### 2.1. MECÁNICA DE ONDAS

#### 2.1.1. 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

A continuación se definirán magnitudes características (Figura 3).

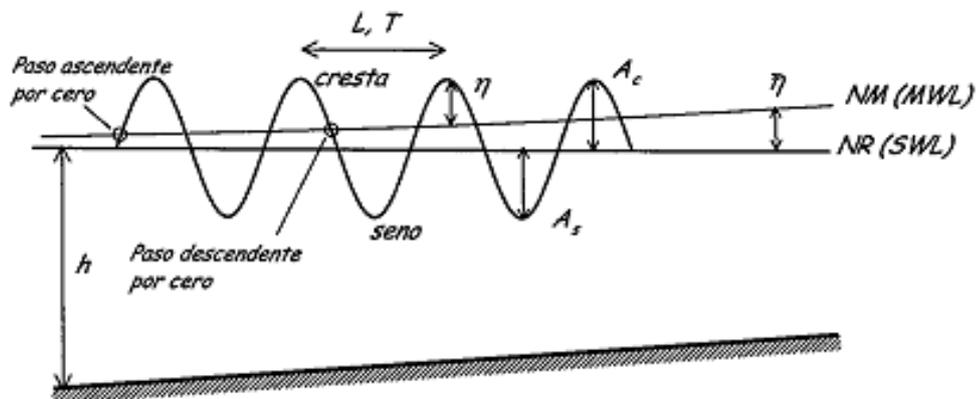


Figura 3. Parámetros asociados a la onda

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

**Periodo de la onda, T:** es el tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la onda.

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

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

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

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

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

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

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

**Número de onda, k:**

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

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

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

**Frecuencia cíclica, f:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.2. TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE EN 2D

### 2.2.1. Introducción

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

### 2.2.2. Asomeramiento

A medida que un tren de onda se aproxima hacia la costa con la consiguiente variación en la profundidad, se observa un cambio en la altura y en la longitud de la onda. A este proceso de transformación de la onda se lo llama *asomeramiento*.

### 2.2.3. Rotura

A medida que las ondas se propagan hacia la costa se asomeran aumentando su altura de ola progresivamente. Sin embargo, este aumento no es ilimitado, sino que a una profundidad determinada, una onda de características dadas se vuelve inestable hasta que rompe disipando una enorme cantidad de energía en forma de turbulencia.

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

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

Donde el parámetro de Iribarren  $\xi_{op}$  se estimará con la siguiente expresión:

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

Siendo  $\alpha$  el ángulo del talud,  $H_{mo}$  la altura de ola espectral calculada a pie de dique y  $L_{op}$  la longitud de onda equivalente en aguas profundas.  $T_p$  es el periodo pico a pie de dique y  $N$  el número de olas.

Pueden clasificarse los procesos de rotura en los siguientes tipos:

**Decrestamiento (spilling)  $\xi_{op} = 0.2$ :** En la cresta de la ola aparecen espuma, burbujas y turbulencias y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la crestas, que se decresta formando un pequeño chorro, en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda (Figura 4).



Figura 4. Rotura tipo decrestamiento

**Voluta (plunging)  $0.5 < \xi_{op} < 1.5$ :** La mayor parte del frente de la onda adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la onda originando un salto y rocío de agua (Figura 5).



Figura 5. Rotura tipo voluta

**Colapso (collapsing)  $\xi_{op}=3$ :** La parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea, comportándose como una rotura en voluta truncada, ya que el punto del frente, desde donde la onda voltea o se desmorona, está delante y por debajo de la cresta de la ola (Figura 6).

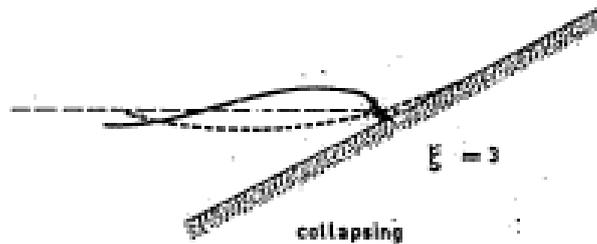


Figura 6. Rotura tipo colapso

**Oscilación (surging)  $\xi_{op}=5$ :** El frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia (Figura 7).

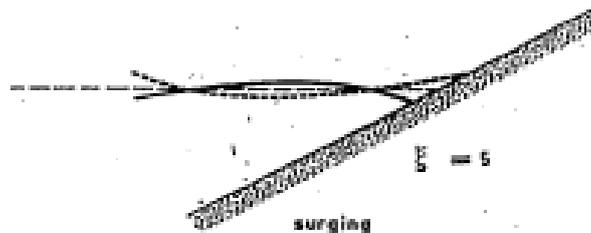


Figura 7. Rotura tipo oscilación

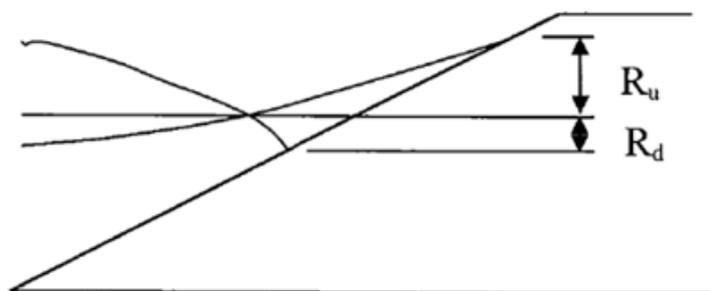
## 2.2.4. Reflexión

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.

## 2.3. RUN-UP POR OLEAJE

### 2.3.1. Conceptos generales

Se define el Run-Up como 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 (Figura 8). Mientras que el run-down es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el mínimo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre el paramento exterior de la estructura sometida a flujo oscilatorio.



**Figura 8.** Esquema Run-Up y run-down

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

### 2.3.2. Cálculo de Run Up en Oleaje Regular

Investigadores como Granthem (1953), Saville (1955, 1956, 1958) y Savage (1958) midieron el Run-Up causado por trenes de olas regulares que impactaban sobre distintos tipos de superficies: suaves, rugosas y de diferentes pendientes. El resultado

fue que el Run-Up era una función de varios parámetros del oleaje y de la estructura. Sin embargo ninguna fórmula fue emitida. Recién en el año 1961 una guía del cuerpo de ingenieros la “Shore Protection Manual” expuso unos nomogramas que fueron utilizados para el cálculo del Run-Up por alrededor de 20 años.

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{R}{H} = 1.0 \frac{\tan \alpha}{\frac{H}{L_0}} \quad \text{or} \quad \frac{R}{H} = 1.0 \xi_0$$

$\xi_0$  es el número de Iribaren. Este parámetro es calculado con la altura de ola en las cercanías del pie de dique.

### 2.3.3. Cálculo de Run Up en Oleaje Irregular

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

$$\frac{R_P}{R_S} = \left( -\frac{\ln P}{2} \right)^2$$

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

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

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

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

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

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{1/3}} = Cm \xi_0$$

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

#### **2.3.4. Formulaciones Para Determinar Run-Up**

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

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

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

##### **2.3.4.1 Formulación del CEM (2002) Burcharth y Hughes**

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

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

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

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

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

### 2.3.4.2 Formulación de Eurotop (2007)

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

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

Con un máximo

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

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

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

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

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

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

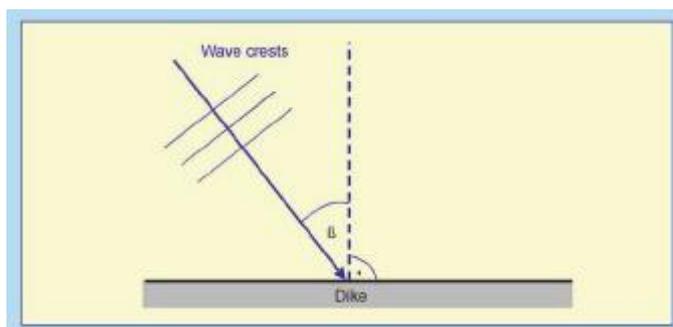
Los efectos de la rugosidad de la superficie de la estructura son tenidos en cuenta

con la utilización del factor  $\gamma_r$ . A continuación se adjunta una figura con los valores que se utilizan.

Reference type	$\gamma_r$
Concrete	1.0
Asphalt	1.0
Closed concrete blocks	1.0
Grass	1.0
Basalt	0.90
Small blocks over 1/25 of surface	0.85
Small blocks over 1/9 of surface	0.80
¼ of stone setting 10 cm higher	0.90
Ribs (optimum dimensions)	0.75

**Tabla 1.** Factores de rugosidades superficiales para materiales típicos

El efecto de olas oblicuas es tenido en cuenta por el factor  $\gamma_\beta$ . El mismo se calcula en relación al ángulo de ataque del frente de oleaje (Figura 9). En nuestro caso experimental el ángulo de ataque era perpendicular al eje longitudinal del dique por lo tanto este valor es la unidad.



**Figura 9.** Definición del ángulo de ataque

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

### 2.3.5. Cálculo del Run-Up en una presa

A continuación se presenta la metodología presentada en el libro Ingeniería de Presas de Escollera (Espinosa, 2010) en la cual se determina la revancha en presas a causa del oleaje. Esta metodología es de gran utilidad cuando no se disponen datos de oleaje:

Para determinar la altura de revancha existen distintas formulaciones, entre ellas:

Saville 
$$R = S + R_s + 0.75H_s$$

Bureau of Reclamation 
$$R = S + R_s + H_{seg}$$

Siendo:

- R = resguardo.
- S = sobre elevación del nivel de embalse por efecto del viento (set-up).
- $R_s$  = altura de rodamiento de las olas sobre el talud de la presa (Run-Up)
- $H_s$  = altura de ola significativa.
- $H_{seg}$  = altura adicional de seguridad.

En la (Figura 10) se observan una imagen ilustrativa de los parámetros que intervienen en las ecuaciones.

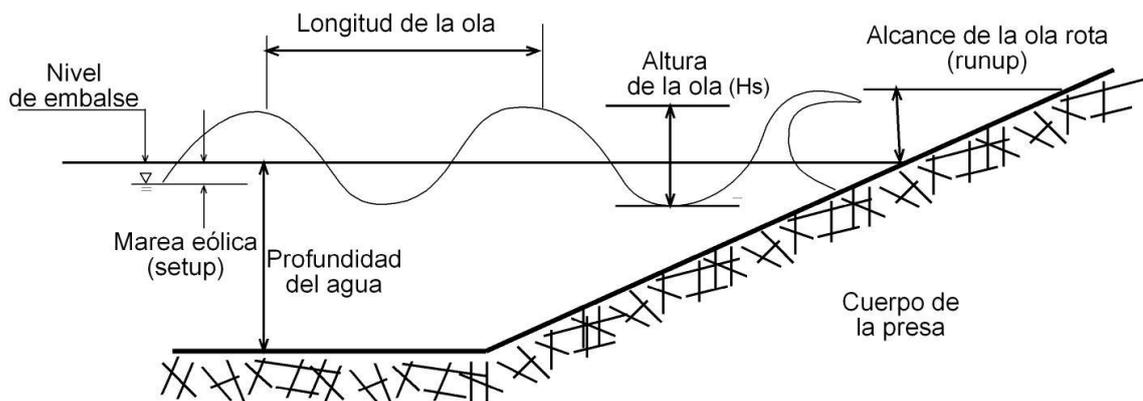


Figura 10. Croquis ilustrativo de la nomenclatura

A continuación se presentan formas de calcular dichos parámetros.

### Oleaje por Viento (set-up)

La generación del oleaje por el viento, es un proceso estocástico. Siguiendo la tendencia moderna, el problema se enfoca bajo el punto de vista probabilística, según las condiciones locales del emplazamiento.

La transferencia de energía del viento a la masa de agua tiene el efecto de elevar el nivel en reposo del agua, efecto llamado con el nombre de set-up. Para la estimación de tal elevación se puede utilizar la fórmula de Zuider-Zee:

$$S = \frac{V^2 F}{63000 D}$$

Donde

- S = Set-up (m).
- F = fetch sobre el cual se considera la acción del viento (Km).
- V = velocidad del viento (Km/h).
- D = profundidad media del agua según la línea del fetch (m).

En la (Figura 11) se observa la solución grafica de la ecuación.

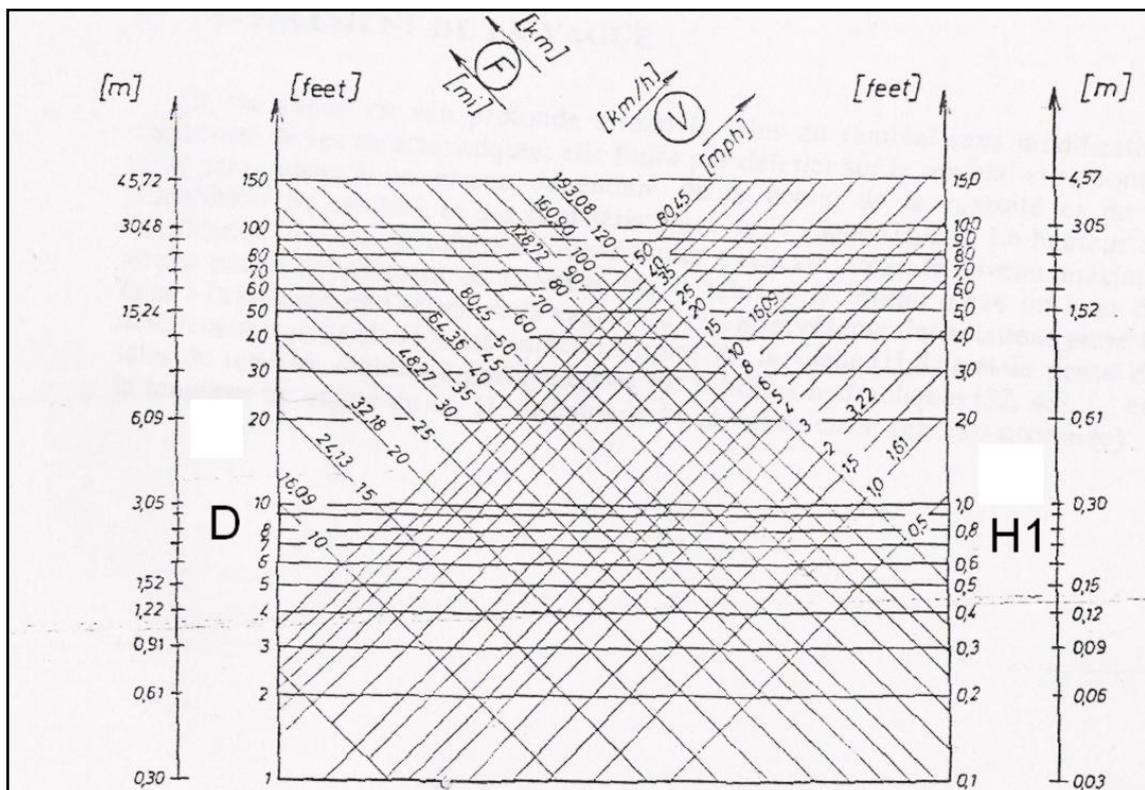
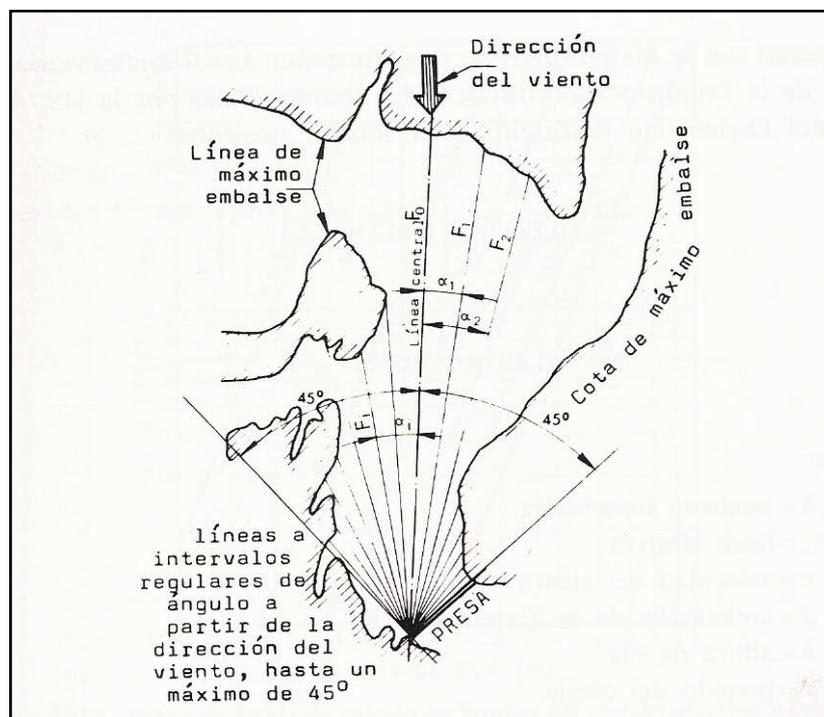


Figura 11. Gráfico de solución de la ecuación de Zuider-Zee

El “fetch efectivo” (Figura 12) es la distancia máxima en recta desde la presa a la orilla más lejana, se evalúa según se ilustra en la siguiente figura, de acuerdo con la expresión:

$$F_e = \frac{\sum F_i \cdot \cos \alpha}{\sum \cos \alpha}$$

Siendo  $F_i$  la longitud de los radios medidos a intervalos regulares de ángulos entre la dirección del viento y un máximo de  $45^\circ$  a cada lado de éste, tomando como centro de punto de la presa o de sus cercanías que interesa, o que proporcione un fetch más largo (fetch efectivo).



**Figura 12.** Fetch efectivo

La altura de la ola depende de la intensidad con que sopla el viento, caracterizada por la velocidad, dirección y duración del fenómeno. La velocidad del viento sobre las aguas del futuro embalse es mayor que la medida sobre la tierra. Suele ser frecuente aumentar la velocidad en porcentajes comprendidos entre un 5% y un 30%, dependiendo del fetch. Los valores de ajuste se dan en la Tabla 2.

Fetch ( millas )	Vagua / Vviento
0,5	1,08
1	1,13
4	1,21
6	1,28
8	1,31

**Tabla 2.** Ajustes de velocidad por viento

Se llama ola significativa, a la ola de diseño para la fijación de la revancha. Su amplitud se toma igual a la amplitud media del tercio más alto de todas las olas de un registro. Para sitios en donde se carece tal información, se han propuesto formulaciones en función del Fetch y de la velocidad del viento.

Las fórmulas semi empíricas de Svedrujo – Bretscheider recomendadas por la U. S. Army Coastal Engineering Research Center son las siguientes:

$$\frac{g \cdot h}{V^2} = 0,283 \cdot \text{tgh} \left[ 0,0125 \cdot \left( \frac{g \cdot F_e}{V^2} \right)^{0,42} \right]$$

Para calcular la altura de ola:

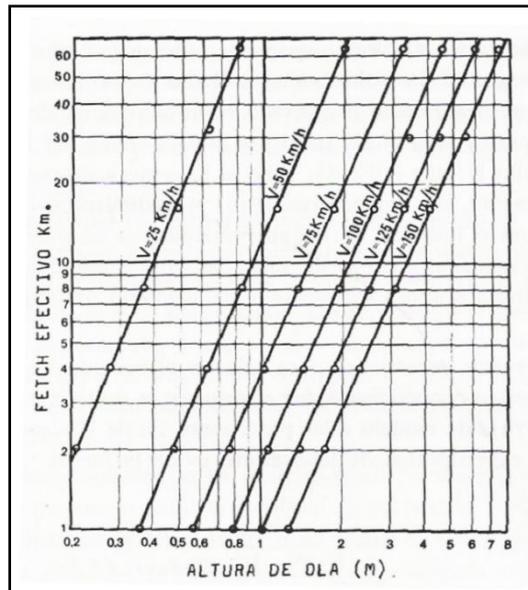
Para calcular el periodo de oleaje:

$$\frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot V} = 1,20 \cdot \text{tgh} \left[ 0,077 \cdot \left( \frac{g \cdot F_e}{V^2} \right)^{0,25} \right]$$

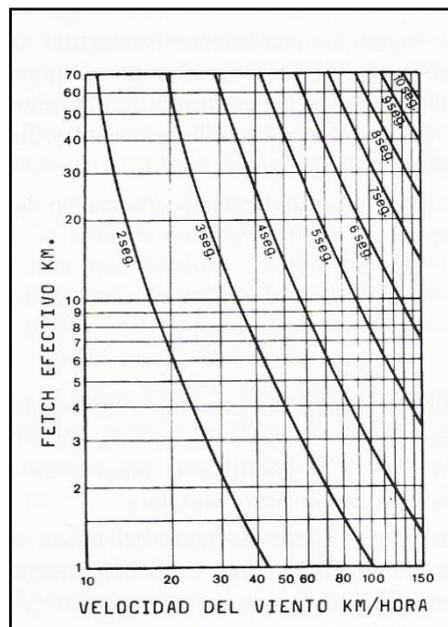
Siendo:

- Tgh = Tangente hiperbólica.
- $F_e$  = fetch efectivo.
- V = velocidad del viento.
- g = aceleración de la gravedad.
- h = altura de la ola.
- T = período de oleaje.

Se observan a continuación en las (Figura 13) y (Figura 14) las curvas representativas de las ecuaciones obtenidas.



**Figura 13.** Altura de ola en función del fetch efectivo y velocidad del viento



**Figura 14.** Periodo de las olas en función del fetch y la velocidad del viento

Stevenson propuso una expresión para el cálculo de Hs en metros en función del fetch en km:

$$H_s = 0,76 + 0,34F^{0,5} - 0,26F^{0,25}$$

## Run-Up

Cuando la ola llega al talud aguas arriba de una presa con paramento inclinado, sube por dicho talud hasta una altura que depende de la rugosidad y permeabilidad, así como también de las características de las olas, pero fundamentalmente se encuentra en función del ángulo que forma el paramento con la horizontal.

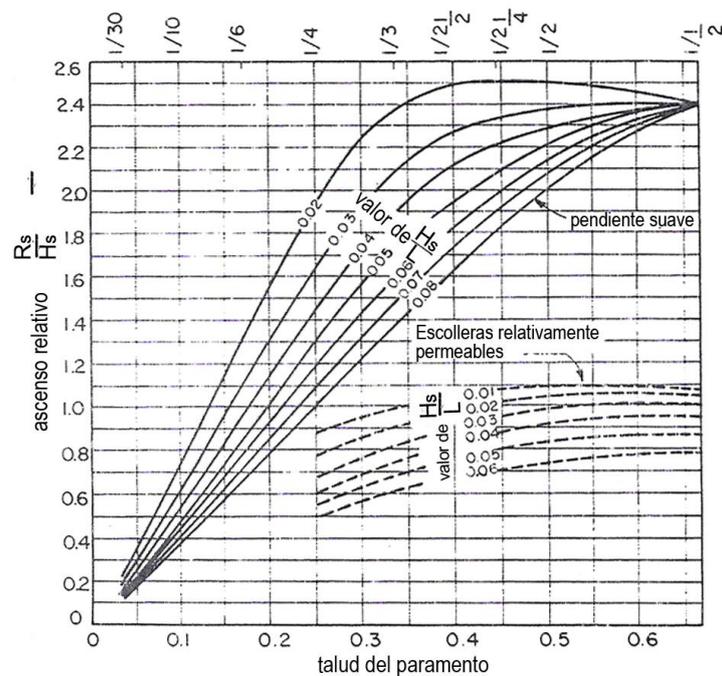
Por definición, la altura de Run-Up, es la diferencia de nivel entre la máxima altura alcanzada al subir, y el nivel del agua al pie, excluyendo la acción del oleaje. La siguiente ecuación propuesta por Leliavsky permite determinarla:

$$R_s = \frac{K * H_s}{0,4 + (H_s / L)^{0,5} \cot \alpha}$$

En que:

- $R_s$  = Run-Up para la ola significativa  $H_s$ .
- $K$  = Coeficiente según la lisura de la superficie de rodamiento.
- $\alpha$  = Ángulo del paramento de la presa con respecto a la horizontal.

También se puede estimar en función del grafico (Figura 15) que propone Saville, McClendon y Cochran, consignado por Senkturk.



**Figura 15.** Definición del ángulo de ataque

Para utilizar el ábaco, resulta necesario determinar previamente las siguientes magnitudes

- Valor de altura de ola a pie del talud =  $H_s = H_{m0}$
- $L$  = longitud de onda, determinada como  $1,56 T^2$
- Esbeltez =  $H_s / L$
- Talud del paramento, representada por la tangente del ángulo del paramento respecto a la línea horizontal

Para obtener el valor buscado se debe comenzar trazando una recta vertical desde el punto que representa el valor del ángulo del talud hasta el valor de  $H_s/L$  correspondiente, luego se traza una recta horizontal hasta el extremo izquierdo en donde se obtiene la relación  $R_s/H_s$ . Conociendo  $H_s$  puedo despejar y obtener el valor de Run-Up buscado.

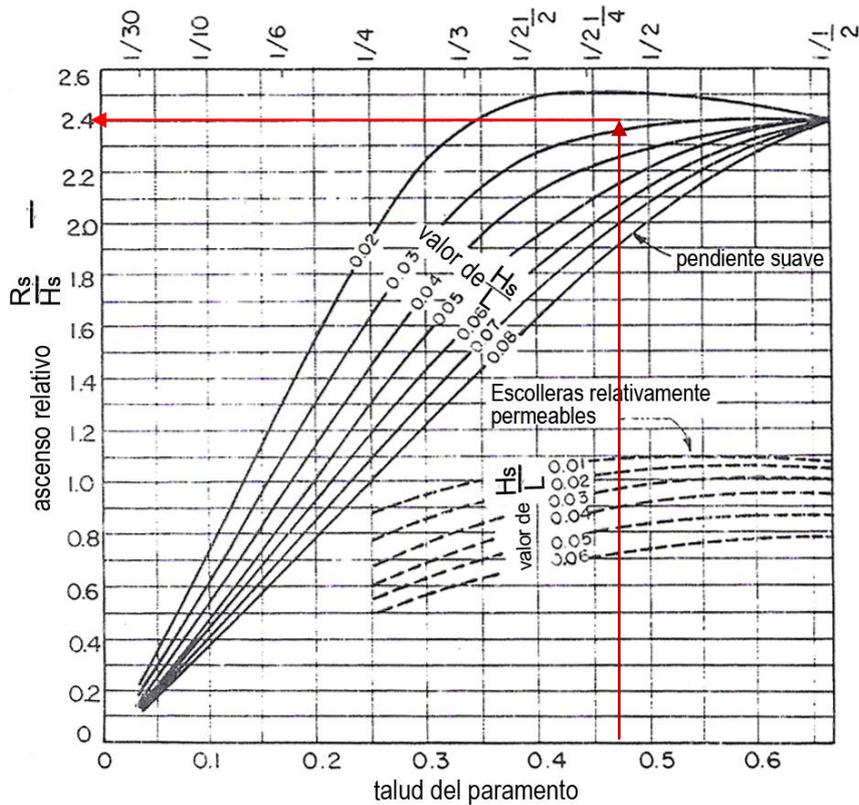


Figura 16 Uso de Abaco

## 2.4. ANTECEDENTES DE MEDICIONES DEL RUN-UP EN LABORATORIO

- **Laboratorio de Hidráulica del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Stellenbosch (Roux, 2015)**

El laboratorio posee un canal de olas de 40 m de largo, 1 m de ancho y 1,2 m de profundidad, en un extremo posee una paleta de oleaje que puede generar olas regulares e irregulares, además tiene 2 sondas de absorción de ondas dinámicas para compensar de esta forma las olas que se reflejan en el otro extremo en la estructura.

Para medir en Run-Up se analizaron tres técnicas diferentes, la idea inicial fue usar líneas batimétricas que fueron construidas conectando clavos con tanzas entre sí a una misma altura. La segunda fue poner un sensor directamente en el piso que mida la altura de las olas y la tercera fue analizar el Run-Up con una cámara de video y analizarlo después de completar el test.

Las dos primeras técnicas resultaron fallidas, por lo que utilizaron la tercera. Esta consistió en pegar en el suelo con papel plástico una escala, con líneas de 1 mm de incremento, la cámara de video se colocó al costado del canal (Figura 17)



**Figura 17.** Medición en Stellenbosch

- **Laboratorio de Hidráulica de Instituto Nacional del Agua, Estudio de resistencia al oleaje de unidades premoldeadas Betoncover y Betonplan (Grande et al., 2005 )**

Los ensayos se realizaron en un canal de olas de 28 m de largo, 0,60 m de ancho y 0,70 m de profundidad. En uno de sus extremos tiene ubicado el generador de olas del tipo de placa plana, capaz de generar olas aleatorias, en el otro extremo se encuentra un talud con inclinación variable entre 1:2 y 1:4.

Las olas generadas en el canal fueron aleatorias, el espectro de energía fue de tipo Jonswap ( $\gamma = 3,3$ ), las alturas y periodos de olas fueron variables.

La medición del Run-Up fue por medio de video-filmación desde un punto elevado perpendicular al talud.

A partir del periodo medio de las olas correspondiente a cada ensayo, se estimó la cantidad promedio de olas que incidieron sobre el talud durante la medición de Run-Up, se calculó el 2% de ellas y se adjudicó a Ru 2% el valor de Run-Up medido que ocupó esa posición en la muestra total de valores observados y ordenado de mayor a menor.

## 2.5. CÁLCULO DE ERRORES

Debido a que todas las medidas están afectadas por algún grado de error experimental, resulta importante determinar y cuantificar los mismos. Se determinaron los siguientes errores para cada una de las medidas:

- **Error absoluto:** Es la diferencia entre el valor medido por el programa o el sensor según el caso considerado y la medida exacta, es este caso la obtenida de forma visual.

$$Ea = Valormedido - Valorreal$$

- **Error relativo:** Es el cociente entre el error absoluto y el valor exacto multiplicado por 100 para tener el valor en porcentaje.

$$Er = \frac{Ea}{Valorreal} * 100$$

- **Error medio cuadrático o root mean square (RMS)** es un parámetro muy utilizado en la estadística y se define como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n}}$$

Donde  $e$  es el valor real de la variable,  $\bar{e}$  es su valor estimado y  $n$  es el número de predicciones. De esta manera el modelo que menor RMS tiene es el que mejor aproxima a los valores reales.

### **3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

En el presente capítulo se hace una descripción completa de las características del canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica utilizado para los ensayos y de los instrumentos utilizados. Luego se hace referencia a la metodología de trabajo empleada, y a los casos analizados durante ensayos.

#### **3.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

##### **3.1.1. Canal de oleaje**

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 18). Este canal vidriado puede cumplir dos funciones, tanto como canal de pendiente variable como canal de oleaje.

Esta 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 18.** 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 18). 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 19) 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).

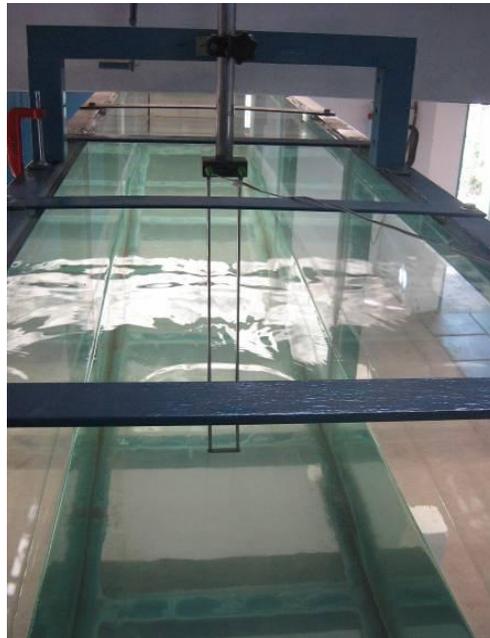


**Figura 19.** Generador de oleaje

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 20) 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 20.** Sensor de tipo resistivo

### 3.1.2. 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.

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 21).

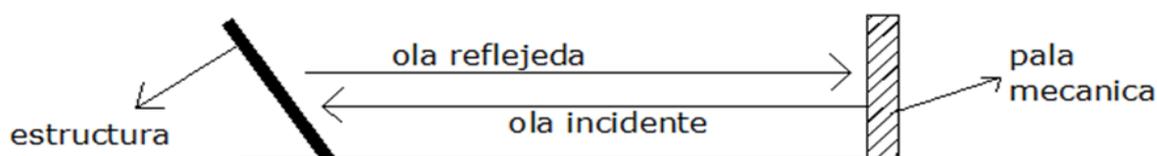


Figura 21. Esquema de oleaje con Absorción Dinámica

En caso de no tener absorción dinámica el efecto que se genera es el de ola re-reflejada (Figura 22).

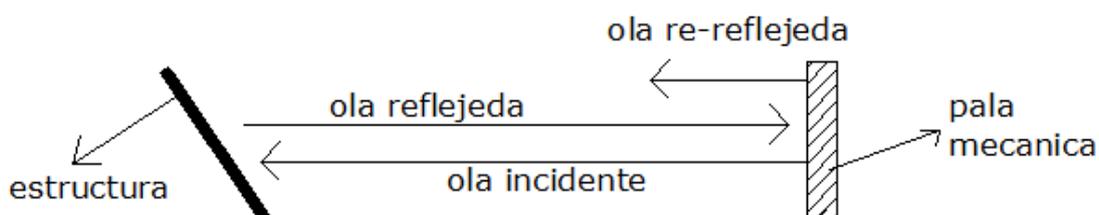


Figura 22. Esquema de oleaje sin Absorción Dinámica

Se debe de tener buena absorción para diferentes peraltes del oleaje ("Bulk Reflection" <math><10\%</math>). En trabajos previos realizados en el LH, se han experimentado diferentes geometrías, llegando a determinar que la mejor absorción se da para una playa de tipo parabólico.

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

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

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

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

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

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

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

Si la rampa es impermeable, el oleaje rompe en voluta o decrestamiento, 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 23).

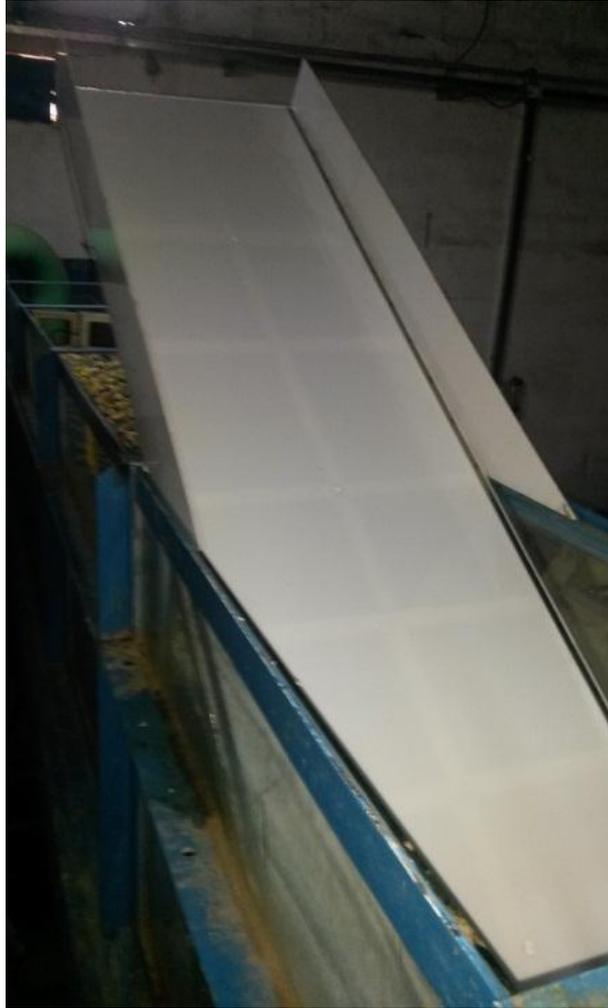


**Figura 23.** Playa absorbente

### **3.1.3. Diseño de la estructura**

La estructura es una de las partes principales del modelo físico de la represa, ya que representa el talud de la presa aguas arriba, en la (Figura 24) se observa la misma colocada en el canal de oleaje. Fue construida en el laboratorio de hidráulica y se utilizaron las mismas pendientes de los taludes del prototipo adaptándose a las dimensiones del canal del laboratorio de hidráulica, resultando 1V:1,5H.

El material usado para la construcción 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 tales como coeficiente de rozamiento. En cuanto al soporte, se diseñó una estructura metálica que le confirió la estabilidad ideal para los ensayos establecidos.



**Figura 24.** Estructura utilizada en modelo físico

### **3.2. INSTRUMENTAL EMPLEADO**

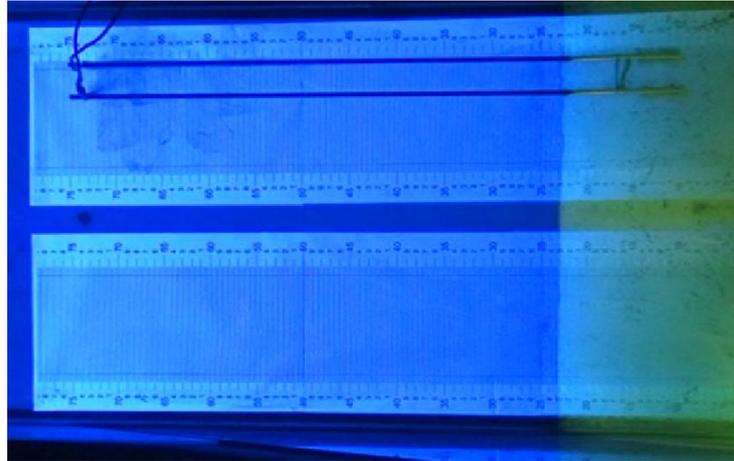
Resulta fundamental la disposición de una cámara de filmación de alta frecuencia y buena resolución, para tener de esta forma una buena calidad en las imágenes que serán luego procesadas y analizadas. Para ello se colocó la cámara de filmación sobre una trípode de forma perpendicular a la estructura que simula el talud, como se observa en la (Figura 25). De esta manera es posible visualizar en forma conveniente el oleaje que incide en la misma al analizar los videos. Se utilizaron dos cámaras, una Sony DS-H20 y otra SONY RX100 realizando zoom sobre la estructura y sin realizar según el video, así es posible tener más opciones para poder comparar resultados y ver cual resulta conveniente.



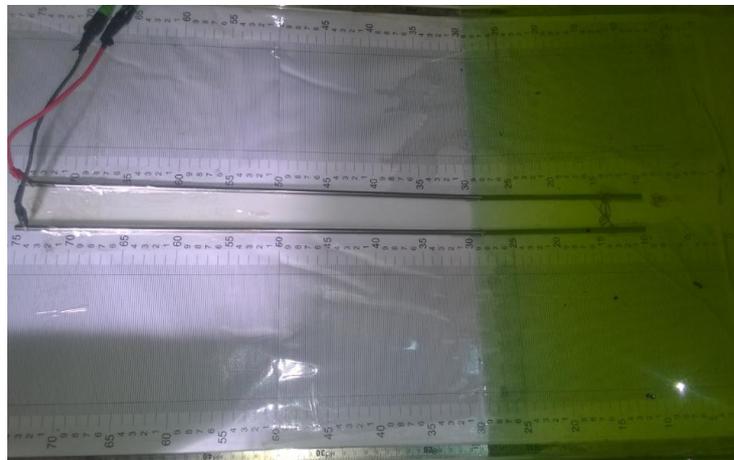
**Figura 25.** Trípode y cámara de video

Para poder medir visualmente los valores de olas resultantes durante el proceso de la validación de la técnica, se dispuso en la estructura de dos reglas de papel cubiertas con film plástico, para evitar que resulten mojadas y por lo tanto arruinarse. Las reglas fueron graduadas cada dos milímetros, marcando los centímetros con número, resulta así más fácil la interpretación posterior de los valores de Run-Up sobre la estructura al momento de analizar las imágenes.

Conjuntamente se colocaron dos sensores resistivos de oleaje apoyados sobre la estructura (talud), inicialmente en el extremo derecho y luego en el centro de la estructura como se observa en la (Figura 26) y (Figura 27) respectivamente.



**Figura 26.** Sensores en el extremo derecho y regla en el canal



**Figura 27.** Sensores en el centro y regla en el canal

Los sensores utilizados son de marca Wallingford, modelo HRIA-1014 de longitud 600 mm. Los mismos comprenden dos barras de acero inoxidable con un plástico que las une en cada extremo, en la (Figura 28) se muestra una fotografía de ellos.

Son de tipo resistivo, funcionan midiendo la corriente que fluye entre las dos barras de acero inoxidable que están inmersas en el agua. Esta corriente es convertida a un voltaje de salida que es directamente proporcional a la profundidad a la que se encuentran inmersos.

En una computadora se registran los valores de altura que alcanzan las distintas olas, obteniendo una planilla en Excel. En algunos ensayos se registraron 25 medidas por segundo y en otros 50.



**Figura 28.** Sensor HRIA-1014

Para mejorar el contraste de las imágenes y permitir detectar de forma óptima las oscilaciones se le agregó al agua del canal fluoresceína, además se colocaron luces led blancas lateralmente y una luz negra arriba del canal en correspondencia con la estructura. Los ensayos se realizaron en semi-oscuridad para aumentar el contraste entre la lámina de agua en movimiento y el fondo blanco de la estructura con la regla (Figura 29).



**Figura 29.** Canal durante ensayo

Una vez dispuestas todos los elementos mencionados anteriormente, se llevó el agua al nivel de reposo, con la ayuda de la regla que posee el canal en un extremo (Figura 30), en este caso se trabajó con una altura de 60 cm en la regla, correspondiendo un valor del nivel de agua de 23 cm en la escala de papel dispuesta en el talud.



Figura 30. Regla para medir altura de agua

En la (Figura 31) se observa un esquema de lo explicado anteriormente sobre la disposición del instrumental empleado al momento de los ensayos.

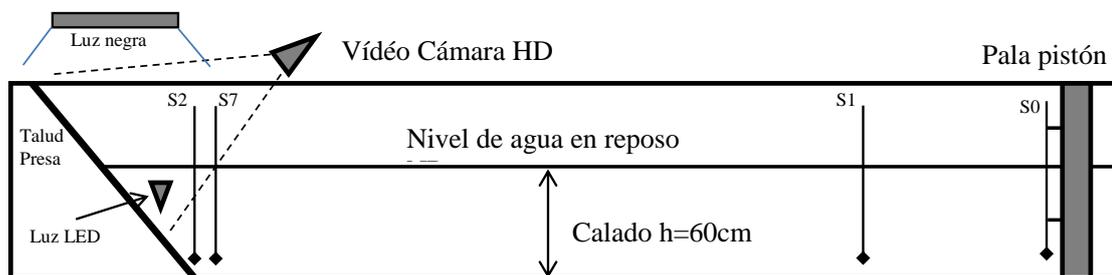


Figura 31. Esquema de los elementos

#### 4. PROGRAMA RIM (RUN-UP IMAGE MEASUREMENT)

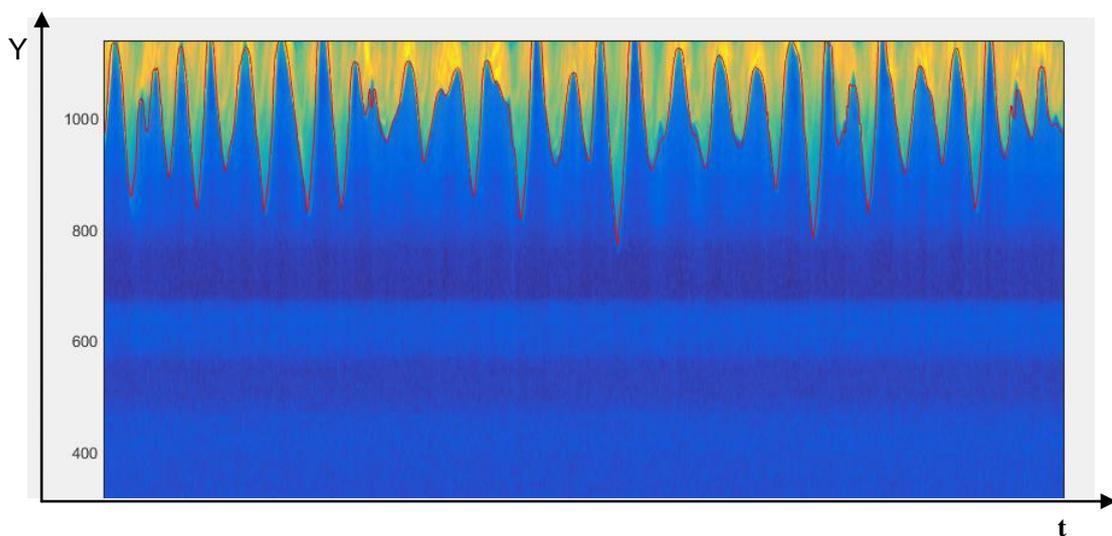
El programa RIM (Patalano, 2016) fue desarrollado en código MATLAB, permite a través del procesamiento de imágenes obtener los valores de Run-Up de cada una de ellas, presentando estos valores en una tabla de Excel.

Se basa en una binarización de las imágenes, esta es una técnica que consiste en una reducción de información de una imagen digital a dos valores de intensidad, 0 negro y 255 blanco. Se compara cada pixel de la imagen con un determinado valor de umbral, los valores que sean mayores que el umbral toman un valor de 255 es decir blanco y los menores un valor 0 lo que resulta negro.

Esta técnica se emplea para separar regiones de interés de una imagen del resto. En este caso se utilizó para separar la ola incidente asignándole un valor de 255, de la estructura colocada en el canal a la que fue asignado un valor de 0.

Luego el programa obtiene un perfil de los valores de intensidad sobre el medio de la rampa para cada instante de tiempo, de esta forma resulta posible extraer el contorno entre las dos regiones determinadas, este valor corresponde a la evolución temporal del Run-Up en pixeles.

En la (Figura 32) se observa superpuesto el valor del perfil de intensidad a lo largo del tiempo con el contorno determinado que se encuentra marcado en color rojo.

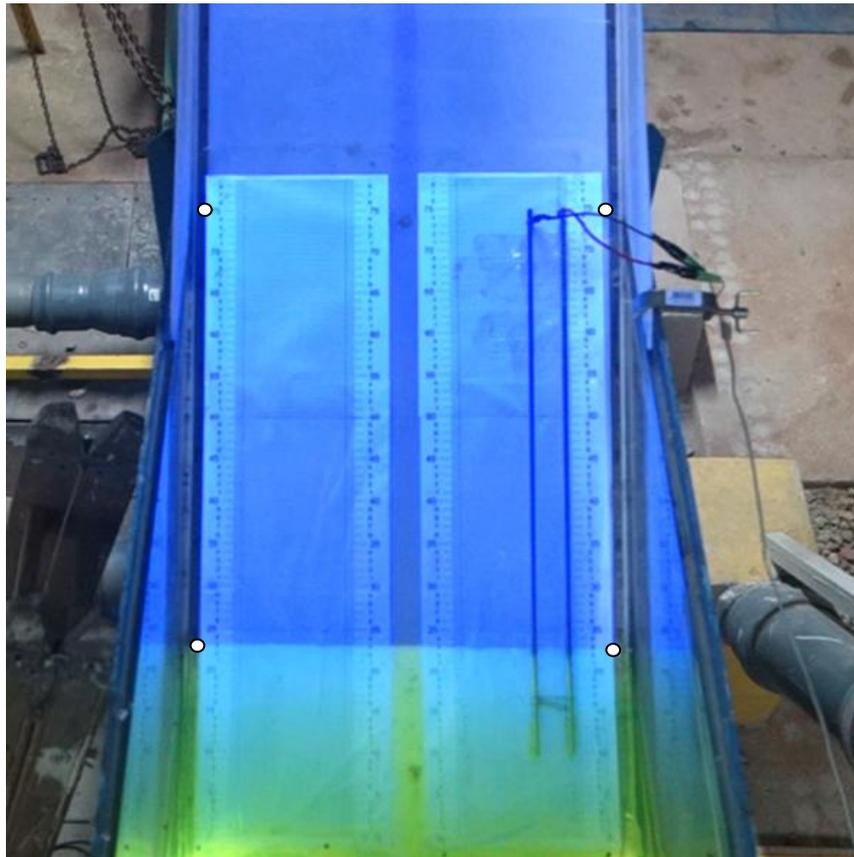


**Figura 32.** Perfil de intensidad a lo largo del tiempo

En el eje de abscisas se encuentra representado el tiempo en el ensayo y en el eje de las ordenadas la progresiva sobre el perfil.

Por último resulta necesario determinar el valor de Run-Up en unidades métricas, esto se consigue a través de una rectificación de los píxeles, debido a que la cámara se encuentra en una posición oblicua con respecto a la rampa, por lo que es inevitable conocer previamente las coordenadas reales de cuatro puntos de control.

Para determinar las coordenadas de los puntos (Figura 33), se midieron las distancias entre ellos de forma manual con cinta métrica. Se eligieron dos puntos inferiores al nivel de reposo del agua y dos al nivel de 75cm de la regla graduada.



**Figura 33.** Puntos de control

Como parte de la práctica supervisada se realizó un manual de utilización del programa, que se puede ver en el anexo junto al código de programación del mismo.

## 5. VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE RUN-UP

Para realizar la etapa de validación de la técnica se dispusieron de diferentes ensayos, tanto de oleaje regular como irregular, en donde se comparó los resultados de Run-Up obtenidos través del programa RIM, con los sensores resistivos de oleaje y el valor determinado de forma visual en una regla colocada en el talud de la estructura, considerando como correcto este último valor.

Los mismos consistieron en generar un oleaje con la pala mecánica ubicada en el extremo del canal y grabar con la cámara de filmación las olas incidentes sobre la estructura, donde al mismo tiempo los sensores registraba el oleaje. Se comenta a continuación la metodología experimental realizada y los resultados obtenidos con la misma.

### 5.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se dispuso como se menciona anteriormente dos cámaras de filmación, filmando con cada una de ellas videos de aproximadamente 10 minutos. Estos videos fueron descompuestos en 30 imágenes por segundo de filmación, mediante el programa RIVER (Patalano 2015). En la Tabla 3 se muestran los casos analizados para la validación de la técnica.

Experimento	Zoom	Cámara	Tipo de oleaje
1	No	Sony RX100	Regular
2	No	Sony RX100	Irregular
3	No	Sony DS-H20	Irregular
4	Si	Sony DS-H21	Irregular

**Tabla 3.** Casos analizados

Primero se analizaron las imágenes en diferentes tramos, desde la 500-1000, 2500-3000, 5000-5500 y 8000-8500 o desde la 500-1000, 5000-5500, 10000-10500, 15000-15500 según la duración del video, se eligieron estos tramos para tener un valor representativo de distintos puntos a lo largo del transcurso del ensayo. En cada uno se seleccionó la imagen correspondiente al mayor valor de Run-Up y se procedió a determinar la magnitud del mismo con los tres métodos mencionados y comparar los resultados obtenidos.

Luego se analizaron una serie de imágenes, desde la de mayor valor de Run-Up de todo el video, hasta la correspondiente al valor de R-Up2%, este último valor fue determinado previamente mediante la técnica zero crossing (Figura 34). Esta es una técnica computacional que básicamente lo que realiza es un análisis de series de tiempo, determinando hasta qué punto la superficie del agua se extiende por encima del nivel medio de agua.

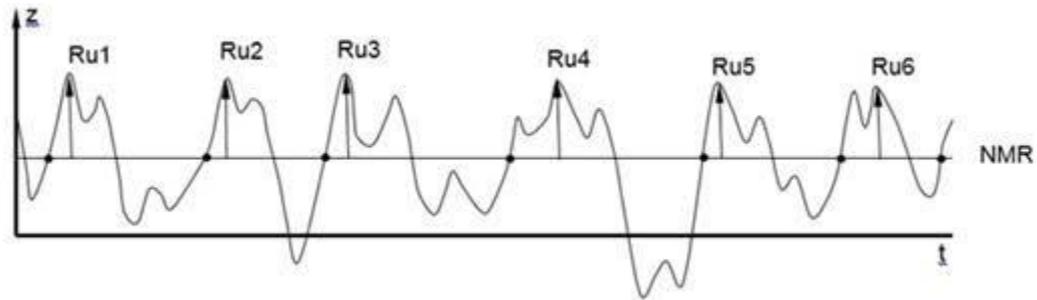


Figura 34. Zero crossing

A modo de ejemplo y para una mejor comprensión de la técnica se puede observar los valores obtenidos para un video de oleaje regular. En este caso se analizó a los 12 segundos de filmación en el tramo de 5000-5500 imágenes, del experimento número 1.

En la (Figura 35) se encuentra superpuesto el oleaje determinado con el programa RIM graficado en azul y el valor determinado por los sensores en naranja para el tramo mencionado. En el eje de abscisas se encuentra el tiempo considerando como valor inicial el correspondiente a la imagen 5000 y en el eje de ordenadas el valor del oleaje.

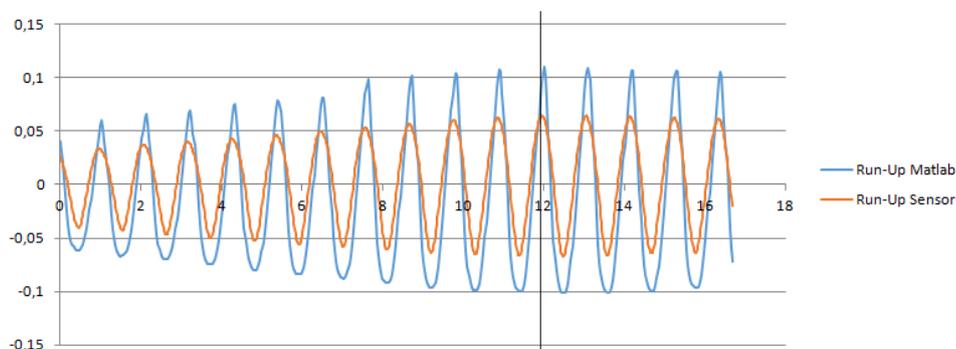
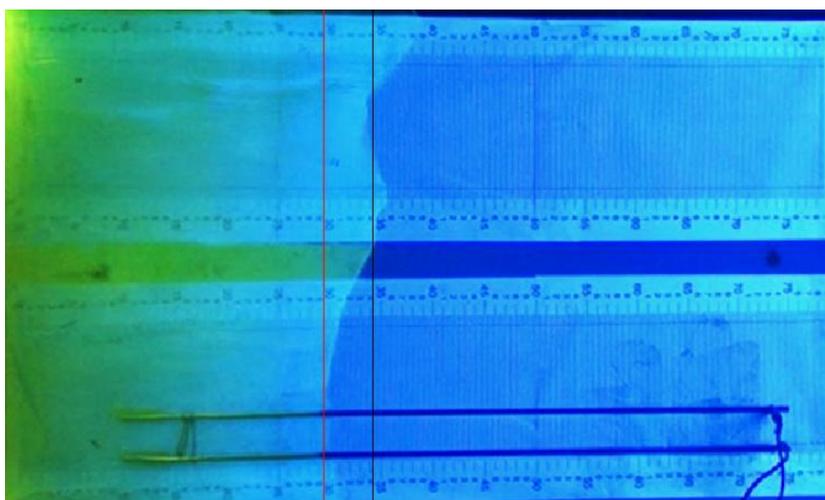


Figura 35. Superposición de oleaje

Una vez determinado el punto a analizar (12 segundos), se buscó la fotografía correspondiente (Figura 36), en ella observamos con línea negra el valor determinado con RIM y con rojo el del sensor. La diferencia es producida por la distinta posición en donde analiza el Run-Up el programa y los sensores. El programa analiza en el medio de la imagen y los sensores en el extremo derecho en donde se encontraban colocados.



**Figura 36.** Imagen para comparar

En la Tabla 4 se muestra los valores obtenidos con las tres formas mencionadas. Regla RIM y Regla S corresponden a la forma de llamar a las mediciones determinadas en forma visual de los valores del programa y sensores respectivamente.

RIM (cm)	Regla RIM(cm)	Sensor (cm)	Regla S (cm)
34,017	34	29,444	30

**Tabla 4.** Comparación de valores

En la Tabla 5 observamos el valor del error absoluto y relativo que surge de la comparación del Run-Up obtenido mediante el programa RIM y la técnica visual.

Exp	Foto	RIM(cm)	Regla RIM(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	4592	34,017	34	0,017	0,05

**Tabla 5.** Comparación RIM-Visual

La Tabla 6 es similar a la anterior, pero con los valores obtenidos por medio de los sensores y la medición visual.

Exp	Foto	RIM(cm)	Regla RIM(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	4592	29,444	30	-0,556	-1,853

**Tabla 6.** Comparación Sensores-Visual

El proceso descrito anteriormente fue realizado para cada una de las imágenes consideradas para validar la técnica.

## 5.2. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos con las tres formas analizadas en la metodología experimental y el cálculo de los errores correspondientes. Se presenta por medio de tablas todos los valores para el video del experimento 1, mientras que para los restantes videos solamente los valores de la ola más grande registrada durante el ensayo y la del R-Up2%.

Comenzando con el experimento 1 el cual fue un ensayo de oleaje regular, se observa en la Tabla 7 los resultados del programa RIM mientras que en la Tabla 8 los resultados de los sensores, acompañado del cálculo de los errores. Además en las tablas se observan el tramo analizado y el número de fotografía correspondiente a la ola más grande de cada uno de ellos. Regla RIM corresponde al valor detectado de forma visual como se menciona anteriormente.

Se recuerda que la diferencia de nivel de lectura entre RIM y el sensor es debido a la distinta posición de análisis de cada uno (Figura 26), (Figura 27).

Exp	Tramo	Foto	RIM(cm)	Regla RIM(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	500-1000	2550	36,123	35,5	0,62	1,75
	2500-3000	4592	34,017	34	0,02	0,05
	5000-5500	6964	31,087	31,5	-0,41	-1,31
	8000-8500	9994	30,986	31,5	-0,51	-1,63

**Tabla 7.** Comparación RIM-visual por tramo

Exp	Tramo	Foto	Sensor(cm)	Regla S(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	500-1000	2550	31,041	31,5	-0,46	-1,46
	2500-3000	4592	29,444	30	-0,56	-1,85
	5000-5500	6964	28,209	28	0,21	0,75
	8000-8500	9994	27,937	28	-0,06	-0,23

**Tabla 8.** Comparación sensores-visual por tramo

Luego las Tabla 9 y Tabla 10 corresponden al tramo comprendido desde la ola más grande detectada a lo largo de todo el ensayo hasta el valor correspondiente al R-Up2%. Analizando de esta forma los valores del oleaje de mayor magnitud, que resultan ser los más influyentes en el cálculo del resguardo de la presa.

Experimento	Foto	RIM(cm)	Regla RIM(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	2155	37,53	37,5	0,03	0,08
	2122	37,53	37,5	0,03	0,08
	2188	37,53	37,4	0,13	0,35
	2220	37,16	37,2	-0,04	-0,11
	2253	36,8	36,6	0,20	0,55
	2352	36,63	36,3	0,33	0,91

**Tabla 9.** Comparación RIM-visual valor máximo hasta R-Up2%

Experimento	Foto	Sensor(cm)	Regla S(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo(%)
1	2155	32,86	33	-0,14	-0,43
	2122	32,69	33	-0,31	-0,93
	2188	32,54	32,9	-0,36	-1,10
	2220	32,48	32,9	-0,42	-1,26
	2253	32,20	32,5	-0,30	-0,93
	2352	31,76	31,8	-0,04	-0,13

**Tabla 10.** Comparación sensores-visual valor máximo hasta R-Up2%

Se observa en los resultados obtenidos para este ensayo que tanto los valores determinado por el programa como por los sensores resultan de una gran aproximación al valor verdadero, con errores menores al 2%.

Finalmente en la Tabla 11 y Tabla 12 se presentan los resultados de los valores correspondientes al Run-Up máximo y al R-Up2% para los distintos ensayos realizados, junto con los errores absolutos y relativos.

Se determinó presentar únicamente estos dos valores ya que son los fundamentales en los estudios y formulaciones teóricas del tema.

Ensayo	Valor	RIM(cm)	Regla RIM(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo (%)
1	R-Up max	37,53	37,50	0,03	0,08
	R-Up 2%	36,63	36,30	0,33	0,91
2	R-Up max	52,60	52,50	0,10	0,20
	R-Up 2%	47,07	47,00	0,07	0,15
3	R-Up max	47,60	47,50	0,10	0,21
	R-Up 2%	45,31	45,00	0,31	0,69
4	R-Up max	51,96	51	0,96	1,88
	R-Up 2%	47,82	47,5	0,32	0,67

**Tabla 11.** Comparación RIM-visual de todos los ensayos

Ensayo	Valor	Sensor(cm)	Visual S(cm)	Error absoluto(cm)	Error relativo (%)
1	R-Up max	32,69	33,10	-0,41	-1,24
	R-Up 2%	31,76	31,80	-0,04	-0,13
2	R-Up max	40,46	41,00	-0,54	-1,32
	R-Up 2%	39,28	40,50	-1,22	-3,01
3	R-Up max	44,76	47,50	-2,74	-5,77
	R-Up 2%	41,94	45,00	-3,06	-6,80
4	R-Up max	45,60	51,00	-5,40	-10,59
	R-Up 2%	42,84	47,50	-4,66	-9,81

**Tabla 12.** Comparación sensores-visual de todos los ensayos

Se observan en los valores medidos que el sensor de olas presenta mayores errores que la técnica por imágenes utilizando el programa RIM. La diferencia es aún mayor para el caso de las olas más grandes, en donde se observa que debido a que en las olas mayores la lámina de agua presenta un menor espesor, la misma no llega a cubrir todo el diámetro del sensor de oleaje, arrojando valores más pequeños este último.

## 6. DETERMINACIÓN DEL RUN-UP

Luego de validar la técnica de determinación de Run-Up por medio de imágenes, se aplicó la misma a diferentes ensayos ya realizados en el Laboratorio de Hidráulica en marco del proyecto de Estudio experimental del Run-Up en un talud interior de una presa de hormigón en un embalse (2016), y a los ensayos realizados en algunas prácticas Supervisadas (Fistarol, 2016; Pierobon, 2016). Del total de ensayos realizados se seleccionaron 14 ensayos a los fines de comparar los resultados con formulaciones teóricas ya presentadas en el capítulo 3.

A continuación se comenta brevemente los ensayos realizados donde se aplicó la técnica y luego se presentan los resultados obtenidos.

### 6.1. ENSAYOS REALIZADOS

Las experimentaciones se realizaron en el canal de oleaje del Laboratorio de Hidráulica. Las mediciones del oleaje se efectuaron utilizando 3 sensores de nivel de tipo resistivos. El primer sensor (S1) se colocó a poca distancia de la pala para realizar un control sobre la propagación del oleaje; los otros dos sensores (S7 y S2) se utilizaron para poder separar la ola incidente de la reflejada (utilizando la técnica de Baldock, 1999) y obtener los parámetros de la ola incidente a pié de dique.

Se realizaron dos series de siete ensayos para dos períodos diferentes, sin absorción dinámica y con absorción dinámica activada. La absorción dinámica permite absorber el oleaje reflejado desde la estructura que viaja hacia la pala generadora. Se efectuó una repetición de cada ensayo. En la Tabla 13 se muestran las combinaciones de oleajes, con los parámetros que definen los escenarios ensayados.

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

Tabla 13. Parámetros de ensayo

Siendo

- $H$  = nivel de agua en reposo
- $N$  = duración del ensayo
- $H_s$  = altura de ola significativa
- $\xi_{op}$  = parámetro de Iribaren
- ABS = sistema de absorción activado
- Rep = repetición del escenario
- Pd = ensayos con playa disipativa

La metodología empleada fue la siguiente:

- 1) Definición de los ensayos a realizar;
- 2) Realización de los ensayos con playa disipativa y mediciones del oleaje en la posición que corresponde a pie de dique, sin estructura colocada;
- 3) Realización de los ensayos con la estructura instalada y sin absorción dinámica, tratamiento de la señal de oleaje a pie de dique (separación oleaje incidente y reflejado) y medición del Run-Up;
- 4) Calibración de la absorción dinámica;
- 5) Realización de los ensayos con la estructura instalada y con absorción dinámica, tratamiento de la señal de oleaje a pie de dique (separación oleaje incidente y reflejado) y medición del Run-Up;

Todos los ensayos fueron de una duración de 1000 olas y se realizaron por un nivel de agua ( $h$ ) constante de 60cm.

Para reproducir un oleaje irregular, el espectro más utilizado es el JONSWAP (para estados de mar de oleaje no completamente desarrollado) y Pierson-Moskowitz (para estados de mar de oleaje completamente desarrollado). Para estados de mar en aguas poco profundas se puede usar el espectro tipo TMA. Para el espectro JONSWAP se adopta normalmente el valor de apuntamiento  $\gamma=3.3$  y  $\sigma_a=0.07$ ,  $\sigma_b=0.09$ . Luego, el espectro de energía viene caracterizado principalmente por dos parámetros espectrales del oleaje. Los más comúnmente utilizados son la altura de ola significativa  $H_s$  o del momento de orden cero del espectro,  $H_{m0}$ , y el período de pico  $T_p$ . Al mismo tiempo se utilizan los parámetros evaluados en la serie temporal determinados mediante análisis del tipo zero crossing: la altura de ola significativa,  $H_s$  o  $H_{1/3}$ , la altura promedio de 1/10 de las mayores olas  $H_{1/10}$ , el período medio  $T_z$ , etc en este estudio se generaron oleajes con espectro JONSWAP.

La calibración de la absorción dinámica se efectuó realizando los mismos ensayos sin la estructura en el canal y con una playa disipativa de piedras colocada en el extremo del canal opuesto a la pala generadora de oleaje.

## 6.2. RESULTADOS

En el marco de la PS se analizaron parte de los ensayos realizados. Se obtuvo el valor de Run-Up con el programa RIM, luego por medio de la técnica zero crossing se determinó el R-Up2% para cada caso y finalmente este valor se comparó con las formulaciones teóricas mencionadas en el capítulo 3.

En la (Tabla 14) se observan los valores de R-Up2% obtenido como se menciona anteriormente y la comparación con las formulaciones teóricas.

Se muestran los principales resultados obtenidos en los ajustes de las formulaciones adoptadas con los datos experimentales. Es importante destacar que las formulaciones han sido obtenidas experimentalmente con ensayos en diferentes condiciones con respecto a los ensayos en el LH y con estructuras diferentes y que han sido obtenidas con ensayos sin absorción dinámica.

Hm0 pie (m)	Tp pie (S)	$\xi$	R <sub>u2%</sub> (m)	R-Up2% (m)	
				Burcharth y Hughes	Eurotop
0,021	1,08	6,207	0,069	0,068	0,071
0,029	1,08	5,282	0,103	0,100	0,096
0,037	1,09	4,719	0,129	0,132	0,121
0,044	1,09	4,328	0,157	0,160	0,143
0,052	1,08	3,944	0,215	0,193	0,167
0,059	1,08	3,703	0,258	0,222	0,188
0,065	1,08	3,528	0,282	0,247	0,206
0,022	1,28	7,187	0,077	0,067	0,075
0,03	1,28	6,155	0,091	0,098	0,101
0,041	1,28	5,265	0,133	0,141	0,136
0,046	1,28	4,970	0,143	0,161	0,152
0,054	1,28	4,588	0,225	0,193	0,176
0,062	1,28	4,281	0,256	0,226	0,201
0,069	1,28	4,058	0,291	0,254	0,222

**Tabla 14.** Calculo de R-Up2%

En la Tabla 15 y Tabla 16 se realiza una comparación de los errores relativos y absolutos de cada medición para los métodos de Burcharth-Hughes y del Eurotop respectivamente. Luego para determinar que técnica aproxima mejor a los valores reales se calculó el erro medio cuadrático (RMS).

<b>Burcharth y Hughes</b>			
<b>Hm0 pie (m)</b>	<b>Tp pie (s)</b>	<b>Error absoluto (m)</b>	<b>Error relativo (%)</b>
0,021	1,08	-0,001	-0,825
0,029	1,08	-0,003	-3,044
0,037	1,09	0,003	1,997
0,044	1,09	0,003	1,857
0,052	1,08	-0,022	-10,243
0,059	1,08	-0,036	-14,030
0,065	1,08	-0,035	-12,541
0,022	1,28	-0,010	-12,499
0,03	1,28	0,007	7,771
0,041	1,28	0,008	6,262
0,046	1,28	0,018	12,778
0,054	1,28	-0,032	-14,020
0,062	1,28	-0,030	-11,753
0,069	1,28	-0,037	-12,545
<b>RSM</b>	<b>0,0221</b>		

**Tabla 15.** Errores Burcharth-Hughes

<b>Eurotop</b>			
<b>Hm0 pie (m)</b>	<b>Tp pie (s)</b>	<b>Error absoluto (m)</b>	<b>Error relativo (%)</b>
0,021	1,08	0,002	2,521
0,029	1,08	-0,007	-6,652
0,037	1,09	-0,008	-6,042
0,044	1,09	-0,014	-9,092
0,052	1,08	-0,048	-22,414
0,059	1,08	-0,070	-27,223
0,065	1,08	-0,076	-27,107
0,022	1,28	-0,002	-2,481
0,03	1,28	0,010	10,963
0,041	1,28	0,003	2,172
0,046	1,28	0,009	5,972
0,054	1,28	-0,049	-21,628
0,062	1,28	-0,055	-21,539
0,069	1,28	-0,069	-23,672
<b>RSM</b>	<b>0,0412</b>		

**Tabla 16.** Errores Eurotop

Se observa que con el método de Burcharth-Hughes se obtienen mejores aproximaciones, esto se ve reflejado por el menor valor del parámetro RSM, como por la diferencia en los errores absolutos y relativos.

Luego se compararon los valores del Run-Up medidos ( $R_{u2\%}$ ) con las formulaciones clásicas presentadas en los libros de Obras Hidráulicas y presas, que fueron mencionadas en el apartado 2.3.5, ecuación de Leliavsky y ábaco de Saville, McClendon y Cochran. Es importante aclarar que las formulaciones permiten estimar valores de Run-Up aproximados los cuales serán comparados con los valores medidos de R-Up2%. Estos resultados se observan la Tabla 17.

Hm0 pie (m)	Tp pie (S)	$\xi$	$R_{u2\%}$ (m)	Run-Up (m)	
				Leliavsky	Ábaco
0,021	1,08	6,207	0,069	0,056	0,050
0,029	1,08	5,282	0,103	0,074	0,070
0,037	1,09	4,719	0,129	0,091	0,089
0,044	1,09	4,328	0,157	0,105	0,106
0,052	1,08	3,944	0,215	0,119	0,125
0,059	1,08	3,703	0,258	0,132	0,142
0,065	1,08	3,528	0,282	0,143	0,156
0,022	1,28	7,187	0,077	0,061	0,053
0,03	1,28	6,155	0,091	0,080	0,072
0,041	1,28	5,265	0,133	0,104	0,098
0,046	1,28	4,970	0,143	0,115	0,110
0,054	1,28	4,588	0,225	0,131	0,130
0,062	1,28	4,281	0,256	0,147	0,149
0,069	1,28	4,058	0,291	0,160	0,166

**Tabla 17** Cálculo de Run-Up

En la Tabla 18 y Tabla 19 se observan los valores de dispersión entre las medidas, representado por el error absoluto y el valor del error relativo, siendo estos de una magnitud considerable. Se observa que el valor determinado con el ábaco de Saville, McClendon y Cochran ajusta mejor que la ecuación.

Para la ecuación de Leliavsky se utilizó el coeficiente k de lisura de rodamiento igual a 1,5 que es el valor máximo para presas. En este caso como el ensayo se realiza en laboratorio y el talud tiene una superficie de acrílico que es más lisa que la de una presa se podría incrementar este valor, de esa forma, los resultados serían más próximos. Cabe recordar la comparación se realiza sobre una medida de R-Up2% y un valor de Run-Up obtenido por formulaciones para el cálculo de revancha, por lo que resulta lógica tal diferencia.

<b>Leliavsky</b>			
<b>Hm0 pie (m)</b>	<b>Tp pie (S)</b>	<b>Error absoluto(m)</b>	<b>Error relativo</b>
0,021	1,08	-0,029	-28,337
0,029	1,08	-0,038	-29,688
0,037	1,09	-0,052	-33,385
0,044	1,09	-0,096	-44,487
0,052	1,08	-0,126	-48,806
0,059	1,08	-0,139	-49,411
0,065	1,08	-0,016	-20,508
0,022	1,28	-0,011	-12,084
0,03	1,28	-0,029	-21,618
0,041	1,28	-0,028	-19,739
0,046	1,28	-0,094	-41,746
0,054	1,28	-0,109	-42,661
0,062	1,28	-0,131	-44,977
<b>RSM</b>	<b>0,07989</b>		

**Tabla 18.** Errores Leliavsky

<b>Abaco Saville, McClendon y Cochran</b>			
<b>Hm0 pie (m)</b>	<b>Tp pie (S)</b>	<b>Error absoluto(m)</b>	<b>Error relativo</b>
0,021	1,08	-0,019	-26,957
0,029	1,08	-0,033	-32,427
0,037	1,09	-0,040	-31,163
0,044	1,09	-0,051	-32,739
0,052	1,08	-0,090	-41,953
0,059	1,08	-0,116	-45,116
0,065	1,08	-0,126	-44,681
0,022	1,28	-0,024	-31,429
0,03	1,28	-0,019	-20,879
0,041	1,28	-0,035	-26,015
0,046	1,28	-0,033	-22,797
0,054	1,28	-0,095	-42,400
0,062	1,28	-0,107	-41,875
<b>RSM</b>	<b>0,069</b>		

**Tabla 19.** Errores ábaco Saville, McClendon y Cochran

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología experimental para la medición del Run-Up en laboratorio mediante una técnica basada en el análisis de imágenes. Esta técnica tiene la ventaja de ser no intrusiva y sistemática ya que una vez calibrado los valores de entrada al programa, permite calcular los valores de Run-Up en todo un ensayo.

Luego del análisis y comparación de los valores de Run-Up con las diferentes técnicas, se determina que los resultados obtenidos mediante el programa RIM presentan errores aceptables y menores al 2%. Los valores de error absoluto o dispersión entre ambas medidas resultan menores al centímetro. Esta pequeña diferencia se debe a la calidad de grabación en que fueron realizados los videos, ya que no permite determinar de forma visual con precisión al milímetro los valores en la fotografía. Por lo tanto este error o dispersión en los valores de las medidas se corregiría al utilizar una cámara de filmación con mayor resolución o colocando la cámara más cerca de la zona a registrar.

Se cumple de esta forma el objetivo principal de la práctica supervisada de validar la técnica para determinar el valor de Run-Up por oleaje en laboratorio mediante el procesamiento de imágenes.

Respecto al análisis y comparación de los valores obtenidos por medio de los sensores resistivos de la firma Wallingford y la técnica visual, se determina que para oleaje regular los sensores funcionan de manera correcta, obteniendo resultados similares con diferencia al milímetro como en el caso del programa RIM.

El problema radica en oleaje irregular, en ese caso la diferencia de valores obtenidos con los sensores de oleaje resulta muy significativa, principalmente para olas mayores, por lo que se establece que no son representativos los valores obtenidos por este método. La causa de esta diferencia de valores se debe a la posición de los sensores, ya que los mismo se encuentran colocados sobre el talud con la inclinación que este posee, al llegar las olas de mayor magnitud no llegan a mojarlos lo suficiente como para registrar el valor correspondiente, por lo que registra valores considerablemente más pequeños a los reales, en donde el agua si es suficiente como para ser detectada por los mismos.

En relación a los resultados obtenidos de R-Up2% con el programa RIM y la comparación con las formulaciones teóricas analizadas, la formulación que mejor ajusto los valores fue la de Burcharth y Hughes.

Con respecto a los objetivos específicos y personales planteados al comienzo de la

práctica supervisada pude cumplir los mismos de forma satisfactoria. Me permitió profundizar sobre temas del área de la hidráulica como el análisis de olas, métodos de medición del Run-Up en laboratorio. Al mismo tiempo me permitió aplicar conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil.

## 8. BIBLIOGRAFIA

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.

Espinosa, Manuel E., (2010). Ingeniería de presas escolleras. 1a. ed. Mendoza, Argentina. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ingeniería 456 p.;

Fistarol, Franco, (2016). Modelación física del Run-Up por oleaje en el talud de la presa Jorge Cepernic, Practica Supervisada, FCEFyN – UNC, Cordoba, Argentina.

Grande A., Loschacoff S., Castellano R., Rodríguez C., Berrilio D., (2005). – Estudio de Resistencia al Oleaje de Unidades Premoldeadas Betoncover y BetoPlan, XXº Congreso Nacional del Agua, Mendoza, Argentina.

Gyssels Paolo, Tarrab Leticia, Pagot Mariana, Patalano Antoine, Hillman Gerardo, Rodriguez Andres.(2016) Estudio experimental del Run-Up en un talud interior de una presa de hormigón en un embalse, XXVII Congreso Latinoamericano De Hidráulica, Lima, Perú.

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 World Congress, (Roesgen 2003), 3–8

Pierobon, Juan, (2016). Modelación física del Run-Up por oleaje en el talud de la presa Jorge Cepernic. Practica Supervisada, FCEFyN – UNC, Cordoba, Argentina.

Roux, Abraham Pierre (2015). A re-assement of wave run up formulae, Thesis (MEng), Stellenbosch University, Sudafrica.

Vallarino, E. (2015). Tratado básico de presas, (7ª ed.) Garceta Grupo Editorial, España

Weber, Juan F. (2009) Guía de Trabajos Prácticos Laboratorio de Hidráulica, edUTecNe, Editorial de la U.T.N., Argentina

<http://equipit.hrwallingford.com/>

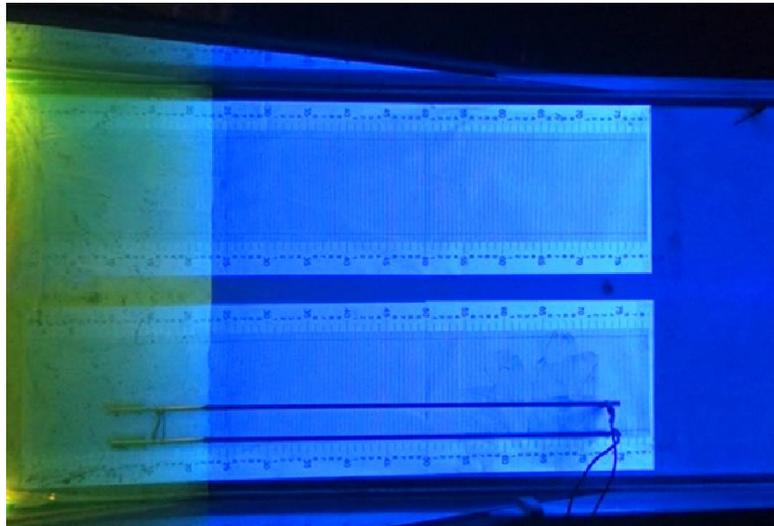
<http://www.represaspatagonia.com.ar/>

## 9. ANEXO

Se presenta el programa en detalles, explicando lo que debe realizar el usuario en los distintos pasos.

Resulta necesario para utilizar el programa filmar el ensayo del oleaje en el canal y luego descomponer el video en una serie de fotografías, esta tarea fue realizada con el programa RIVER (Patalano, 2015), donde se obtuvieron 30 imágenes por segundo de filmación.

Una vez obtenidas todas las imágenes para analizar, lo primero a realizar es guardar con el nombre de CP.jpg a la imagen de referencia, esta es una imagen en donde se encuentra el agua del canal en reposo (Figura 37), antes de comenzar el oleaje en el canal.



**Figura 37.** Imagen tipo para usar de referencia (CP)

El paso siguiente consiste en abrir el programa en Matlab, cargar las imágenes en la opción browse for folder (buscar carpeta), seleccionando la carpeta en donde se encuentran guardadas las imágenes.

Una vez abierto el programa y con las imágenes cargadas, se corre desde la línea 1 a 6 (Figura 38). En esta etapa RIM pide seleccionar las imágenes a procesar.

```

1 - [FileName, PathName, FilterIndex] = uigetfile
2 - Fig=imread([PathName FileName]);
3 - [FileName, PathName, FilterIndex] = uigetfile
4
5 - Fig=rot90(Fig);
6 - h=figure; imshow(Fig);
    
```

**Figura 38.** RIM líneas 1 a 6

El programa publicará en pantalla la imagen CP.jpg, en ella se deben medir las coordenadas de la franja vertical en donde desea conocer el valor de Run-Up, colocando las mismas en la línea 22, **fila =C (ymin:ymax, x)**. ymin e ymax son las coordenadas verticales mínimas y máximas respectivamente y x es el valor en horizontal. Para obtener las coordenadas debe ir a la opción data cursor y marcar el punto en donde desea conocerlas, como se observa en la (Figura 39). Es importante aclarar que el programa obtiene el valor únicamente en la línea vertical marcada (línea roja de la Figura 39), no en toda la imagen.

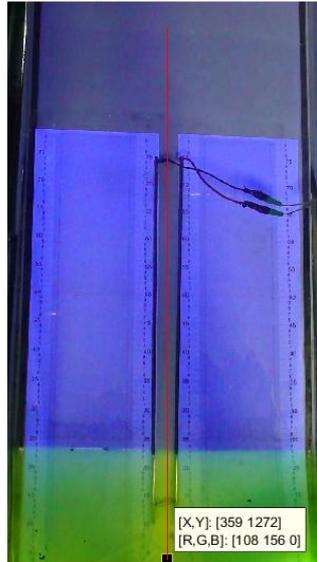


Figura 39. Obteniendo coordenadas

Una vez colocadas las coordenadas deseadas se debe proceder a correr la línea 15 a 26 (Figura 40).

```

15 - waitb=waitbar(0,'Calculando...')
16 - map=[];
17 - for i=1:length(FileName)
18 -     waitbar(i/length(FileName))
19 -     A=imread([PathName FileName{i}]);
20 -     A=rot90(A);
21 -     C=A(:, :, 2);
22 -     fila=C(49:1079, 355);
23 -     map=[map fila];
24 - end
25 - cd(PathName)
26 - save map map
--

```

Figura 40. RIM líneas 15 a 26

Cuando finalice el cartel busy en el extremo inferior izquierdo de la pantalla las imágenes se encontrarán cargadas para ser analizadas.

Luego se debe correr las líneas 33 y 34 (Figura 41)

```
33 - q=map(:,10000:13000);  
34 - figure; pcolor(q); shading flat
```

Figura 41. RIM líneas 33 a 34

El resultado de este paso se observa en la (Figura 42). Esta imagen debe ser dividida en cuatro partes midiendo las coordenadas verticales (y) de cada una de ellas, obteniéndolas de forma similar a la explicada anteriormente.

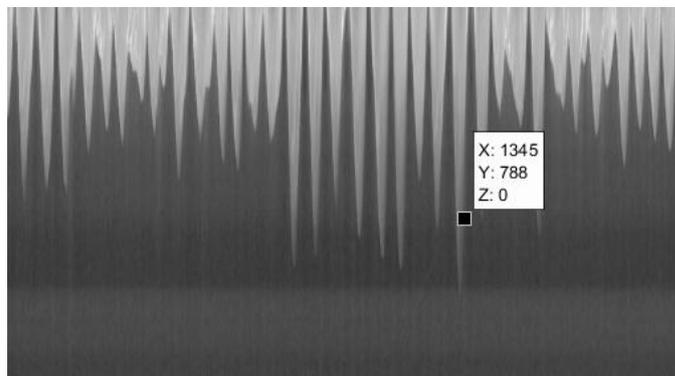


Figura 42. Resultado de correr línea 33 y 34

Estos valores serán colocados en la línea 38 a 41 (Figura 43).

```
38 - q_a=q(1:788, :);  
39 - q_b=q(789:991, :);  
40 - q_c=q(992:1200, :);  
41 - q_d=q(1201:end, :);
```

Figura 43. RIM líneas 38 a 41

Luego dentro de la opción APPS, buscar Image Segmenter-Load Image-Import From Workspace, allí seleccionar q\_a (Figura 44).

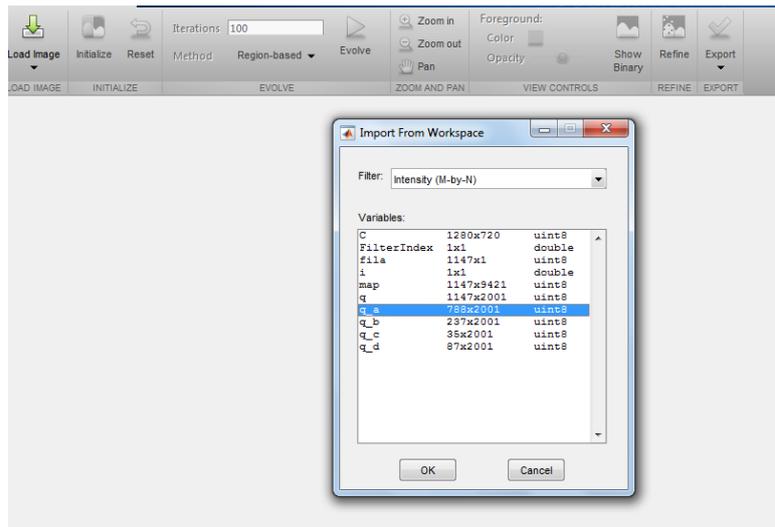


Figura 44. RIM q\_a

Ingresar en la opción initialization y dentro de ella en Set Automatic Thresholds buscar hasta que en la grafica de la (Figura 45) resulten los picos de color verde. Este paso es importante ya que en el se determina el valor de umbral para realizar la binarización, marcado con un recuadro rojo en la imagen.

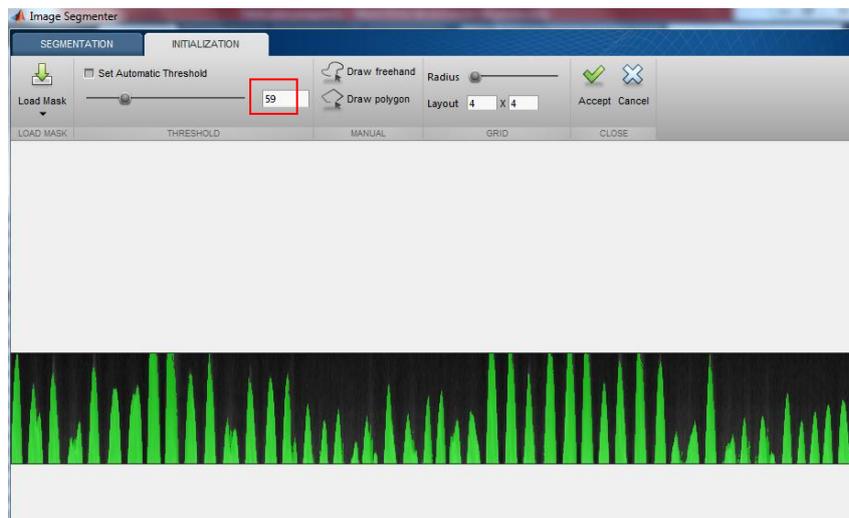


Figura 45. RIM-Set Automatic Thresholds

El valor determinado en el paso previo debe ser colocado en la línea 52 (Figura 46)

```

52 - mask_a = q_a>59;
53 - BW_a = bwareafilt(mask_a, [69 Inf]);
54   % BW_a = imfill(mask_a, 'holes');
55   % BW_a = bwareafilt(mask_a, [24 Inf]);
56
57 - mask_b = q_b>40;
58 - BW_b = imfill(mask_b, 'holes');
59   % BW_b = bwareafilt(mask_b, [37 Inf]);
60
61 - mask_c = q_c>47;
62   % BW_c = bwareafilt(mask_c, [663 Inf]);
63   BW_c = mask_c;
64
65
66 - mask_d = q_d>50;
67   BW_d = imfill(mask_d, 'holes');

```

Figura 46. RIM líneas 52 a 67

El proceso se debe repetir 4 veces desde q\_a hasta q\_d, reemplazando en las líneas 52, 57, 61, 66 según corresponda el valor.

Se continúa corriendo el programa desde la línea 35 a 107 (Figura 47)

```

35 - q=map;
36
37   %q_aa=q(1:543,:);
38   q_a=q(1:788,:);
39   q_b=q(789:991,:);
40   q_c=q(992:1200,:);
41   q_d=q(1201:end,:);
42   % q_d=q(661:end,:);
43   % q_e=q(465:539,:);
44   % q_f=q(540:end,:);
45
46   % mask_aa = q_aa>255;
47   % BW_aa = imfill(mask_aa, 'holes');
48
49
50
51
52 - mask_a = q_a>59;
53 - BW_a = bwareafilt(mask_a, [69 Inf]);
54   % BW_a = imfill(mask_a, 'holes');
55   % BW_a = bwareafilt(mask_a, [24 Inf]);
56
57 - mask_b = q_b>40;
58 - BW_b = imfill(mask_b, 'holes');
59   % BW_b = bwareafilt(mask_b, [37 Inf]);
60
61 - mask_c = q_c>47;
62   % BW_c = bwareafilt(mask_c, [663 Inf]);
63   BW_c = mask_c;
64
65

```

```

66 - mask_d = q_d>50;
67 - BW_d = imfill(mask_d, 'holes');
68
69 - % mask_d = q_e>200;
70 - % BW_e = imfill(mask_d, 'holes');
71 - %
72 - % mask_f = q_f>247;
73 - % BW_f = mask_f;
74 - % BW_d = bwareafilt(BW_d, [65 Inf]);
75
76 - % mask_e = q_e>107;
77 - % BW_e = imfill(mask_e, 'holes');
78 - % BW_d = bwareafilt(BW_d, [65 Inf]);
79 - %
80 - % BW=[BW_a;BW_b;BW_c;BW_d;BW_e;BW_f];
81
82 - % BW=[BW_aa;BW_a;BW_b;BW_c;BW_d];
83 - BW=[BW_a;BW_b;BW_c;BW_d];
84 - % BW = imfill(BW, 'holes');
85
86
87
88
89 - % BW_fil = medfilt2(BW,[6 6]);
90 - % figure; pcolor(BW); shading flat
91
92 - maskedImage = q;
93 - maskedImage(~BW) = 0;
94
95
96 - seD = strel('diamond',1);
97 - BWfinal = imerode(maskedImage,seD);
98 - BWfinal = imerode(BWfinal,seD);
99 - BWoutline = bwperim(BWfinal,8);
100 - BWoutline(1)=0;%para filtrar las otras fronteras
101
102 - Segout(BWoutline) = 255;
103 - % figure, imshow(Segout), title('outlined original image');
104
105 - %transformar la linea de contorno en coordenadas
106 - [y,x]=find(BWoutline==1);
107 - figure; plot(x,y)

```

Figura 47. RIM líneas 35 a 107

Obteniéndose una imagen equivalente a la siguiente.

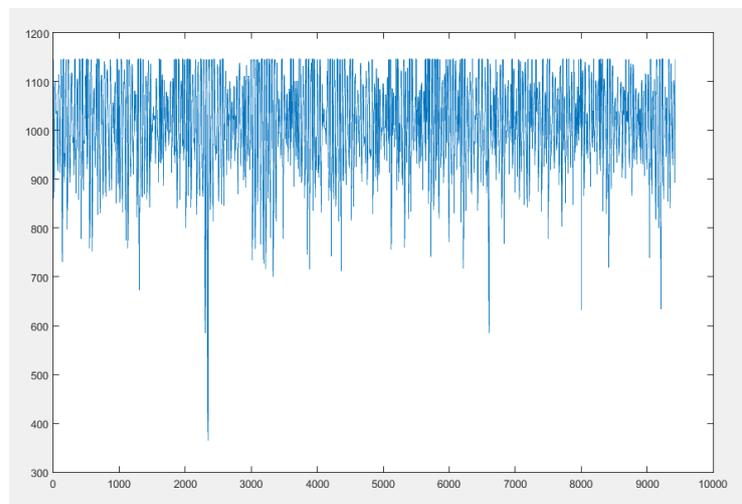


Figura 48. RIM resultado de correr línea (35 a 107)

Luego se procede a correr la línea 109 a 148 (Figura 49)

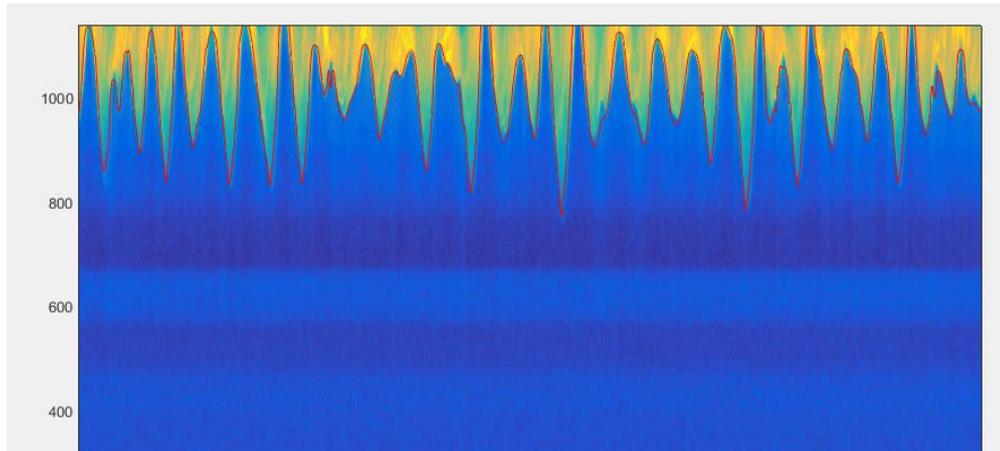
```

109     x=x(y~=1147);
110     y=y(y~=1147);
111
112
113     step=length(x)/10;
114     step=floor(step);
115
116
117     YFIL=[];
118     for i=1:9
119         y2=y((i-1)*step+1:i*step);
120         x2=x((i-1)*step+1:i*step);
121         yfil=smooth(x2,y2,0.005,'rloess');
122         YFIL=[YFIL; yfil];
123     end
124
125
126     y2=y((10-1)*step+1:length(x));
127     x2=x((10-1)*step+1:length(x));
128     yfil=smooth(x2,y2,0.005,'rloess');
129     YFIL=[YFIL; yfil];
130     % YFIL=[nan;YFIL;nan];
131
132     A=[x YFIL];
133     B=unique(A,'rows');%primer filtro
134
135     [C,ia,ic]=unique(B(:,1));
136
137     BBx=B(:,1);
138     BBy=B(:,2);
139
140     D(:,1)=BBx(ia);
141     D(:,2)=BBy(ia);
142
143
144     figure;pcolor(q); shading flat; xlim([2000 3000])
145     % hold on; plot(D(:,1),D(:,2),'r')
146
147
148     hold on; plot(D(:,1), (D(:,2)-mean(D(:,2)))*1.11-10+mean(D(:,2)),'r')

```

Figura 49. RIM líneas 109 a 148

RIM colocará en pantalla una imagen como la (Figura 50), en ella se puede observar graficada con línea roja el contorno obtenido por la binarización entre la porción de imagen que representa la ola y la que no, estos serán los valores determinados de Run-Up.



**Figura 50.** RIM resultado de líneas 109 a 148

Por ultimo RIM realiza la conversion de pixeles a metros. En la linea 164 (Figura 51) se observa la matriz a llenar de forma manual con los valores medidos en metros, los primeros cuatros valores son los correspondioentes a la coordenada horizontal (X) [x1, x2, x3, x4] de cada punto, los cuatro valores siguientes son las coordenadas en vertical (y), [y1, y2, y3, y4] y luego los siguientes cuatro valores de debe colocar el numero 1.

```
164 - m=[0 0.46 0.46 0;0 0 1.606 1.606;1 1 1 1];
```

**Figura 51.** RIM línea 164

Se corre la linea 153 a 184 (Figura 52), en donde pedirá que marque la matriz en la imagen de los puntos cargados en el paso anterior, convirtiendo asi los pixeles a metros.

```

153 - final=(D(:,2)-mean(D(:,2)))*1.11-10+mean(D(:,2));
154
155
156 %%179:1269,340
157
158
159 - seccion=[355 355;49 1079];
160 - run_up_pix=final+seccion(2,1);
161
162
163
164 - m=[0 0.46 0.46 0;0 0 1.606 1.606;1 1 1 1];
165 - h=figure; imshow(Fig);
166 %%define M
167 - M=[];
168 - for i=1:4
169 -     [xi yi]=ginput(1);
170 -     hold on
171 -     plot(xi,yi,'+r')
172 -     M(1,i)=xi;
173 -     M(2,i)=yi;
174 -     M(3,i)=1;
175 - end
176 - close(h)
177
178 %%compute Homography
179 - [H,Hnorm,inv_Hnorm] = compute_homography(m,M);
180
181 - I(:,1)=run_up_pix*0+seccion(1,1);
182 - I(:,2)=run_up_pix;
183 - I(:,3)=run_up_pix*0+1;
184 - water_level=Trans2PIX(I',H);

```

Figura 52. RIM línea 153 a 184

Para guardar el archivo resultante en formato Excel, se corre la línea 186 a 192 (Figura 53), colocando el nombre del mismo en la línea 190.

```

186 - real_water_level=water_level(2, :)*0.03;
187 - figure;plot(real_water_level)
188
189
190 - xlswrite('runup_M4H03301_F171_R.xls',real_water_level');
191 - clear all
192 - clc

```

Figura 53. RIM línea 186 a 192