



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **PREDICCIÓN DEL REMONTE DEL OLEAJE ( $Ru_{2\%}$ ) EN DIQUES EN TALUD CON UN MODELO DE BOUSSINESQ**

Trabajo realizado por:

**GEMA PÉREZ GONZÁLEZ**

Dirigido:

**GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ**

Titulación:

**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, febrero de 2018

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	5
METODOLOGÍA GENERAL.....	6
DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BOUSSINESQ USADO .....	9
Geometría del canal .....	10
Rugosidad del canal.....	10
Condiciones de oleaje.....	10
VALIDACIÓN 1: INFLUENCIA DE LA PENDIENTE EN EL TALUD PARA INCIDENCIA NORMAL.....	13
Experimento: M1795 Delta Flume 1:3.....	13
Experimento: M1881 Delta Flume 1:6.....	23
Experimento: M1980 Delta Flume 1:8.....	31
Experimento: H1256 1:3.....	34
Experimento: H1256 1:4.....	36
Experimento: Führboter Hannover 1:6 .....	44
Experimento: H3608 1:2,5 .....	53
Experimento: H3608 1:4.....	57
Experimento: H638 App B 1:3.....	61
Experimento: LWI – Nr. 1:6 .....	67
VALIDACIÓN 2: INFLUENCIA DEL OLEAJE OBLICUO.....	82
VALIDACIÓN 3: INFLUENCIA DE LA EXISTENCIA DE BERMA .....	89
CONCLUSIONES GENERALES.....	98
ANEXO 1 .....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	103

## INTRODUCCIÓN

La adecuada comprensión del rebase del oleaje sobre las estructuras costeras y portuarias es un requisito clave para diseño eficaz de las defensas costeras. Los fenómenos naturales asociados a oleaje de temporal pueden llegar a provocar cuantiosos daños económicos, la parada en el uso de dicha estructura, e incluso la posible pérdida de vidas humanas, y por ello, deben ser adecuadamente cuantificados. Los gestores portuarios y costeros, protección civil, diseñadores de estructuras e instituciones que gestionan el uso turístico de la costa deben contar con un método para evaluar de forma eficaz y realista el rebase del oleaje en estructuras de protección.

En la actualidad la forma tradicional de predecir y cuantificar el caudal medio de rebase sobre cualquier tipología estructural en costa se realiza siguiendo el manual EurOtop<sup>1</sup>. Dicha publicación integra y presenta un conjunto de directrices para el diseño de defensas costeras, tratando dos aspectos fundamentales de tal diseño funcional de las estructuras: el fenómeno de run-up o remonte del oleaje y el rebase de este, también conocido con el nombre de overtopping.

El primero de ellos se define como la distancia de ascenso del mar sobre el talud de playa, medidos en vertical desde el nivel medio en reposo, y el segundo como el transporte de un volumen de agua sobre la coronación de una estructura. Este caudal se puede producir en forma rebase de masa de agua, debido a una cota de coronación inferior al ascenso del oleaje o a las salpicaduras de agua - espuma arrastradas por el viento hacia la zona protegida.

El manual establece ecuaciones semi-empíricas que a su vez tienen en cuenta ciertas variables relativas a las estructuras costeras (rugosidad del paramento, existencia de berma en el perfil...) y a condiciones del oleaje (altura de ola, período, oblicuidad del oleaje, etc.).

Estas ecuaciones están basadas en numerosos estudios realizados mediante ensayos de laboratorio representando el comportamiento del oleaje, y midiendo la interacción con las estructuras costeras simuladas.

---

<sup>1</sup> <http://www.overtopping-manual.com/manual.html>

Una vez que se alcanza el estado de rebase bajo la acción de oleajes de media-alta energía (temporales), el caudal que rebasa puede provocar problemas de distinto tipo, como son:

- Daño físico a personas que visiten o trabajen en la zona abrigada.
- Daño por sobrecarga, inundación o arrastre a edificios, vehículos, barcos, equipos e instalaciones situados en la zona abrigada.
- Daño económico por la afección a la operatividad de las instalaciones abrigadas.
- Provocar transmisiones de oleaje indeseadas.

Debido a la importancia que tienen estos procesos en el diseño funcional de la estructura, el presente trabajo de fin de máster (TFM) es el estudio y cuantificación del fenómeno del run-up exclusivamente.

El TFM explora la posibilidad de predecir el fenómeno de run-up sobre estructuras en talud de materiales sueltos con base en el uso de un modelo numérico de propagación de oleaje basado en las ecuaciones de Boussinesq no lineales y transitorias.

Se plantea, por lo tanto, conocer y cuantificar las capacidades de este tipo de herramientas numéricas en la predicción de esta variable funcional asociada a la interacción del oleaje con este tipo de estructuras. Identificando sus potencialidades y revisando sus limitaciones a la vez que se realiza una comparación directa de los resultados que aporta el modelo numérico con los ensayos incluidos en el catálogo de experimentaciones que han sido usadas como base para la redacción del manual EurOtop

## OBJETIVOS

El presente TFM tiene como objetivo general la validación del modelo numérico Boussinesq con base en distintos experimentos en canales físicos asociados a la medición del run-up sobre estructuras en talud de materiales sueltos recogidos en el manual EurOtop.

Dicha validación permitirá establecer las recomendaciones de uso de este tipo de herramientas numéricas para la cuantificación del fenómeno de run-up en proyectos reales de diseño funcional de estructuras en talud de materiales sueltos.

## METODOLOGÍA GENERAL

A continuación, se describe el método general que se ha seguido para cumplir con el objetivo, el cual se basa en tres pasos.

En primer lugar, se cuantifica el valor del  $Ru_{2\%}$ . El run-up se define como la diferencia vertical entre el punto más alto de la subida de la ola y el nivel medio del agua del mar en reposo. La cuantificación del valor del  $Ru_{2\%}$  se traduce en el run-up que solo es superado por el 2% de las olas que inciden sobre la estructura y se obtiene con base en distintos experimentos en laboratorio recogidos en la literatura y que han servido para confeccionar las ecuaciones semi-empíricas que presenta el manual EurOtop (ver figurar 1). Se tienen en cuenta, para cada experimento, las condiciones geométricas, de oleaje y de rugosidad.

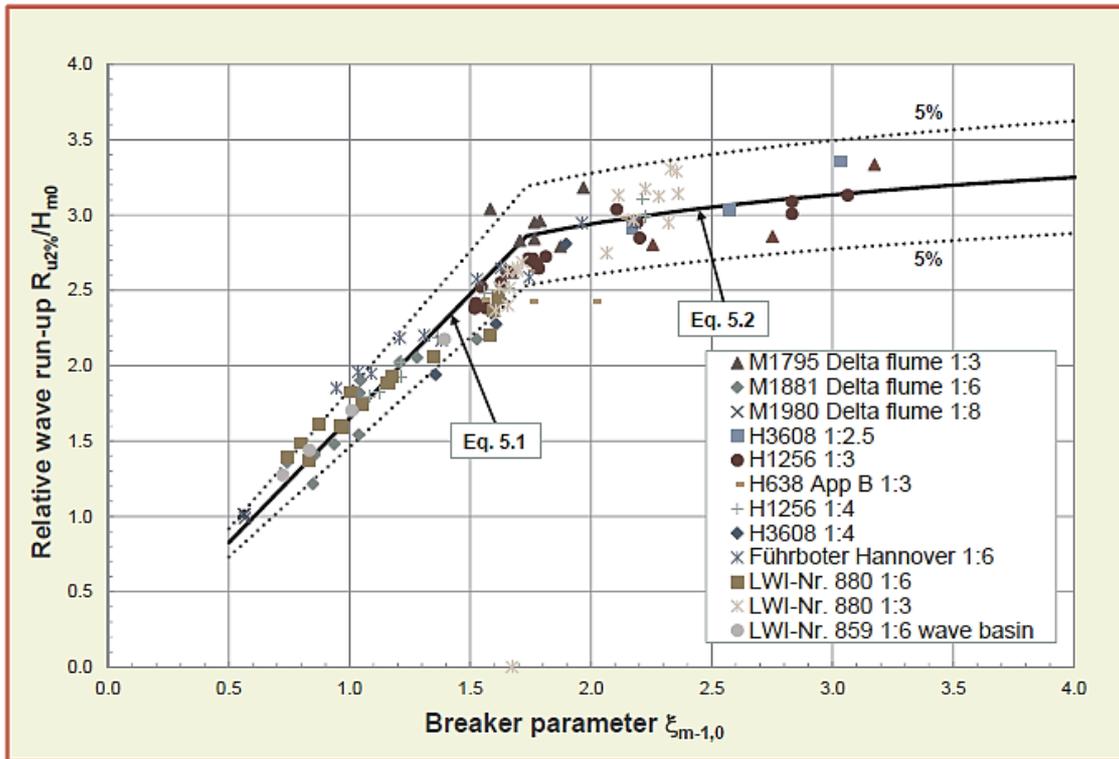


Figura 1. Ensayos sobre Run up recogidos en el manual EurOtop en función del número de Iribarren (breaker parameter) y el  $Ru_{2\%}$  relativo.

En segundo lugar, se reconstruye con la herramienta numérica cada experimento en laboratorio siguiendo fielmente sus dimensiones y condicionantes de forzamiento (oleaje, periodos, pendientes, profundidades, taludes, etc.), y se ejecutan haciendo uso de la herramienta basada en las ecuaciones de Boussinesq (Tavakkol, et. al.).

Una vez que se ejecuta la herramienta numérica, se procede a la comparación directa de los valores de  $Ru_{2\%}$  obtenidos en los experimentos numéricos (que recoge el manual EurOtop). Este primer ejercicio de validación aporta importantes conclusiones sobre la idoneidad de este tipo de herramientas para la predicción de este complejo fenómeno de interacción de oleaje con estructuras costeras.

Tras haber realizado el primer diagnóstico sobre el comportamiento del modelo numérico para los casos de laboratorio, a continuación, se extiende la investigación añadiendo un nuevo proceso de la propagación del oleaje relacionado con la oblicuidad del oleaje en comparación con la orientación de la estructura (ángulo de ataque del oleaje hacia la estructura). Para ello se propone una serie de experimentos (derivados de los analizados en la primera parte) en donde la oblicuidad del oleaje comienza a ser relevante. Tras la ejecución de este segundo paquete de simulaciones con oleaje oblicuo, se repite el proceso de comparación, verificación y validación de la herramienta numérica con los datos derivados de las formulaciones del EurOtop, teniendo en cuenta el factor  $\gamma_\beta$  (ver figura 2) que controla el ángulo de ataque del oleaje y su afeción al run-up. En este apartado se repiten algunos de los ensayos del apartado anterior, ejecutados considerando la misma geometría, oleaje y rugosidad obtenidos anteriormente, pero en un tanque lo suficientemente ancho para que el oleaje oblicuo se desarrolle adecuadamente.

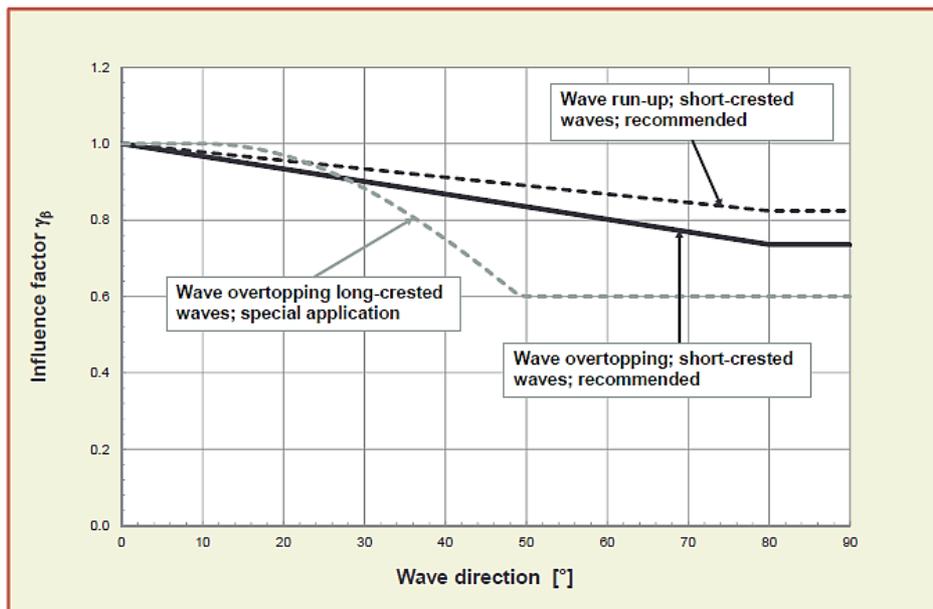


Figura 2. Gráfica de la influencia de la oblicuidad del oleaje sobre el run-up.

Y, por último, se investiga la influencia de berma en el perfil o berma intermedia en el cálculo y predicción del run-up por parte del modelo numérico. Para ello se va experimentar con algunos de los ensayos estudiados en el primer apartado, respetando con sus condiciones geométricas, de oleaje y rugosidad, pero incluyendo en el perfil una berma (ver figura 3).

Es importante mencionar que una vez realizadas todas las simulaciones de los tres análisis discutidos anteriormente, se pueden plantear conclusiones sobre la potencialidad de la herramienta numérica de cara a su uso en proyectos de consultoría y diseño funcional de este tipo de estructuras.

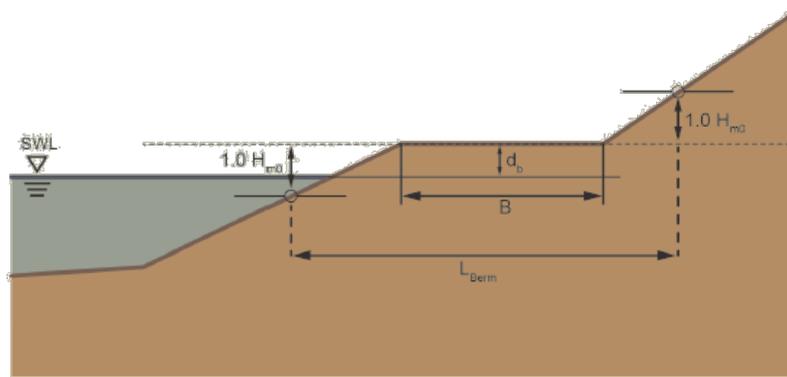


Figura 3. Berma dispuesta para comprobar su influencia en el run-up.

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE BOUSSINESQ USADO

El software empleado en la representación numérica de los ensayos mostrados en el manual EurOtop recibe el nombre de CELERIS Advent (Sasan Tavakkol et al.). Este software resuelve las ecuaciones de Boussinesq extendidas y es acelerado por la GPU (unidad de procesamiento gráfico). CELERIS usa un esquema híbrido de volumen finito - diferencia finita para discretizar las ecuaciones gobernantes.

CELERIS toma un archivo XML como configuración de entrada para un experimento específico que será el que define las condiciones geométricas, de rugosidad y oleaje, pero también tiene una GUI (interfaz gráfica de usuario). CELERIS, como el primer software interactivo para la simulación de procesos costeros, tiene una GUI incorporada que se puede usar para cambiar los parámetros de simulación y visualización mientras el modelo se está ejecutando. Por ejemplo, el usuario puede cambiar el tamaño de malla o el coeficiente de fricción usando la GUI. Las condiciones de contorno se pueden cambiar y la onda solitaria se puede superponer en el campo a medida que el modelo se está ejecutando. CELERIS también tiene varias opciones de visualización, como la representación fotorrealista y de mapa de colores.

Tal y como se explicó en apartados anteriores la finalidad de este trabajo es comprobar si, con esta herramienta, se pueden simular virtualmente casos reales y la fiabilidad de esos ensayos virtuales. Para ello, se va a intentar reproducir alguno de los experimentos recogidos en la gráfica de la Figura 1. Esos puntos tienen distinta forma debido a que pertenecen a estudios diferentes. Por lo tanto, el primer paso en este trabajo es obtener la información ( $\xi_{m0}$  y  $R_{up2\%}/H_{m0}$ ) de cada uno de los puntos para poder trabajar con ellos. La obtención de todos los datos se ha realizado a través de maple, el cual ha volcado los datos a un archivo txt.

La simulación de un ensayo mediante el software CELERIS Advent necesita varios datos de entrada como geometría del canal, su rugosidad y las condiciones de oleaje. A continuación, se verá como se ha tratado cada uno de los datos de entrada.



Es importante mencionar que para el adecuado desarrollo del presenta TFM he tenido que aprender a usar la herramienta a un nivel de usuario avanzado, lo cual se considera una nueva competencia adquirida.

### Geometría del canal

Al tratarse de una simulación de casos reales, la geometría vendrá dada por el canal que se empleó en cada uno de los estudios que aparecen en la Figura 1. Por lo tanto, se ha realizado un trabajo exhaustivo de investigación, para averiguar qué geometría tendrían esos canales. Para ello, se ha consultado cada uno de los documentos de la bibliografía que hacen referencia a esas investigaciones. En algunos casos, se han podido averiguar las características geométricas del canal mientras que en otros casos ha sido imposible tener acceso a dichos documentos. En los casos en los que no ha sido posible, se han estimado unas características geométricas estándar.

### Rugosidad del canal

La rugosidad del canal es un parámetro que servirá como ajuste de los resultados del ensayo virtual. Es decir, primero se realizará el ensayo empleando una rugosidad nula probando distintas condiciones de oleaje hasta obtener un run-up que sea lo suficientemente superior al que debería dar el ensayo. Posteriormente, se definirá una rugosidad en el canal para que el resultado de run-up sea el esperado.

### Condiciones de oleaje

Para ser congruentes con los experimentos en laboratorio, se hace empleo de oleaje irregular con incidencia normal a la estructura y en dirección del canal. Los parámetros del oleaje se han obtenido a partir de los datos procedentes de la Figura 1.

Primero, se despejó de la ecuación del número de Iribarren H/L:

$$\xi_{m0} = \frac{\text{pendiente del canal}}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L}}}$$

donde:

- pendiente del canal: pendiente que presenta el talud del canal.
- $H_{m0}$ : altura de oleaje
- $L$ : longitud de la onda

Después, estableciendo un valor de período  $T$  y una profundidad de canal  $h$ , se halla el valor de la longitud de onda,  $L$ :

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

donde:

- $g$ : aceleración de la gravedad
- $T$ : período de oleaje
- $h$ : profundidad de agua

Así el valor de  $H_{m0}$  que debemos emplear en la simulación se calcula multiplicando el valor  $H/L$  que despejamos antes de la ecuación de Iribarren por la longitud de onda  $L$  ahora hallada:

$$H_{m0} = \frac{H_{m0}}{L} \cdot L$$

donde:

- $H_{m0}$ : altura de oleaje
- $L$ : Longitud de onda

De esta manera, se establece la profundidad de agua del canal, la altura y período del oleaje.

Mientras se está ejecutando la simulación, los datos de run-up se van registrando en un archivo txt., que posteriormente será analizado para obtener el run-up o ascenso del 2%. Para ello se confeccionó un código de postproceso el cual se incluye en el anexo 1.

El código comentado anteriormente extrae todos y cada uno de los run-up's individuales que se suceden sobre el talud de la estructura, identificando la interfaz agua-tierra que aporta el modelo numérico. De esta forma se puede obtener la estadística de los valores máximos de la serie dentro del estado de mar y finalmente obtener el  $Ru_{2\%}$ .

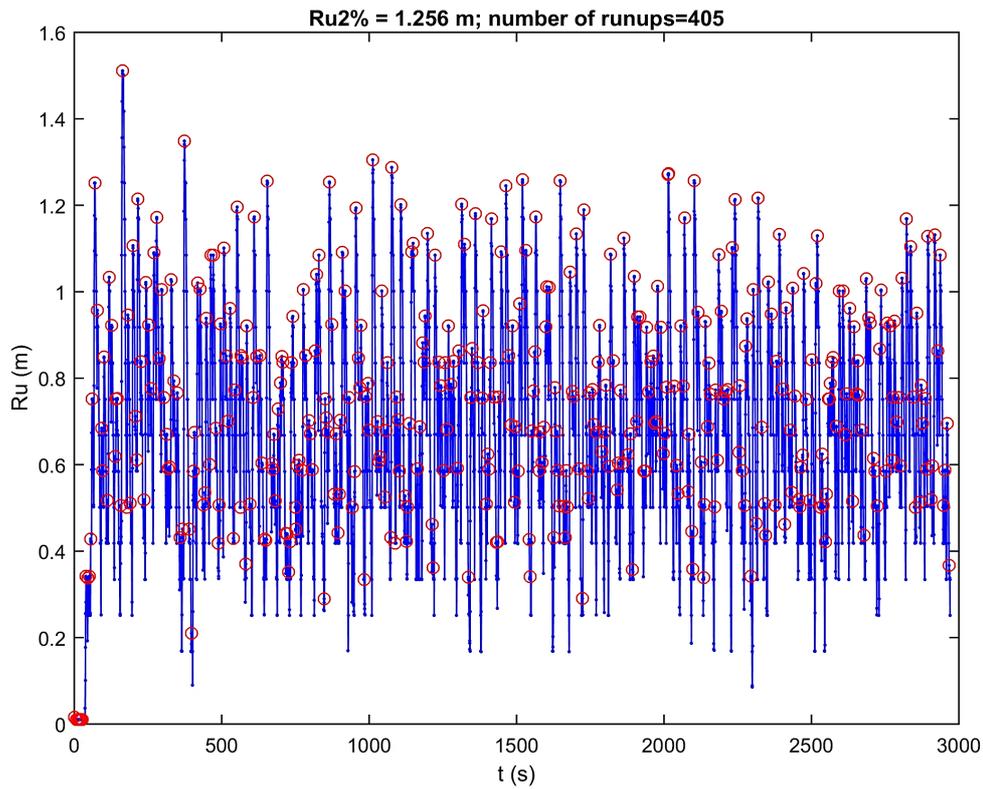


Figura 4. Gráfica que muestra el código para dar el resultado de run-up.

## VALIDACIÓN 1: INFLUENCIA DE LA PENDIENTE EN EL TALUD PARA INCIDENCIA NORMAL

El primero de los objetivos, como ya se ha nombrado, es la obtención del run-up virtualmente a través del modelo CELERIS. Para ello se han realizado distintas pruebas de sensibilidad del modelo hasta encontrar los mejores resultados posibles y así poder finalmente redactar conclusiones y recomendaciones para su uso y explotación.

En este apartado primero se muestra un resumen de cada experimento realizado, sus resultados generales para finalmente presentar las conclusiones que integran las observaciones comparativas para todos los ensayos numéricos realizados.

### **Experimento: M1795 Delta Flume 1:3**

Definidos los parámetros del ensayo, se realiza la primera toma de contacto con el modelo CELERIS Advent. Para comenzar a probar se ha recurrido a la primera tanda de run-up que constituyen el estudio M1795 Delta Flume que tiene pendiente 1:3.

Las características geométricas se han obtenido gracias a la lectura del documento *Van der Meer et al. 1992*; y son las que se detallan a continuación en la tabla 1.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	230	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	209,00	m

Tabla 1. Características geométricas del experimento M1795 Delta Flume 1:3.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ▲ :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	1,7059	2,8238
2	1,7733	2,8306
3	1,7692	2,9445
4	1,7945	2,9445
5	1,8788	2,7773
6	1,9758	3,1727
7	2,2583	2,7917
8	2,756	2,8466
9	3,1819	3,3299

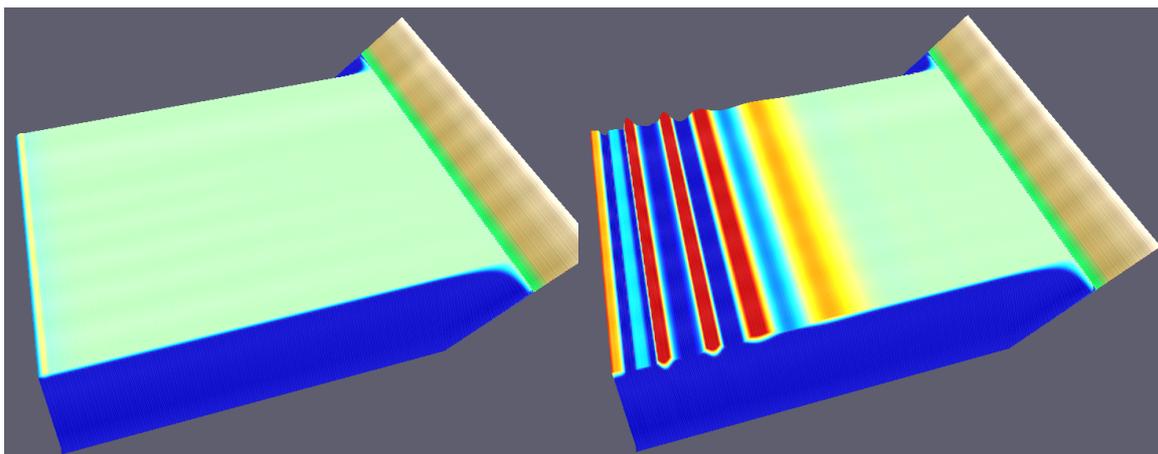
Tabla 2. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento M1795 Delta Flume 1:3

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,7059	2,8238

Tabla 3. Datos de la simulación.

Para visualizar con mayor claridad cómo funciona el software CELERIS Advent, se muestran 6 imágenes sobre distintos momentos de la simulación que se han agrupado como Figura 5.



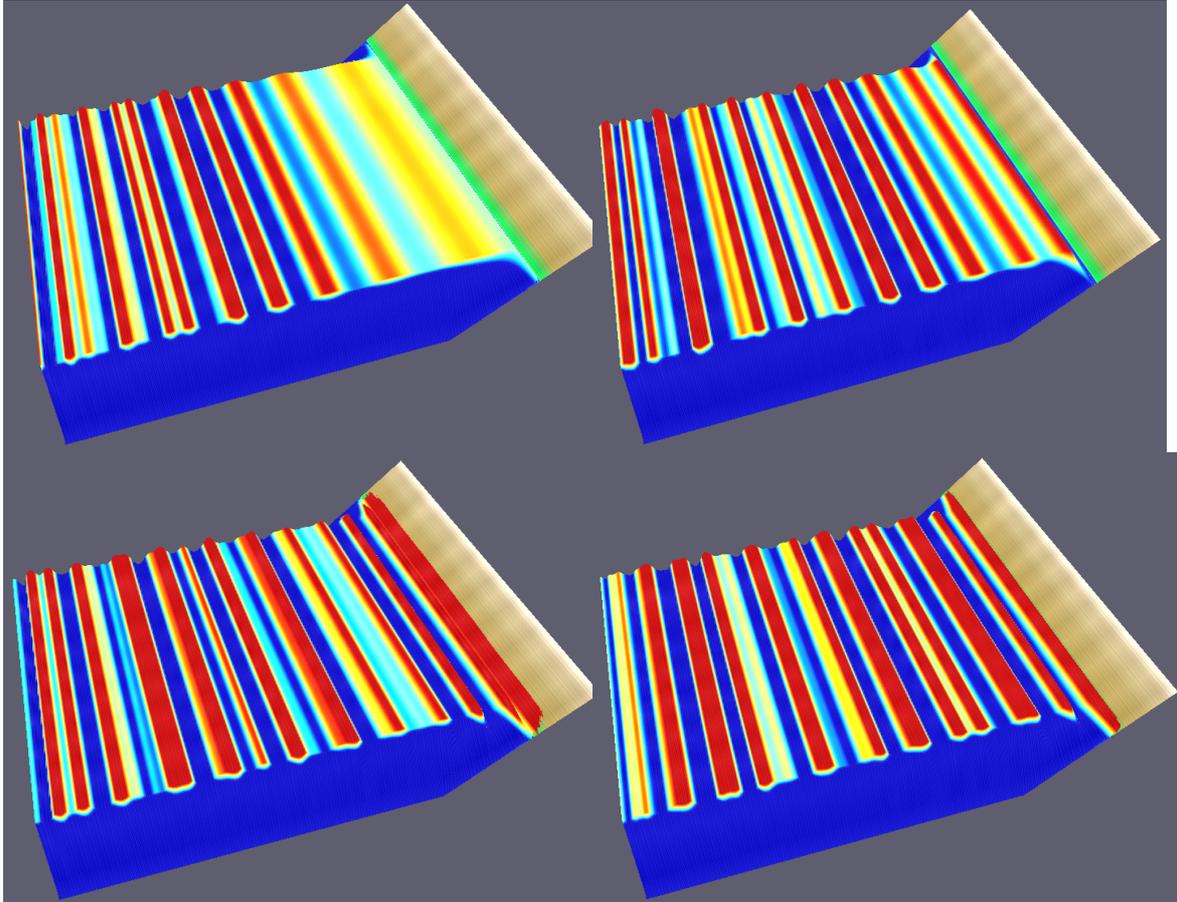


Figura 5. Capturas de pantalla de distintos momentos de la simulación con CELERIS Advent.

A continuación, se muestran los resultados de las primeras simulaciones con distintos niveles de mar y con periodos diferentes. Después de la tabla correspondiente con una profundidad de agua se muestra una gráfica que muestra el porcentaje de acierto de cada una de las simulaciones.

<b>h = 3 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
2,5	0,35926	0,094897	1,0145
3	0,48427	0,51991	1,3675
3,5	0,606	0,71106	1,7112
4	0,72401	1,3569	2,0444
4,25	0,78186	1,5299	2,2078
4,5	0,83908	1,7409	2,3694
4,75	0,89574	1,8992	2,5294
5	0,95193	1,3543	2,6881

Tabla 4. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 3 m.

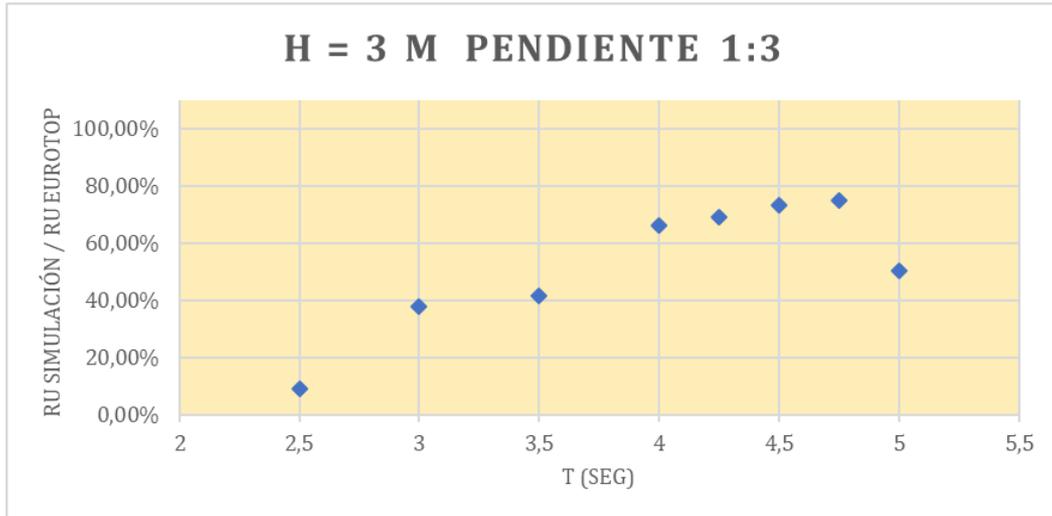


Figura 6. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 3 m.

<b>h = 3,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,50036	0,35768	1,4129
3,5	0,63383	0,73525	1,7898
4	0,76345	0,8853	2,1558
4,5	0,88964	1,2657	2,5122
5	1,01314	1,8445	2,8609
5,5	1,13458	1,5612	3,2038

Tabla 5. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 3,5 m.



Figura 7. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 3,5 m.

<b>h = 4 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,5185	0,5194	1,4641
3,5	0,65593	0,90728	1,8522
4	0,79652	1,0519	2,2492
4,15	0,83793	0,89795	2,3661
4,2	0,85166	1,5205	2,4049
4,22	0,85715	1,1930	2,4204
4,25	0,86536	1,747	2,4436
4,3	0,87902	1,4022	2,4822
4,5	0,93333	1,6889	2,6355

Tabla 6. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

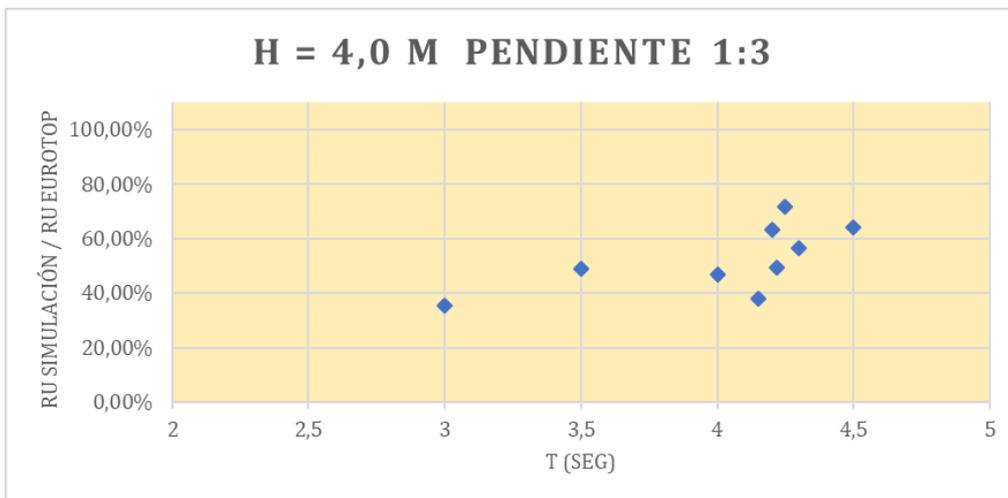


Figura 8. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,51991	0,42288	1,4681
3,5	0,6734	0,72797	1,9015
4	0,82428	1,0421	2,3276
4,25	0,89825	1,2349	2,5365
4,5	0,97127	1,7229	2,7427
4,75	1,04341	1,5800	2,9464

Tabla 7. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

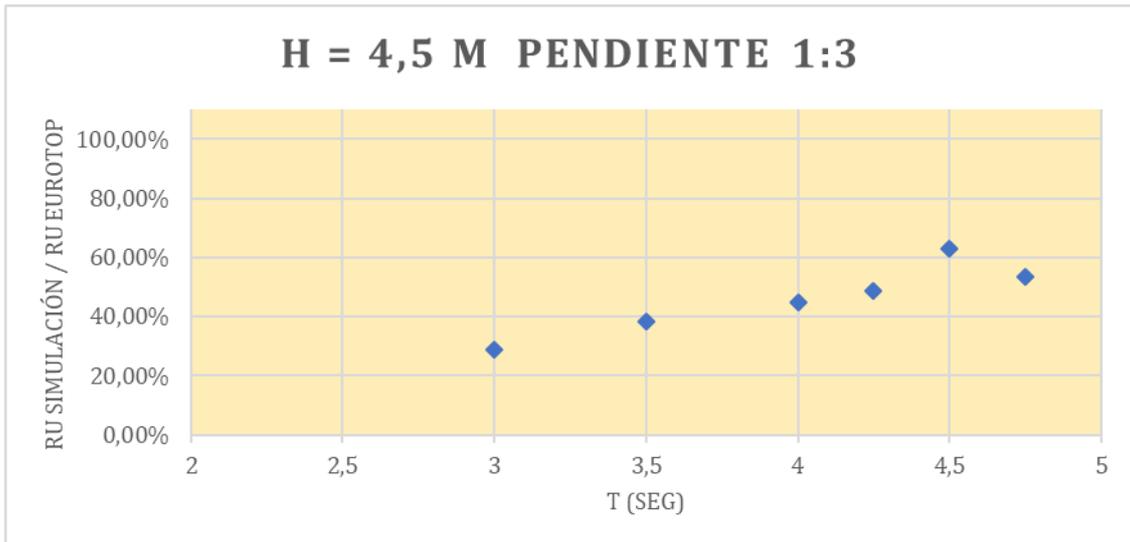


Figura 9. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

Como se puede comprobar mirando los resultados de las tablas 4, 5, 6 y 7 u observando cada uno de los gráficos 4, 5, 6 y 7 el run-up que se obtiene de las simulaciones da un valor entre un 60 y un 20 por ciento inferior del que debería dar según el EurOtop (Figura 1.).

Esto puede deberse a dos circunstancias:

- El oleaje que se introduce al programa no es el que debería ser, si no inferior. En este aspecto se han realizado comprobaciones en el programa que genera el archivo txt. de oleaje irregular y se han encontrado fallos. Se subsanan y para comprobar que el oleaje que se genera es ahora el correcto, se simula un canal sin rampa y se analiza el oleaje que se desarrolla en él. Al fin se obtienen buenos resultados de oleaje. En la Figura 4. se muestra el análisis del oleaje del canal sin rampa donde se manifiesta que el oleaje generado es menor.

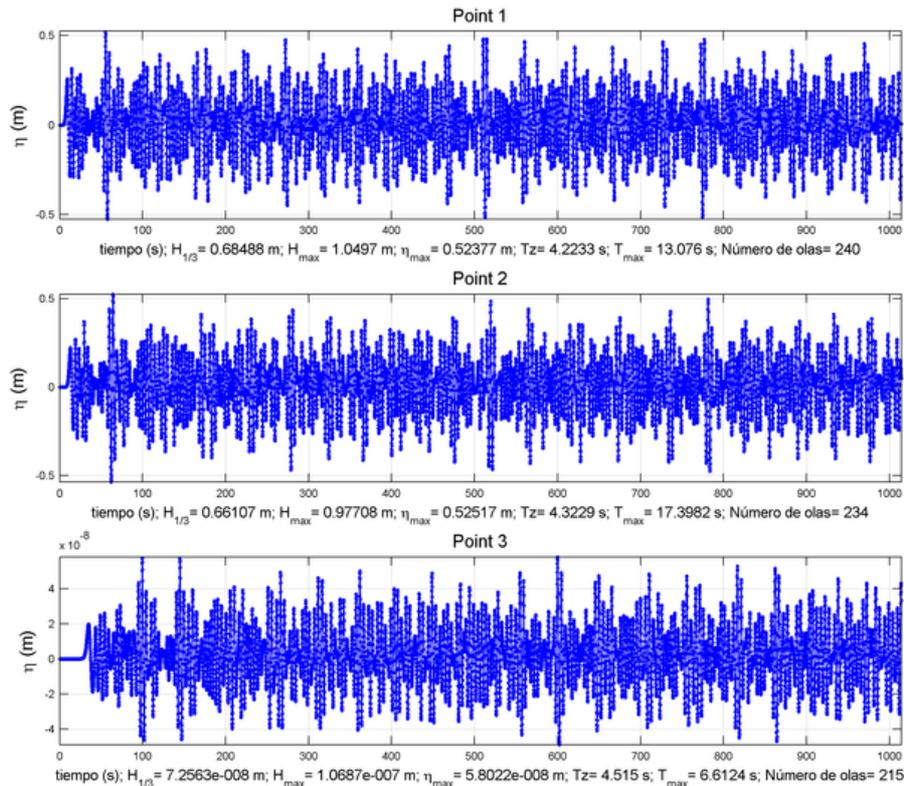


Figura 10. Análisis de run-up.

- El análisis de los datos de Run up es erróneo. El código que analizaba los resultados de la simulación era muy restrictivo, es decir, se producían máximos que no se tenían en cuenta debido al umbral de selección de la interfaz de secado/mojado de la celda numérica. Por lo tanto, se modifica para que la búsqueda del run-up sobre el talud sea mucho más fina y así se permiten run-up mucho mayores.

Realizados ambos cambios, se realizan nuevas simulaciones.

<b>h = 3 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,48427	0,73682	1,3675
3,5	0,606	1,1682	1,7112
4	0,72401	1,5019	2,0444
4,25	0,78186	1,7707	2,2078
4,5	0,83908	2,0052	2,3694
5	0,95193	2,3366	2,6881

Tabla 8. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 3 m.

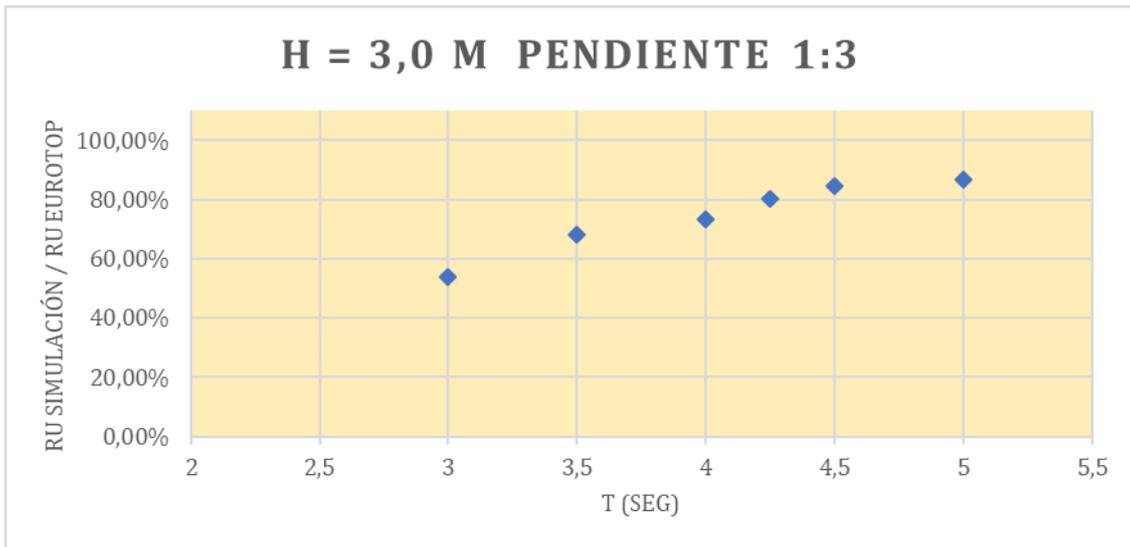


Figura 11. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 3 m.

<b>h = 3,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,50036	0,88885	1,4129
3,5	0,63383	1,3385	1,7898
4	0,76345	1,8463	2,1558
4,5	0,88964	2,3823	2,5122
5	1,01314	2,7167	2,8609
5,5	1,13458	3,1678	3,2038

Tabla 9. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 3,5 m.

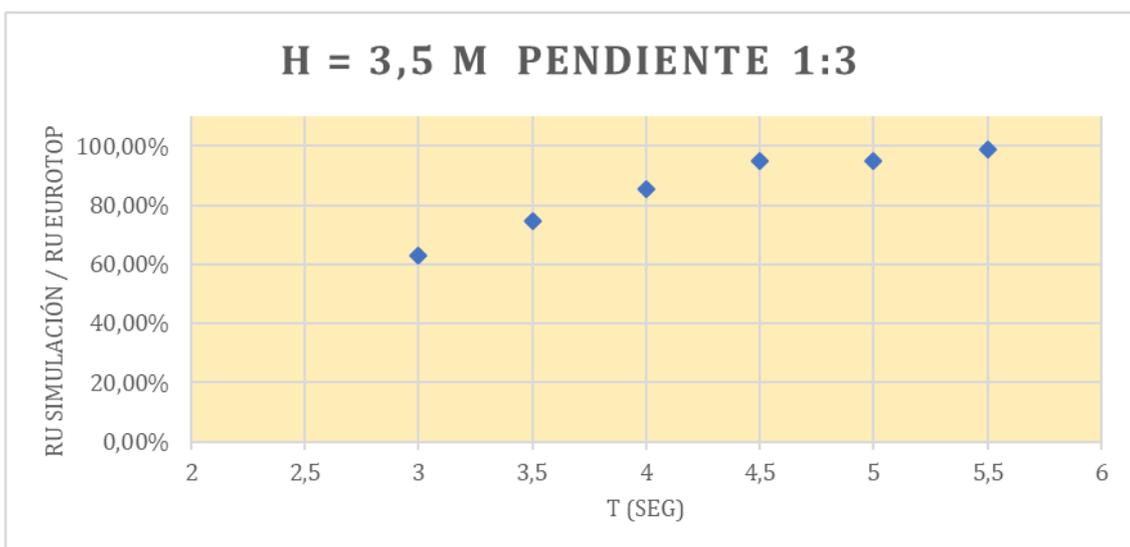


Figura 12. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 3,5 m.

<b>h = 4 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,5185	0,74416	1,4641
3,5	0,65593	1,2454	1,8522
4	0,79652	1,8346	2,2492
4,5	0,93333	2,2837	2,6355

Tabla 10. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

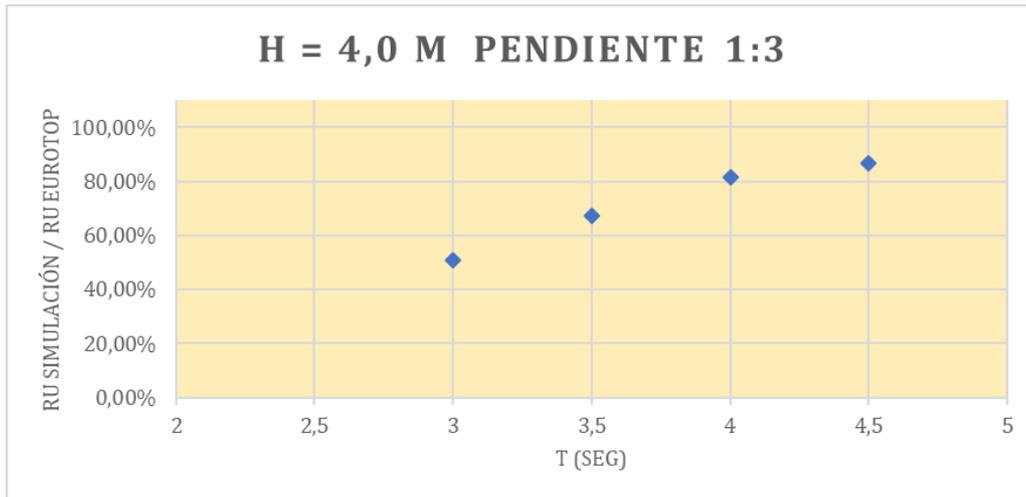


Figura 13. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3,5	0,6734	1,3678	1,9015
4	0,82428	1,8973	2,3276
4,5	0,97127	2,5345	2,7427

Tabla 11. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

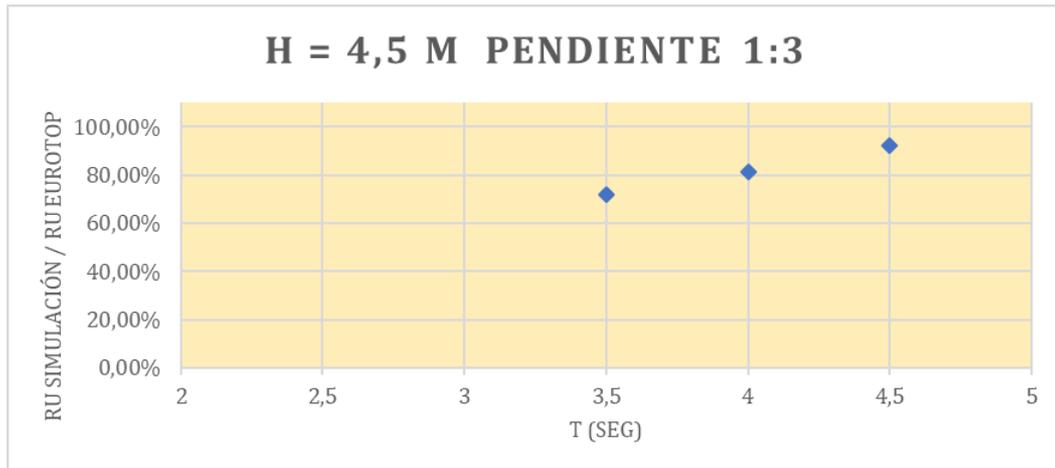


Figura 14. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede decir que para esta pendiente 1:3, CELERIS Advent no da los resultados esperados.

### Experimento: M1881 Delta Flume 1:6

A continuación, se realiza el montaje de la segunda tanda de run-up que constituyen el caso denominado en la Figura 1. M1881 Delta Flume, el cual tiene pendiente 1:6.

Las características geométricas se han obtenido gracias a la lectura del documento (*Van der Meer et al. 1992*); y son las que se detallan a continuación en la tabla 12.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	230	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	188,00	m

Tabla 12. Características geométricas del experimento M1881 Delta Flume 1:6.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca  $\blacklozenge$  :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	1,5271	2,1782
2	1,2782	2,0594
3	1,2089	2,0225
4	1,0447	1,9162
5	1,037	1,5372
6	0,9318	1,4881
7	0,86	1,4105
8	0,8472	1,2149

Tabla 13. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento M1881 Delta Flume 1:6.

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,5271	2,1782

Tabla 14. Datos de la simulación.

<b>h = 3,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,1561	0,1864	0,34
4	0,2382	0,3643	0,5188
5	0,3161	0,6206	0,6885
6	0,39135	0,83606	0,8524
7	0,46508	0,96159	1,013
8	0,53783	1,1703	1,1715
9	0,60911	1,2093	1,3268
10	0,68154	1,4735	1,4845

Tabla 15. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 3,5 m.

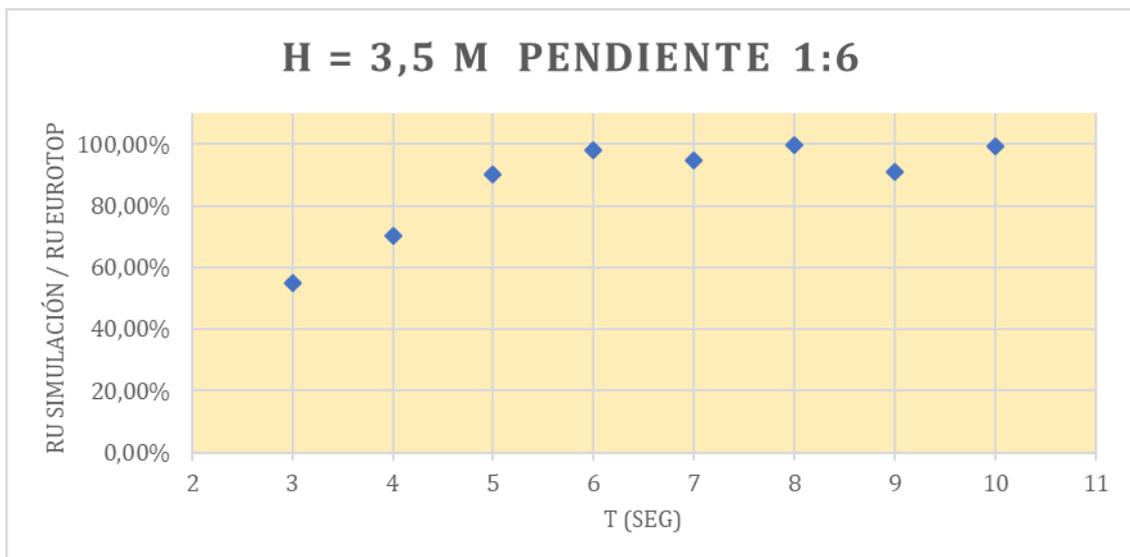


Figura 15. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 3,5 m.

<b>h = 4 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
6	0,41418	0,78121	0,90217
7	0,4936	1,0028	1,0752
8	0,57182	1,2535	1,2455
9	0,64923	1,2514	1,4142
10	0,72609	1,5324	1,5816

Tabla 16. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

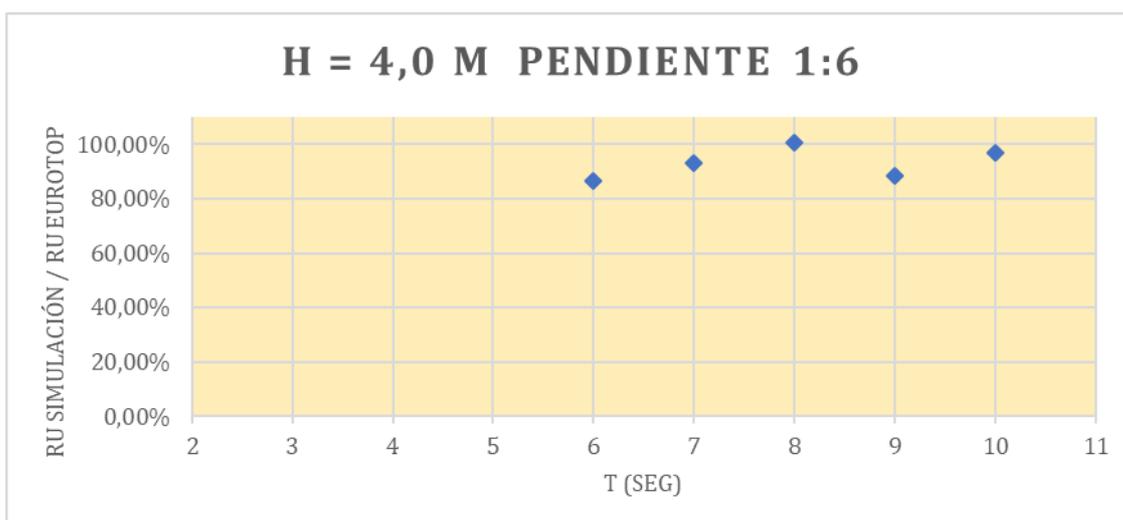


Figura 16. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,60317	1,4183	1,3138

Tabla 17. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,63227	1,3618	1,3772

Tabla 18. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h = 4,5$  m,  $T = 8$  seg,  $H = 0,60317$  m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,001 \rightarrow Ru = 1,418$
- $N=0,005 \rightarrow Ru = 1,3347$
- $N=0,006 \rightarrow Ru = 1,3158$

Se establece como fricción 0,006 para el caso Delta Flume 1:6.

SEGUNDO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,2782	2,0594

Tabla 19. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,86094	1,76	1,773

Tabla 20. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

TERCER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,2089	2,0225

Tabla 21. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,96248	1,938	1,946

Tabla 22. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

CUARTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,0447	1,9162

Tabla 23. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>

8	1,28881	2,4621	2,4696
---	---------	--------	--------

Tabla 24. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

**QUINTO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,037	1,5372

Tabla 25. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	1,3080	2,3508	2,01065
7	1,12707	2,0844	1,7325
6	0,94303	1,7575	1,4496
5	0,75418	1,1863	1,1593
4,5	0,65709	1,023	1,0101

Tabla 26. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

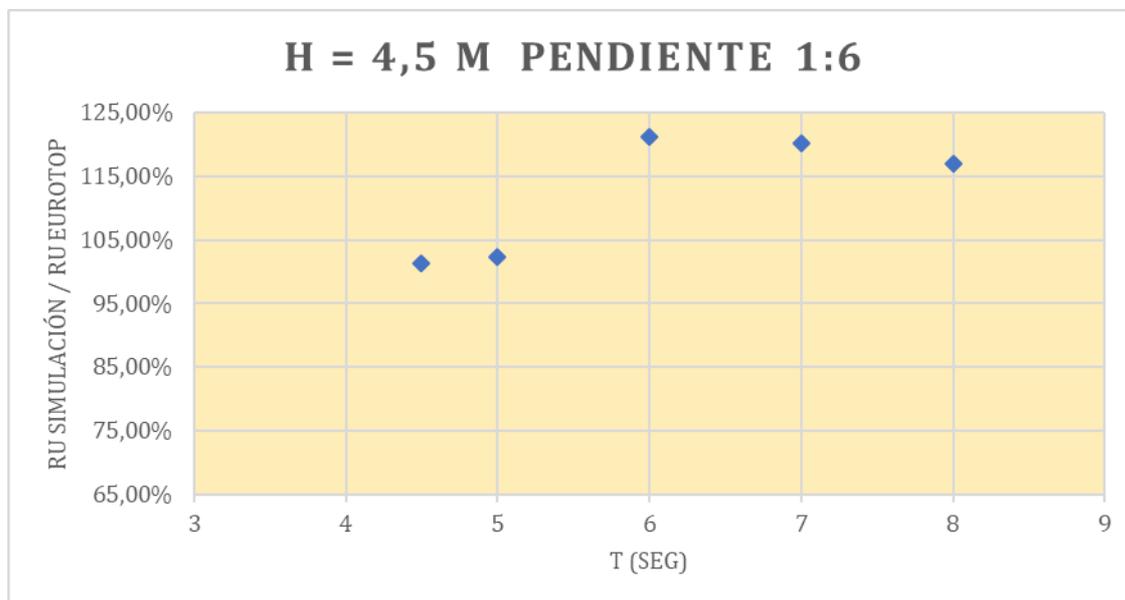


Figura 17. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

**SEXTO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,9318	1,4881

Tabla 27. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	0,93408	1,5943	1,39
4	0,69068	1,0515	1,027

Tabla 28. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

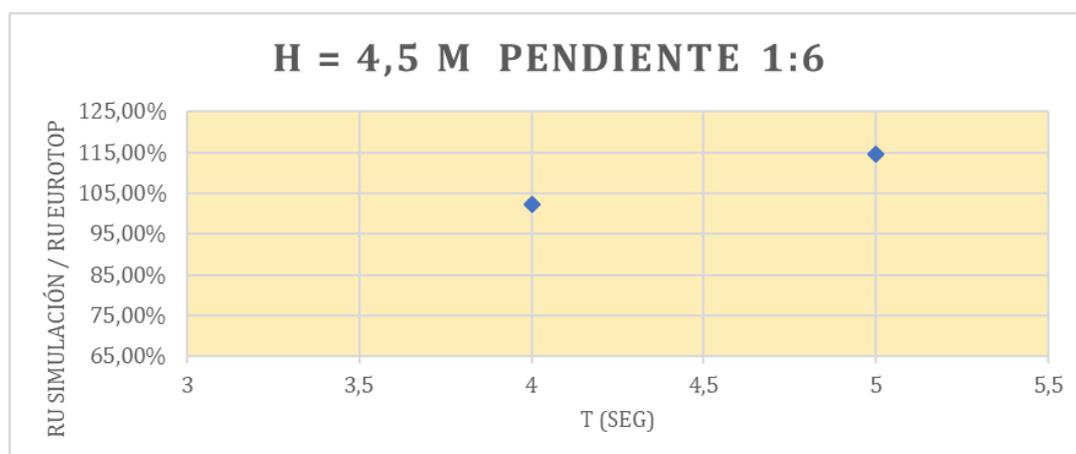


Figura 18. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

**SÉPTIMO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,86	1,4105

Tabla 29. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,81082	1,2097	1,1437
3,5	0,6624	0,9601	0,9343

Tabla 30. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

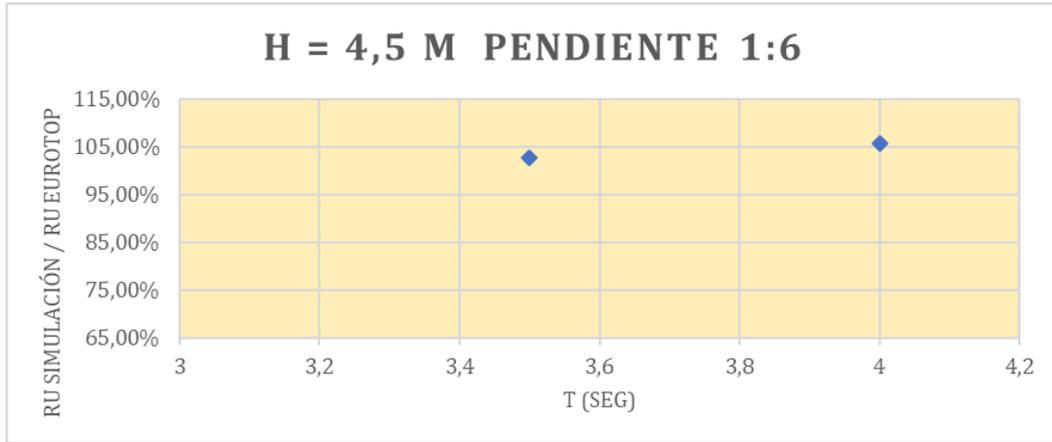


Figura 19. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

**OCTAVO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,8472	1,2149

Tabla 31. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,83550	1,256	1,015
3,5	0,68257	0,8803	0,8293

Tabla 32. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

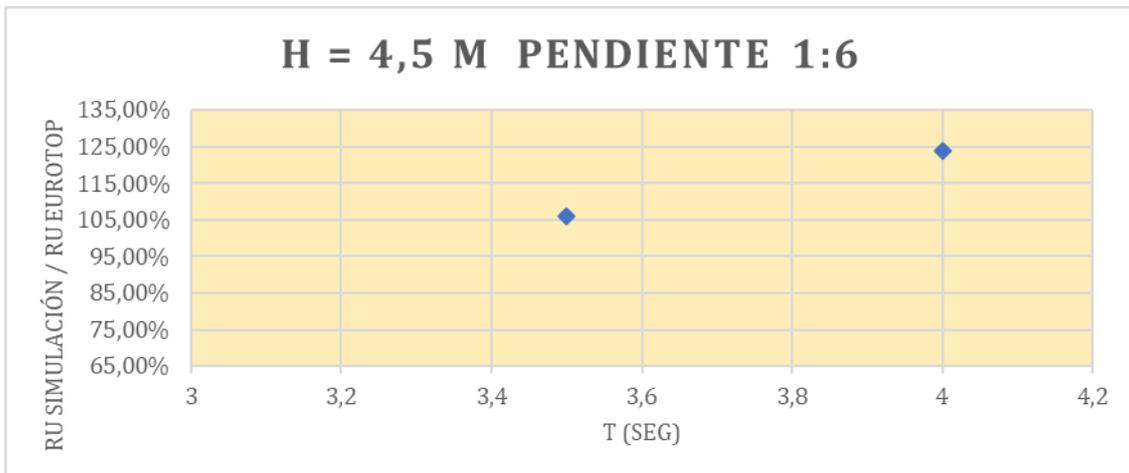


Figura 20. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.



A continuación, se muestra la tabla resumen de todos los casos del estudio Delta Flume 1:6.

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	SIMULACIÓN	
								$Ru_{2\%}$	$Ru_{2\%}/H$
1	1,527	2,1782	0,01191	8	50,64	0,60317	4,5	1,3158	2,299
2	1,278	2,0594	0,01700	8	50,64	0,86094	4,5	1,77	2,056
3	1,208	2,0225	0,01900	8	50,64	0,96248	4,5	1,938	2,014
4	1,044	1,9162	0,02545	8	50,64	1,28881	4,5	2,4621	1,910
5	1,037	1,5372	0,02583	4,5	25,44	0,65709	4,5	1,023	1,557
6	0,931	1,4881	0,03199	4	21,59	0,69068	4,5	1,0515	1,522
7	0,86	1,4105	0,03755	3,5	17,64	0,66240	4,5	0,9601	1,449
8	0,847	1,2149	0,03870	3,5	17,64	0,68257	4,5	0,8803	1,290

Tabla 33. Resumen de los resultados del experimento M1881 Delta Flume 1:6.

### Experimento: M1980 Delta Flume 1:8

A continuación, se realiza del caso denominado M1980 Delta Flume, el cual tiene pendiente 1:8.

Las características geométricas se han obtenido gracias a la lectura del documento *Van der Meer et al. 1992*; y son las que se detallan a continuación en la tabla 34.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	230	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	174,00	m

Tabla 34. Características geométricas del experimento M1980 Delta Flume 1:8.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca  $\times$  :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	0,5653	0,996
2	0,5653	1,0187

Tabla 35. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento M1980 Delta Flume 1:8.

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,5653	0,996

Tabla 36. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	1,05556	1,3229	1,051
3,5	0,86235	0,94739	0,8589
3	0,66579	0,57502	0,6631

Tabla 37. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

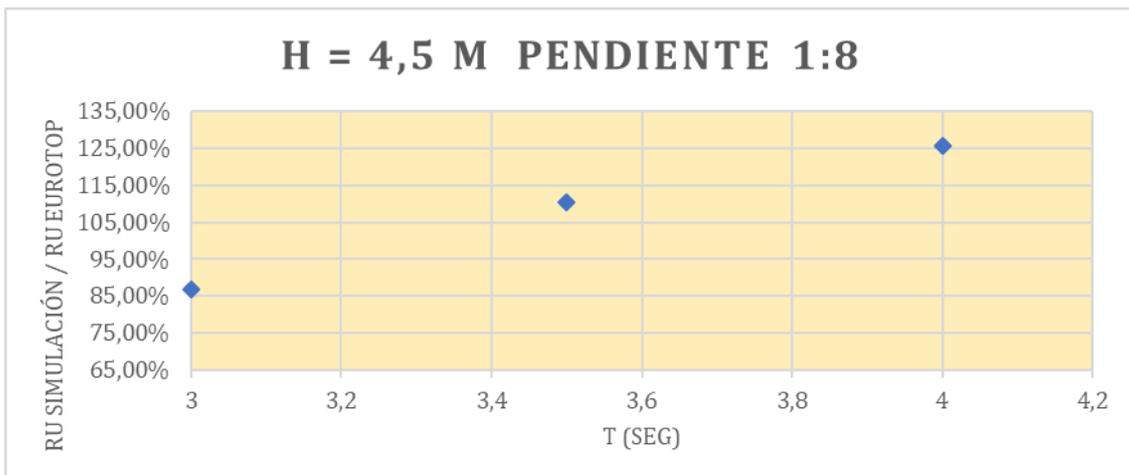


Figura 21. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h=4,5$  m,  $T = 3,5$  seg,  $H = 0,86235$  m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,004 \rightarrow Ru = 0,91069$
- $N=0,008 \rightarrow Ru = 0,90413$
- $N = 0,012 \rightarrow Ru = 0,8948$
- $N = 0,015 \rightarrow Ru = 0,88529$
- $N = 0,018 \rightarrow Ru = 0,8772$

Se establece como fricción 0,018 para el caso Delta Flume 1:8.

**SEGUNDO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,5653	1,0187

Tabla 38. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	1,0556	1,0604	1,0753

Tabla 39. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

A continuación, se muestra la tabla resumen de todas las simulaciones del experimento M1980 Delta Flume 1:8.

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	SIMULACIÓN	
								Ru <sub>2%</sub>	Ru <sub>2%/H</sub>
1	0,5653	0,996	0,048895	3,5	17,64	0,86235	4,50	0,8772	1,017
2	0,5653	1,0187	0,048895	4	21,58	1,0556	4,50	1,0604	1,005

Tabla 40. Resumen de los resultados del experimento M1980 Delta Flume 1:8.



### Experimento: H1256 1:3

A continuación, se realiza del caso denominado H1256, el cual tiene pendiente 1:3.

Las características geométricas se han obtenido a través del documento *J.W. van der Meer et al. 1993.*; y son las que se detallan en la tabla 41.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	1	m
<b>Largo</b>	50	m
<b>Profundidad</b>	1,2	m
<b>Comienzo perfil</b>	46,40	m

Tabla 41. Características geométricas del experimento H1256 1:3.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ● :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	3,0675	3,1379
2	2,8359	3,0909
3	2,1922	2,9576
4	2,1118	3,0464
5	1,8143	2,732
6	1,785	2,6468
7	1,7777	2,6971
8	1,7436	2,7202
9	1,6289	2,5573
10	1,5437	2,5299
11	1,5242	2,4215
12	1,7607	2,7048
13	1,5193	2,3789
14	1,5607	2,3907
15	1,6509	2,6387

Tabla 42. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento H1256 1:3.

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
3,0675	3,1379

Tabla 43. Datos de la simulación.

<b>h = 0,6 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3,5	0,10414	0,2947	0,3268
4	0,12013	0,30167	0,3769
5	0,14093	0,40133	0,4422
6	0,16997	0,4352	0,5333
7	0,19889	0,48788	0,624

Tabla 44. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,6 m.

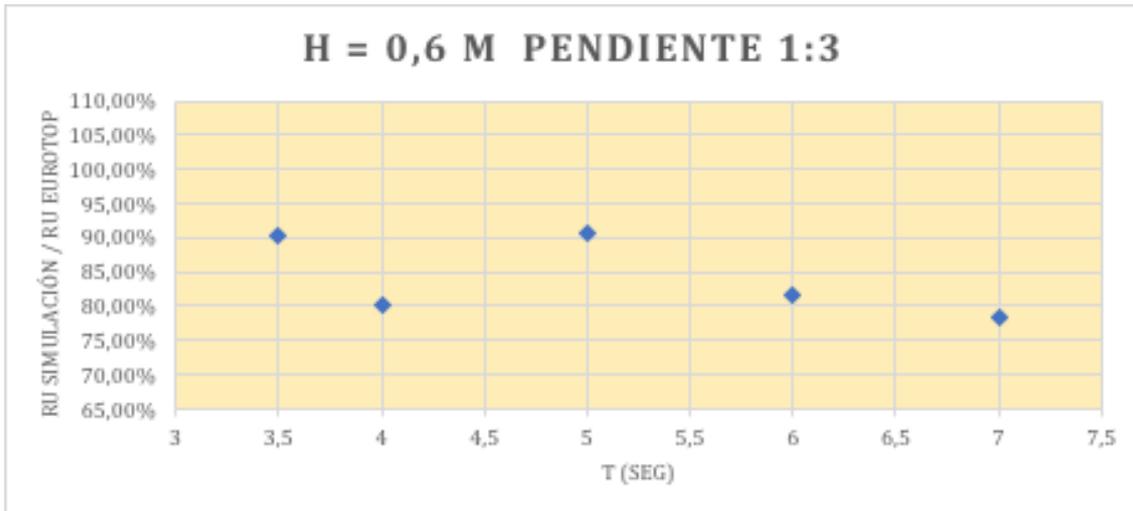


Figura 22. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,6 m.

Al igual que ocurrió con el caso de pendiente 1:3 del Delta Flume, este caso con igual pendiente ha aportado resultados por debajo de los datos recogidos en el manual EurOtop, incluso considerando la no presencia de elemento friccionante.

### Experimento: H1256 1:4

A continuación, se realiza del caso denominado H1256, el cual tiene pendiente 1:4.

Las características geométricas se han obtenido a través del documento *J.W. van der Meer et al. 1993.*; y son las que se detallan en la tabla 45.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	1	m
<b>Largo</b>	50	m
<b>Profundidad</b>	1,2	m
<b>Comienzo perfil</b>	45,20	m

Tabla 45. Características geométricas del experimento H1256 1:4.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca + :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	2,2201	3,1188
2	2,2291	3,0001
3	1,568	2,4949
4	1,2121	2,0285
5	1,1224	1,8193
6	1,0835	1,7907
7	1,3676	2,1904
8	1,6608	2,5237

Tabla 46. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento H1256 1:4.

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
2,2201	3,1188

Tabla 47. Datos de la simulación.

<b>h = 0,45 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,07724	0,22405	0,2409
4	0,10456	0,29802	0,3261
5	0,1316	0,34481	0,41043

Tabla 48. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,45 m.

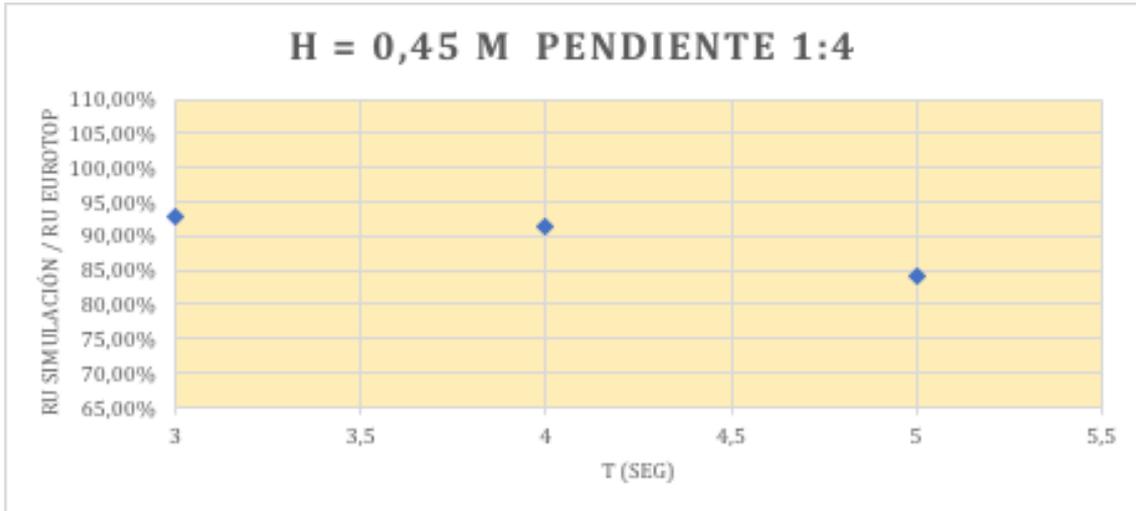


Figura 23. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,45 m.

<b>h = 0,6 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,11995	0,32779	0,3741
5	0,15134	0,39551	0,472
6	0,18252	0,48793	0,5692
7	0,21358	0,55793	0,661

Tabla 49. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,6 m.

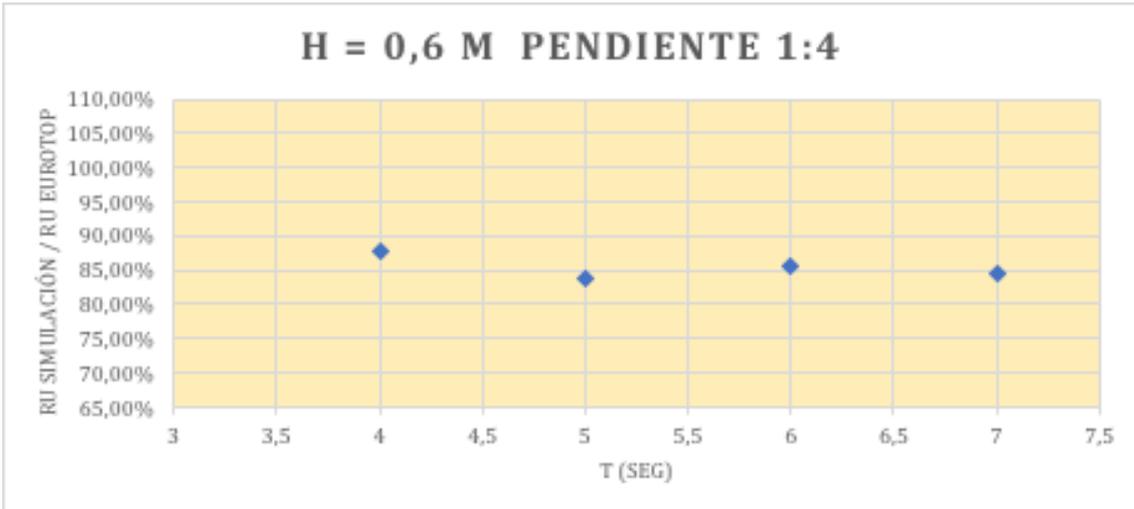


Figura 24. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,6 m.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,12901	0,42472	0,4024
5	0,16302	0,5368	0,5084
6	0,19677	0,6024	0,6137

Tabla 50. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,70 m.

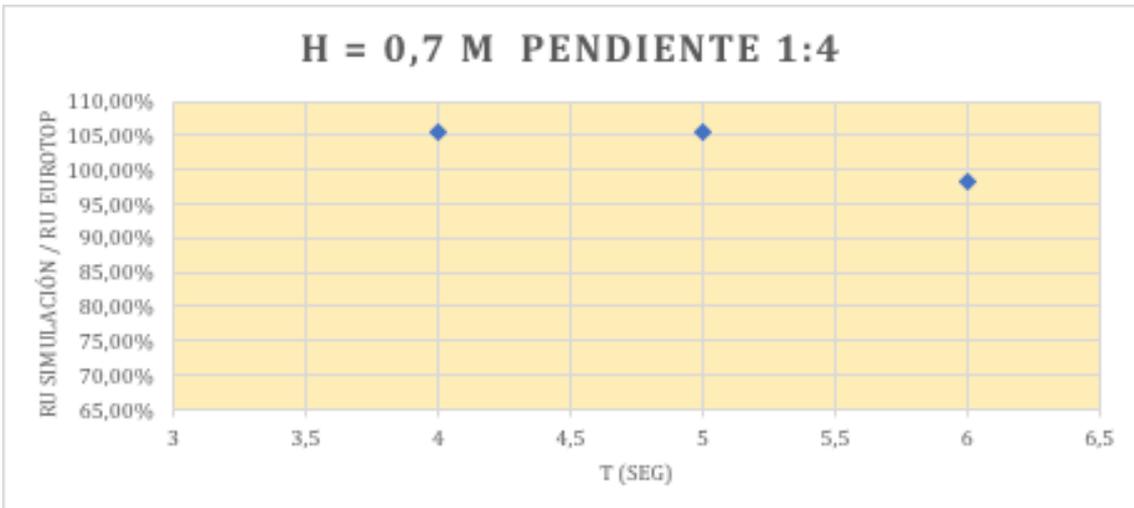


Figura 25. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,7 m.

<b>h = 0,8 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,1002	0,3038	0,3125
4	0,13732	0,3426	0,4283
5	0,1738	0,44179	0,5420
6	0,20996	0,55107	0,6548

Tabla 51. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,8 m.



Figura 26. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,8 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h = 0,7$  m,  $T = 5$  seg,  $H = 0,16302$  m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,003 \rightarrow Ru = 0,54656$
- $N=0,006 \rightarrow Ru = 0,53301$
- $N=0,01 \rightarrow Ru = 0,52785$
- $N=0,015 \rightarrow Ru = 0,50482$

Se establece como fricción 0,015 para el caso H1256 1:4.

**SEGUNDO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
2,2291	3,0001

Tabla 52. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	0,16171	0,50136	0,5084

Tabla 53. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

TERCER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,568	2,4949

Tabla 54. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,18938	0,4793	0,4725

Tabla 55. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

CUARTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,2121	2,0285

Tabla 56. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
2	0,19669	0,4012	0,3989

Tabla 57. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

QUINTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,1224	1,8193

Tabla 58. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
2	0,22939	0,41979	0,4173

Tabla 59. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

SEXO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,0835	1,7907

Tabla 60. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
2	0,24615	0,4395	0,4307

Tabla 61. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

SÉPTIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3676	2,1904

Tabla 62. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0,24895	0,5153	0,5453
2	0,15451	0,3297	0,3384

Tabla 63. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

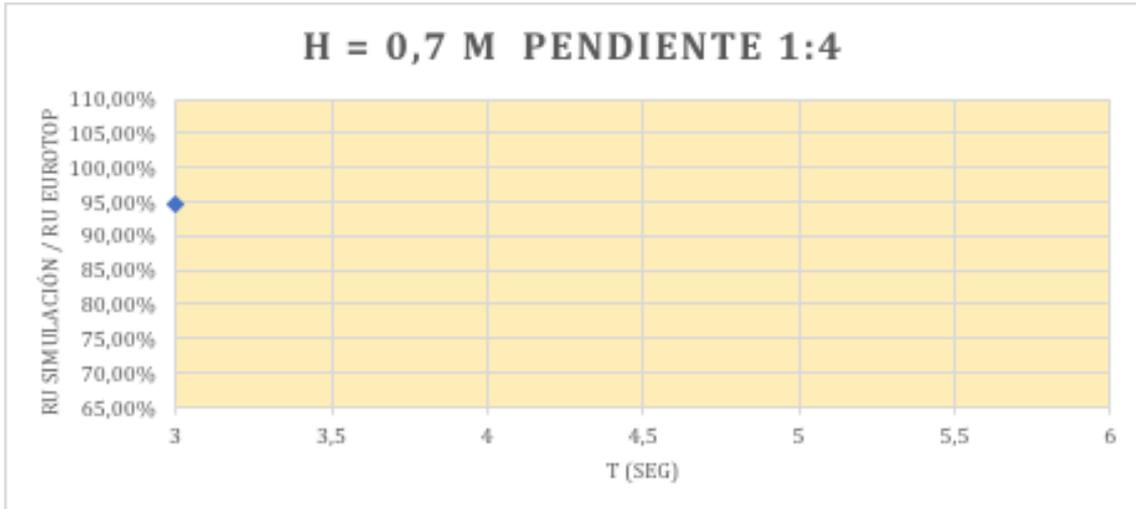


Figura 27. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 0,7 m.

OCTAVO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3676	2,1904

Tabla 64. Datos de la simulación.

<b>h = 0,7 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
3	0.16881	0.44822	0.4260

Tabla 65. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 0,7 m.

A continuación, se muestra la tabla resumen de todas las simulaciones del experimento H1256 1:4.

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	SIMULACIÓN	
								$Ru_{2\%}$	$Ru_{2\%}/H$
1	2,2201	3,1188	0,012680	5	12,85600	0,16302	0,70	0,50482	3,097
2	2,2291	3,0001	0,012578	5	12,85600	0,16171	0,70	0,50136	3,100
3	1,568	2,4949	0,025421	3	7,44982	0,18938	0,70	0,4793	2,531
4	1,2121	2,0285	0,042541	2	4,62365	0,19669	0,70	0,4012	2,040
5	1,1224	1,8193	0,049612	2	4,62365	0,22939	0,70	0,41979	1,830
6	1,0835	1,7907	0,053238	2	4,62365	0,24615	0,70	0,4395	1,785
7	1,3676	2,1904	0,033417	2	4,62365	0,15451	0,70	0,3297	2,134
8	1,6608	2,5237	0,022659	3	7,44982	0,16881	0,70	0,44822	2,655

Tabla 66. Resumen de los resultados del experimento H1256 1:4



### Experimento: Führboter Hannover 1:6

A continuación, se realiza del caso denominado Führboter Hannover, el cual tiene pendiente 1:6.

Las características geométricas se han obtenido gracias a la lectura del documento *Van der Meer et al. 1992*; y son las que se detallan a continuación en la tabla 67.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	324	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	282,0	m

Tabla 67. Características geométricas del experimento Führboter Hannover 1:6.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca  $\times$  :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	2,182	2,9513
2	1,9667	2,9553
3	1,7486	2,5901
4	1,6309	2,649
5	1,5247	2,5804
6	1,3122	2,206
7	1,3811	2,1698
8	1,206	2,1875
9	1,0883	1,9456

Tabla 68. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento Führboter Hannover 1:6.

**PRIMER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
2,182	2,9513

Tabla 69. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,28008	0,79135	0,8266
9	0,318	0,97166	0,9385
10	0,35564	1,01932	1,0496

Tabla 70. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

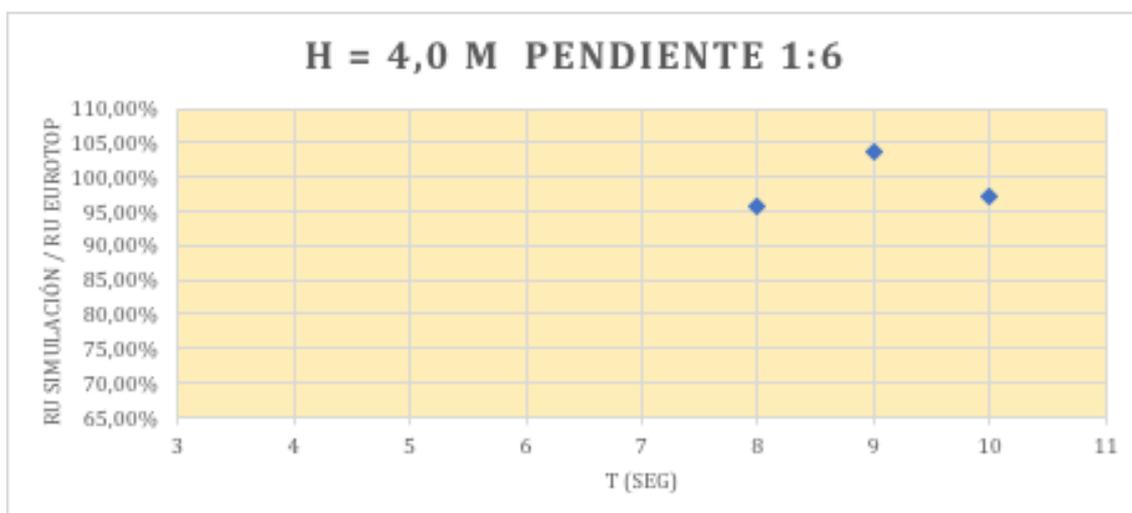


Figura 28. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,29544	0,86119	0,8719
9	0,33584	0,97483	0,9912
10	0,37591	1,07562	1,1094

Tabla 71. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

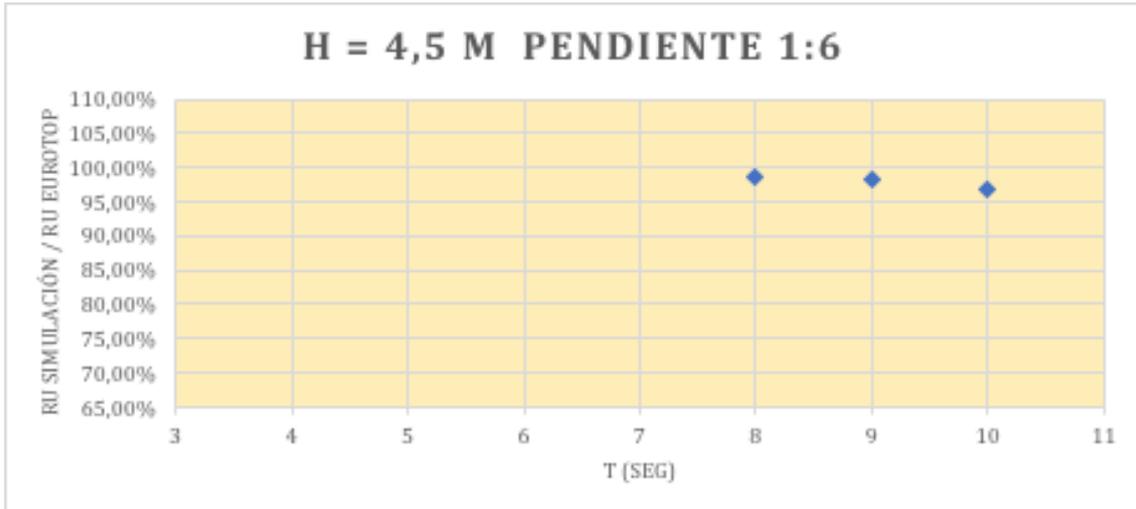


Figura 29. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h = 4,0$  m,  $T = 9$  seg,  $H = 0,318$  m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,003 \rightarrow Ru = 0,96881$
- $N=0,006 \rightarrow Ru = 0,93175$

Se establece como fricción 0,006 para el caso Fürboter Hannover 1:6.

**SEGUNDO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,9667	2,9553

Tabla 72. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,34476	0,9831	1,0189
9	0,39143	1,1650	1,1568

Tabla 73. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

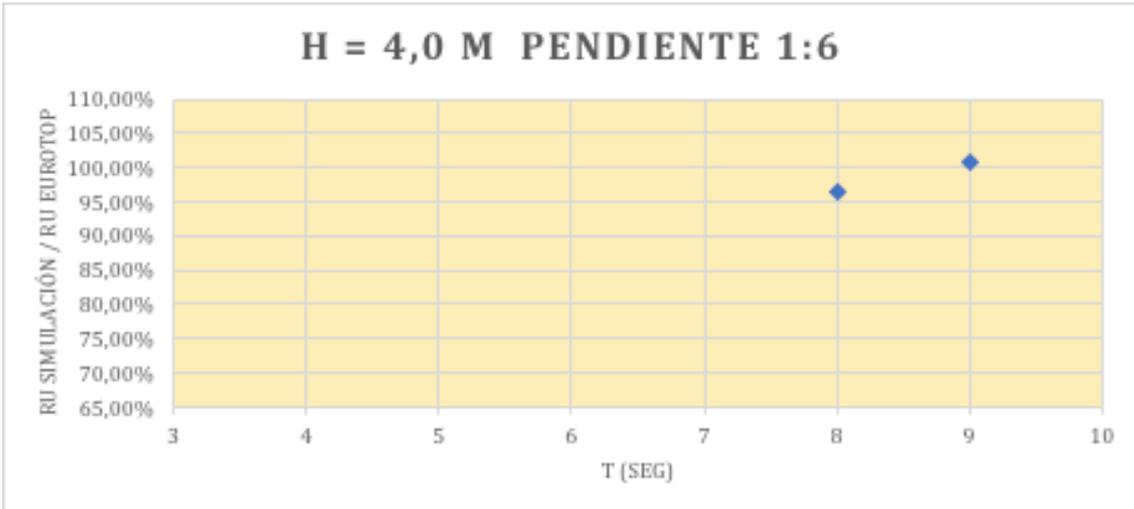


Figura 30. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

**TERCER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,7486	2,5901

Tabla 74. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,43612	1,1747	1,1296
7	0,37647	0,9616	0,9751

Tabla 75. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

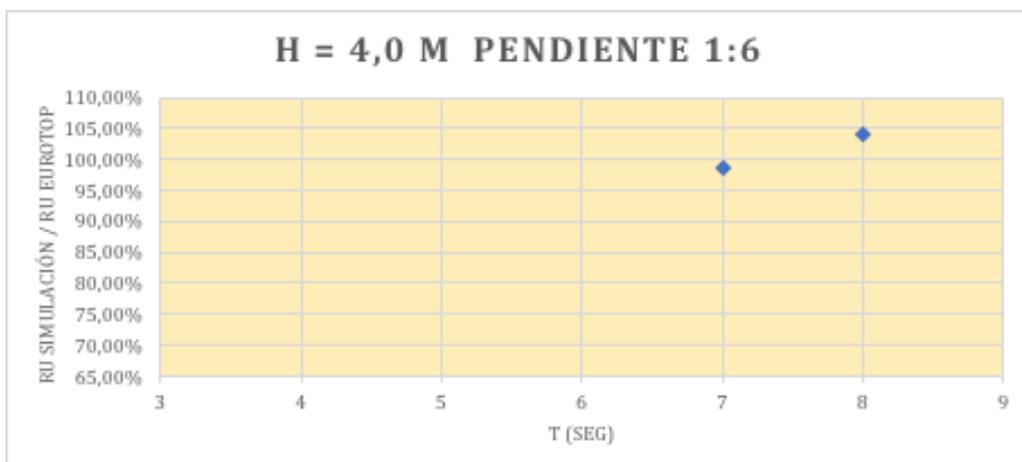


Figura 31. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

CUARTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,6309	2,649

Tabla 76. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,43277	1,1632	1,1464
6	0,36314	0,9534	0,9619

Tabla 77. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

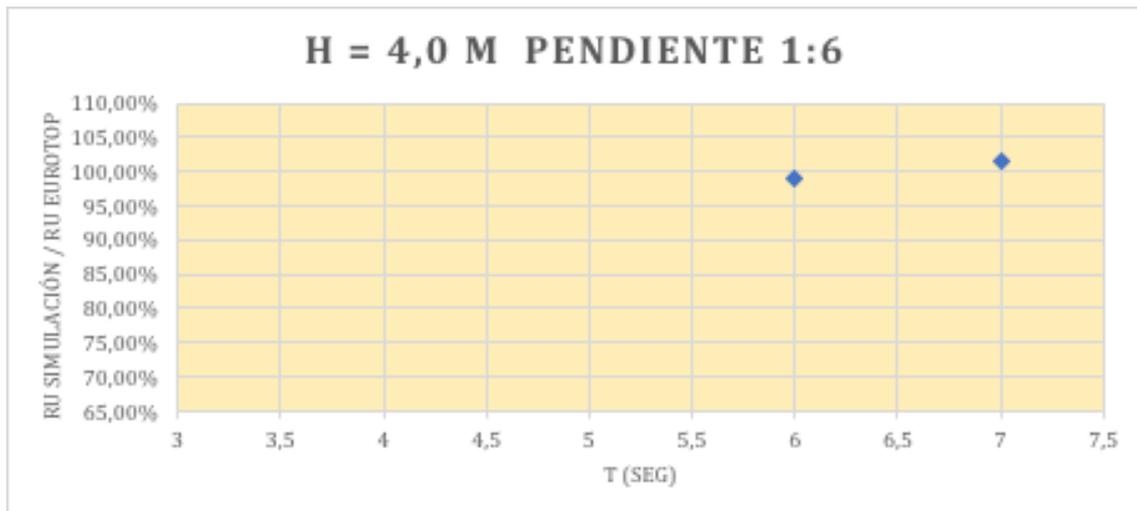


Figura 32. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

QUINTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,5247	2,5804

Tabla 78. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	0,33393	0,75288	0,8617
6	0,41548	1,0576	1,0721

Tabla 79. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

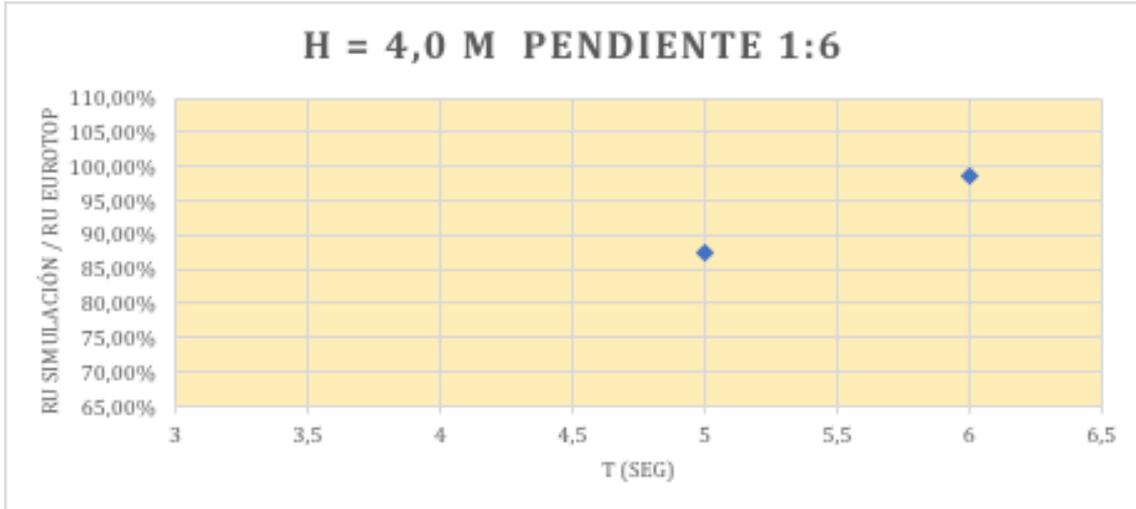


Figura 33. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

**SEXTO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3122	2,206

Tabla 80. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
6	0,56095	1,2858	1,2375
5	0,45084	0,9818	0,9946

Tabla 81. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.



Figura 34. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

SÉPTIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3811	2,1698

Tabla 82. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	0,40698	0,8894	0,8831

Tabla 83. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

OCTAVO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,206	2,1875

Tabla 84. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	0,53374	1,1623	1,1676

Tabla 85. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

**NOVENO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,0883	1,9456

Tabla 86. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
6	0,81551	1,5227	1,5867
4	0,48927	0,78507	0,9519

Tabla 87. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

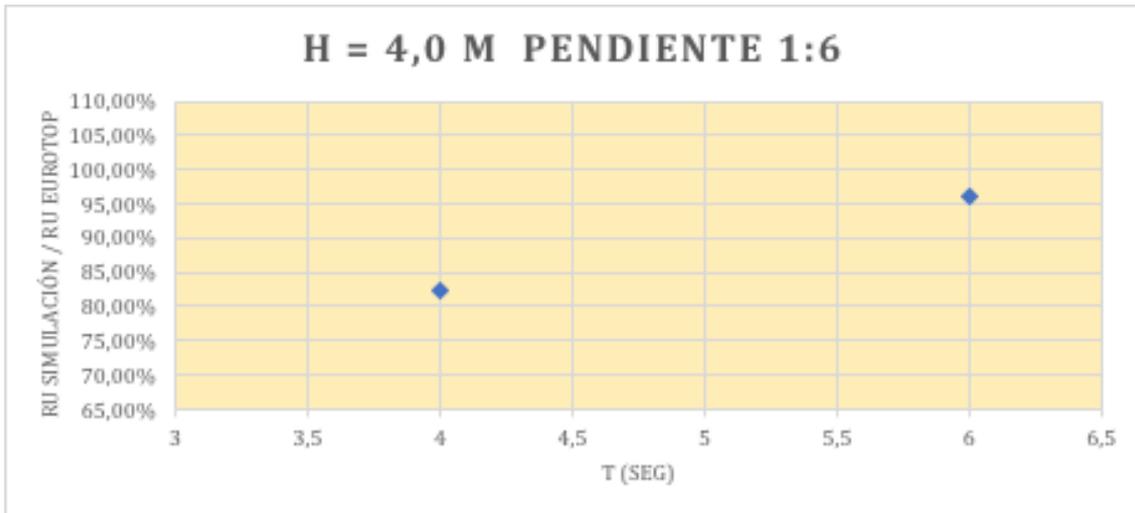


Figura 35. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

A continuación, se muestra la tabla resumen de todas las simulaciones realizadas del experimento Führboter Hannover 1:6.



	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	SIMULACIÓN	
								Ru <sub>2%</sub>	Ru <sub>2%</sub> /H
1	2,182	2,9513	0,005834	9	54,50517	0,31800	4,00	0,93175	2,930
2	1,9667	2,9553	0,007182	9	54,50517	0,39143	4,00	1,165	2,976
3	1,7486	2,5901	0,009085	8	48,00581	0,43612	4,00	0,9616	2,205
4	1,6309	2,649	0,010443	6	34,77175	0,36314	4,00	0,9534	2,625
5	1,5247	2,5804	0,011949	6	34,77175	0,41548	4,00	1,0576	2,545
6	1,3122	2,206	0,016132	5	27,94624	0,45084	4,00	0,9818	2,178
7	1,3811	2,1698	0,014563	5	27,94624	0,40698	4,00	0,8894	2,185
8	1,206	2,1875	0,019099	5	27,94624	0,53374	4,00	1,1623	2,178
9	1,0883	1,9456	0,023453	6	34,77175	0,81551	4,00	1,5227	1,867

Tabla 88. Resumen de los resultados del experimento Führboter Hannover 1:6.

### Experimento: H3608 1:2,5

A continuación, se realiza del caso denominado H3608, el cual tiene pendiente 1:2,5.

Las características geométricas se encuentran en el documento *Van Gent, 1999*; pero no se ha podido tener acceso al mismo, por lo tanto, se han propuesto unas características geométricas que coinciden con las del nuevo tanque de simulaciones de Deltares<sup>2</sup>.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	291	m
<b>Profundidad</b>	9,5	m
<b>Comienzo perfil</b>	267,25	m

Tabla 89. Características geométricas del experimento H3608 1:2,5.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ■ :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	3,0372	3,3626
2	2,5737	3,0401
3	2,1711	2,9146

Tabla 90. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento\_H3608 1:2,5.

**PRIMER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
3,0372	3,3626

Tabla 91. Datos de la simulación.

<sup>2</sup> <https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-flume/>

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,8783	2,7446	2,9534
9	0,9984	3,0337	3,3572
10	1,1176	3,5199	3,7580

Tabla 92. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

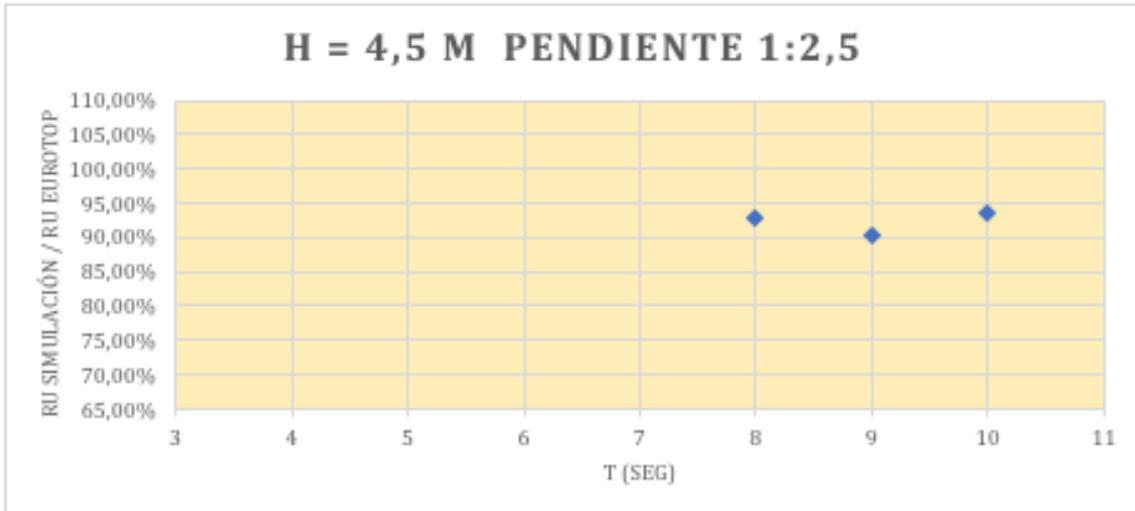


Figura 36. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

<b>h = 5,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,9207	2,8934	3,0959
9	1,0479	3,1259	3,5237
10	1,1739	3,6147	3,9474

Tabla 93. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

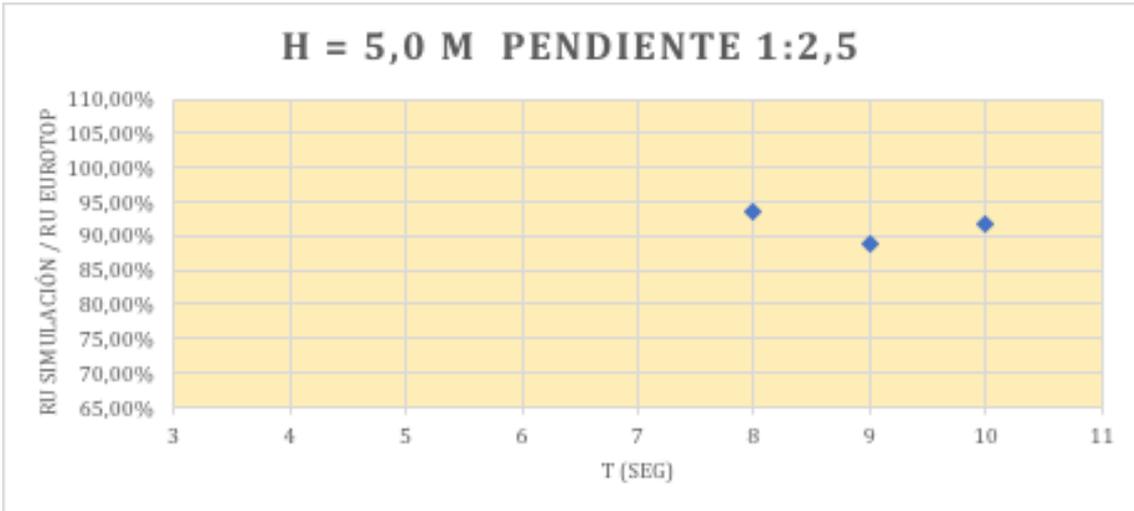


Figura 37. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

<b>h = 5,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,9603	2,9667	3,2291
9	1,0943	3,3198	3,6796
10	1,2269	3,8965	4,1255

Tabla 94. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5,5 m.

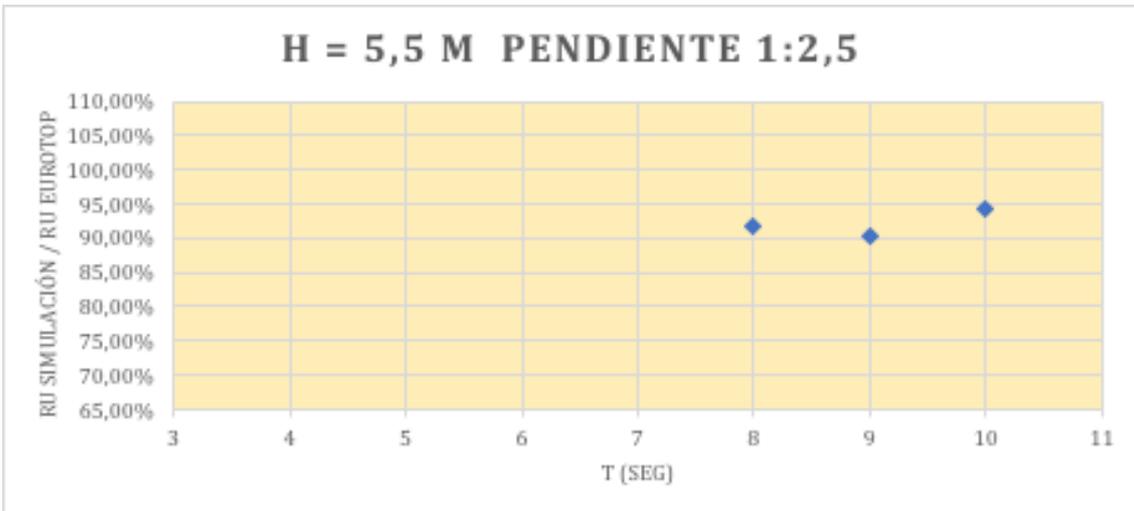


Figura 38. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5,5 m.



Al igual que ocurrió con el caso de pendiente 1:3 del Delta Flume, este caso con igual pendiente ha aportado resultados por debajo de los datos recogidos en el manual EurOtop, incluso considerando la no presencia de elemento friccionante.



### Experimento: H3608 1:4

A continuación, se realiza del caso denominado H3608, el cual tiene pendiente 1:4.

Las características geométricas se encuentran en el documento *Van Gent, 1999*; pero no se ha podido tener acceso al mismo, por lo tanto, se han propuesto unas características geométricas que coinciden con las del nuevo tanque de simulaciones de Deltares<sup>3</sup>.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	291	m
<b>Profundidad</b>	9,5	m
<b>Comienzo perfil</b>	253,0	m

Tabla 95. Características geométricas del experimento H3608 1:4.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca  $\blacklozenge$  :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	1,8997	2,8191
2	1,6062	2,2849
3	1,3553	1,9466

Tabla 96. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento H3608 1:4.

**PRIMER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,8997	2,8191

Tabla 97. Datos de la simulación.

<sup>3</sup> <https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-flume/>

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,8769	2,5073	2,4721
9	0,9969	2,7632	2,8104
10	1,1158	3,2431	3,1456

Tabla 98. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

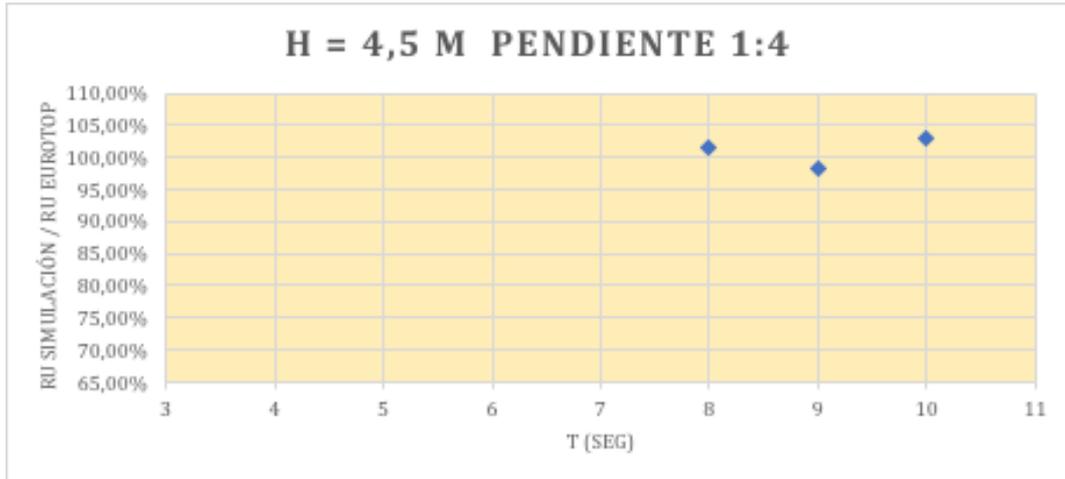


Figura 39. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,9193	2,5506	2,5916
9	1,0463	3,001	2,9496
10	1,1721	3,911	3,3043

Tabla 99. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

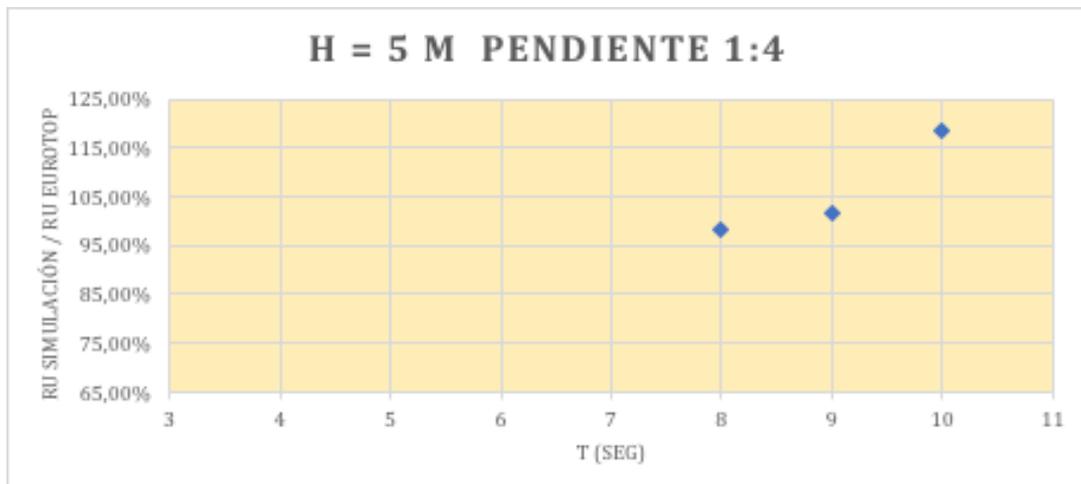


Figura 40. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h = 5,0$  m,  $T = 9$  seg,  $H = 1,0463$ m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,003 \rightarrow Ru = 2,9306$

Se establece como fricción 0,003 para el caso H3608 1:4.

SEGUNDO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,6062	2,2849

Tabla 100. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
9	1,52835	3,5035	3,4921

Tabla 101. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

TERCER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3553	1,9466

Tabla 102. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	1,8838	3,7315	3,6670
7	1,6172	3,1533	3,1480

Tabla 103. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

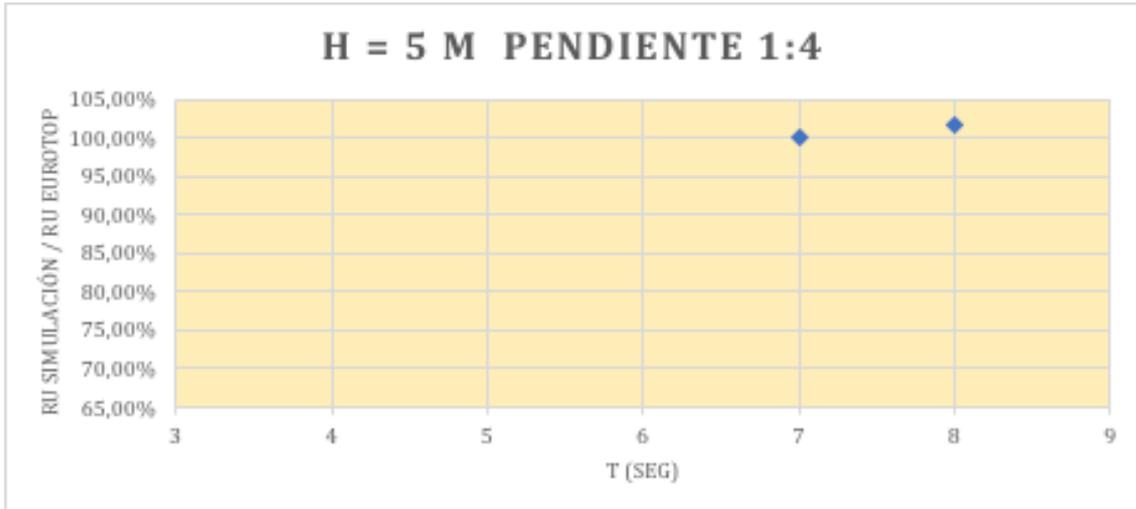


Figura 41. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

A continuación, se muestra la tabla resumen de las simulaciones realizadas del experimento H3608 1:4.

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	SIMULACIÓN	
								Ru <sub>2%</sub>	Ru <sub>2%</sub> /H
1	1,8997	2,8191	0,017318	9	60,413	1,04628	5,00	2,9306	2,801
2	1,6062	2,2849	0,024226	9	60,413	1,46359	5,00	3,5035	2,394
3	1,3553	1,9466	0,034026	7	45,655	1,55346	5,00	3,1533	2,030

Tabla 104. Resumen de los resultados del experimento H3608 1:4.

### Experimento: H638 App B 1:3

A continuación, se realiza del caso denominado H638 App B, el cual tiene pendiente 1:3.

Las características geométricas se encuentran en el documento *J.W. van der Meer et al. 1990*; pero no se ha podido tener acceso al mismo, por lo tanto, se han propuesto unas características geométricas que coinciden con las características de los experimentos denominados Delta Flume.

<b>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS</b>		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	230	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	209,00	m

Tabla 105. Características geométricas del experimento H638 App 1:3.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ■ :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	2,1452	2,9925
2	2,0299	2,4298
3	1,7612	2,4325
4	1,759	2,6357
5	1,5649	2,4421

Tabla 106. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento H638 App 1:3.

**PRIMER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
2,1452	2,9925

Tabla 107. Datos de la simulación.

<b>h = 4,0 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,50369	1,2267	1,5073
5	0,67475	1,8734	2,0192
6	0,83955	2,3761	2,5124

Tabla 108. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4 m.

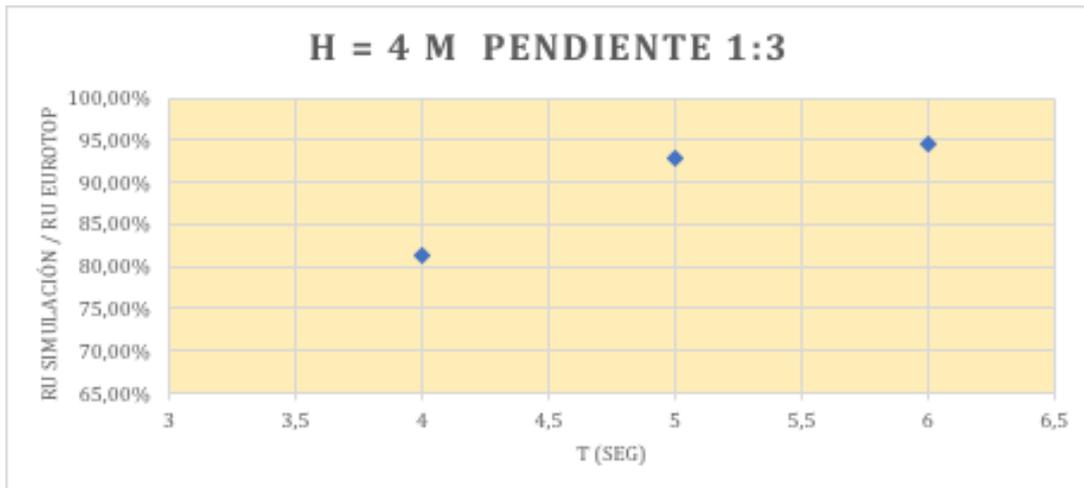


Figura 42. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4 m.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	0,5359	1,4736	1,6039
5	0,7318	1,9973	2,1899
6	0,9197	2,5674	2,7521

Tabla 109. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

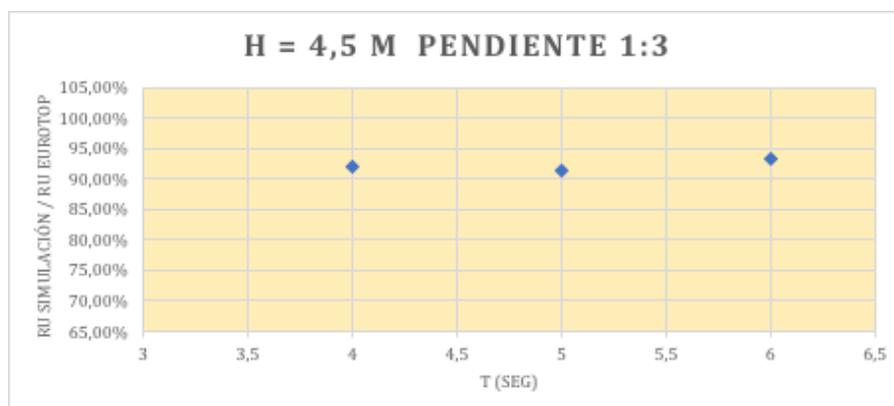


Figura 43. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.



**Experimento: LWI – Nr. 1:3**

A continuación, se realiza del caso denominado LWI – Nr., el cual tiene pendiente 1:3.

Las características geométricas se encuentran en el documento *Oumeraci, et al. 2002.*; pero no se ha podido tener acceso al mismo, por lo tanto, se han propuesto unas características geométricas que coinciden con las del nuevo tanque de simulaciones de Deltares<sup>4</sup>.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	291	m
<b>Profundidad</b>	9,5	m
<b>Comienzo perfil</b>	262,5	m

Tabla 110. Características geométricas del experimento LWI – Nr. 1:3.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso.

A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ✕ :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	2,357	3,2962
2	2,3306	3,3198
3	2,3653	3,1519
4	2,3273	2,9497
5	2,2809	3,1359
6	2,2264	3,1778
7	2,1157	3,1355
8	2,1736	2,9755
9	2,0628	2,76
10	1,6579	2,4046
11	1,6017	2,3625
12	1,6165	2,5331
13	1,6579	2,6277

<sup>4</sup> <https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-flume/>

14	1,7174	2,7014
15	1,7008	2,6567
16	1,6942	2,6278
17	1,6645	2,5227

Tabla 111. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento\_LWI – Nr. 1:3.

**PRIMER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
2,357	3,2962

Tabla 112. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,8727	2,3679	2,8766
8	1,0128	2,8455	3,3384
9	1,1518	3,1768	3,7966

Tabla 113. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.



Figura 44. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,9131	2,6473	3,0098
8	1,0617	2,9961	3,4996
9	1,2083	3,5381	3,9828

Tabla 114. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

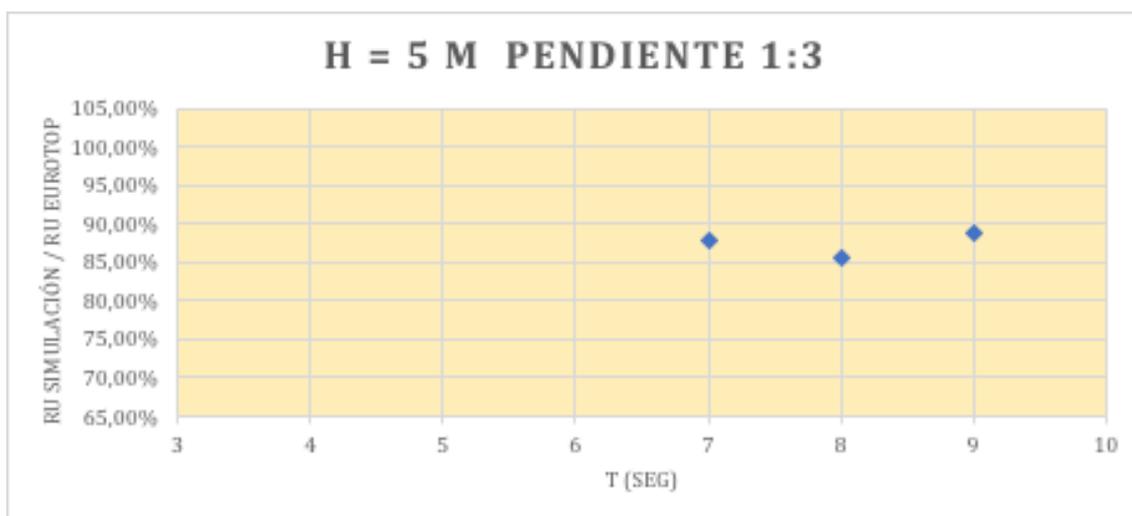


Figura 45. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

<b>h = 5,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,9506	2,7341	3,1334
8	1,1073	3,0038	3,6499
9	1,2618	3,7965	4,1591

Tabla 115. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5,5 m.

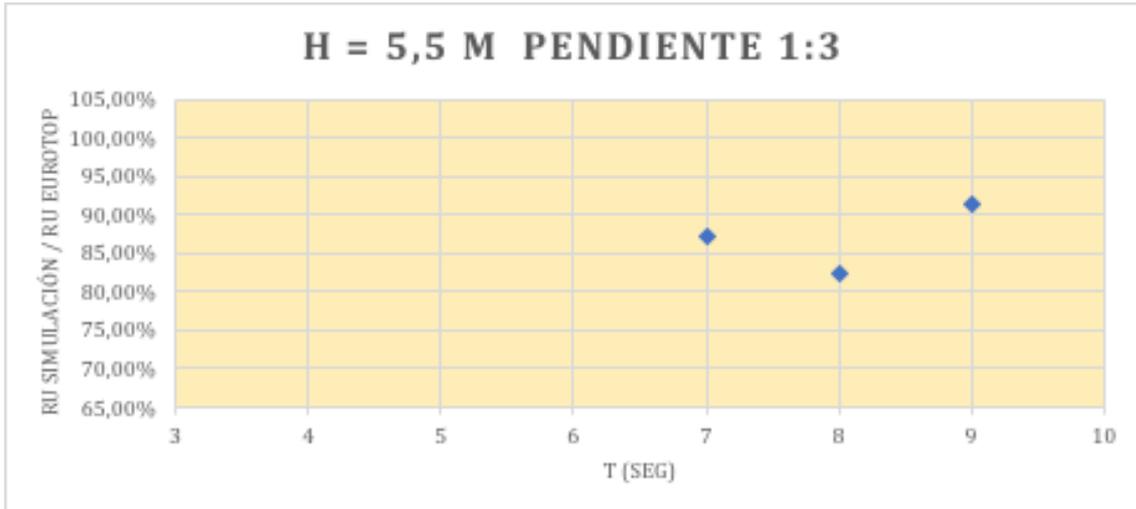


Figura 46. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5,5 m.

### Experimento: LWI – Nr. 1:6

A continuación, se realiza del caso denominado LWI – Nr., el cual tiene pendiente 1:6. Las características geométricas se encuentran en el documento *Oumeraci, H. et al. 2002.*; pero no se ha podido tener acceso al mismo, por lo tanto, se han propuesto unas características geométricas que coinciden con las del nuevo tanque de simulaciones de Deltares<sup>5</sup>.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	5	m
<b>Largo</b>	291	m
<b>Profundidad</b>	9,5	m
<b>Comienzo perfil</b>	234,0	m

Tabla 116. Características geométricas del experimento LWI – Nr. 1:6.

El comienzo del perfil se ha calculado teniendo en cuenta la pendiente que debe tener el canal en este caso. A través de la gráfica en la que se muestran los datos que debemos simular, y a la que hemos hecho referencia antes como Figura 1., se han obtenido los siguientes datos, mostrados con la marca ■ :

	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1	1,6165	2,4636
2	1,5868	2,3742
3	1,5835	2,201
4	1,3455	2,0586
5	1,1769	1,9375
6	1,1471	1,8954
7	1,1669	1,8955
8	1,0017	1,8373
9	1,0579	1,7482
10	0,9619	1,6167
11	0,9752	1,5957
12	0,8727	1,6007
13	0,7934	1,4903
14	0,7372	1,3904
15	0,8298	1,3644

Tabla 117. Datos de las simulaciones a realizar en el experimento LWI – Nr. 1:6.

<sup>5</sup> <https://www.deltares.nl/en/facilities/delta-flume/>

PRIMER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,6165	2,4636

Tabla 118. Datos de la simulación.

<b>h = 4,5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,5383	1,1123	1,3262
9	0,6119	1,3979	1,5075
10	0,6849	1,5554	1,6873

Tabla 119. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 4,5 m.

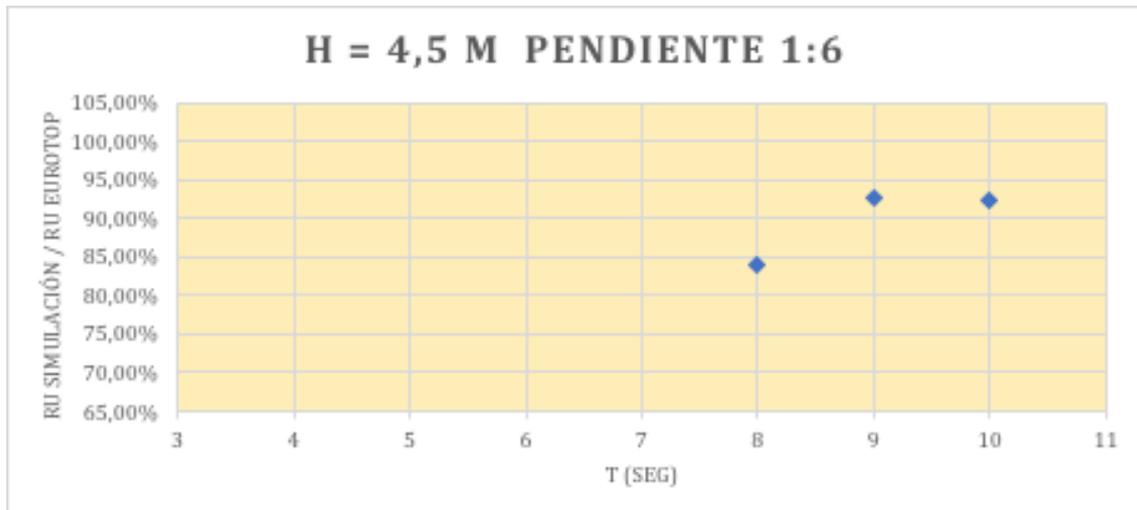


Figura 47. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 4,5 m.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,5643	1,4017	1,3902
9	0,6422	1,6197	1,5822
10	0,7195	1,7653	1,7726

Tabla 120. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

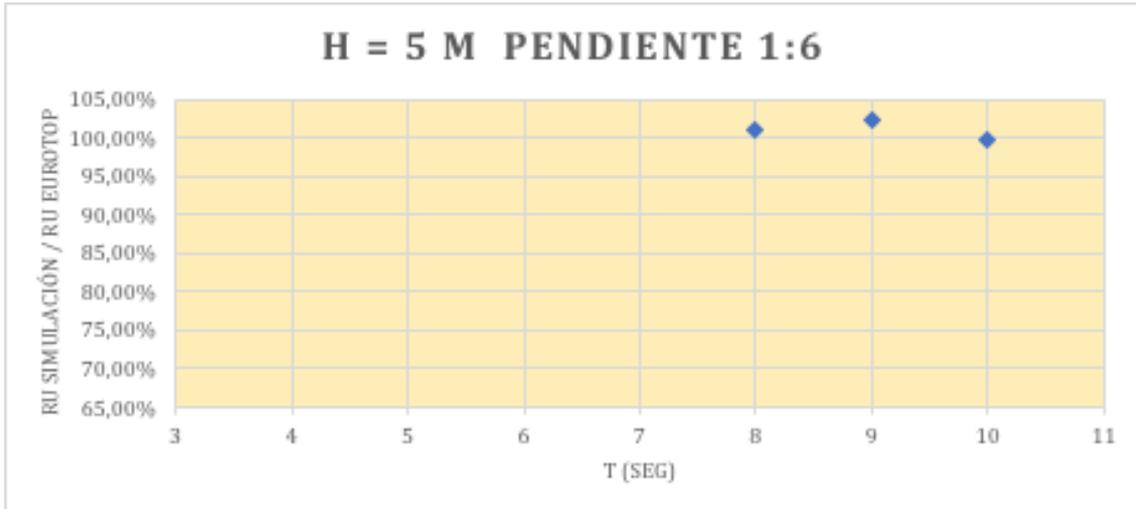


Figura 48. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

Se ha escogido la simulación que tiene  $h = 5,0$  m,  $T = 9$  seg,  $H = 0,6422$  m para empezar a introducirle fricción.

- $N=0,003 \rightarrow Ru = 1,6031$
- $N=0,006 \rightarrow Ru = 1,5801$

Se establece como fricción 0,006 para el caso LWI – Nr. 1:6.

**SEGUNDO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,5868	2,3742

Tabla 121. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,5856	1,3347	1,3903
9	0,66648	1,5715	1,5824

Tabla 122. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

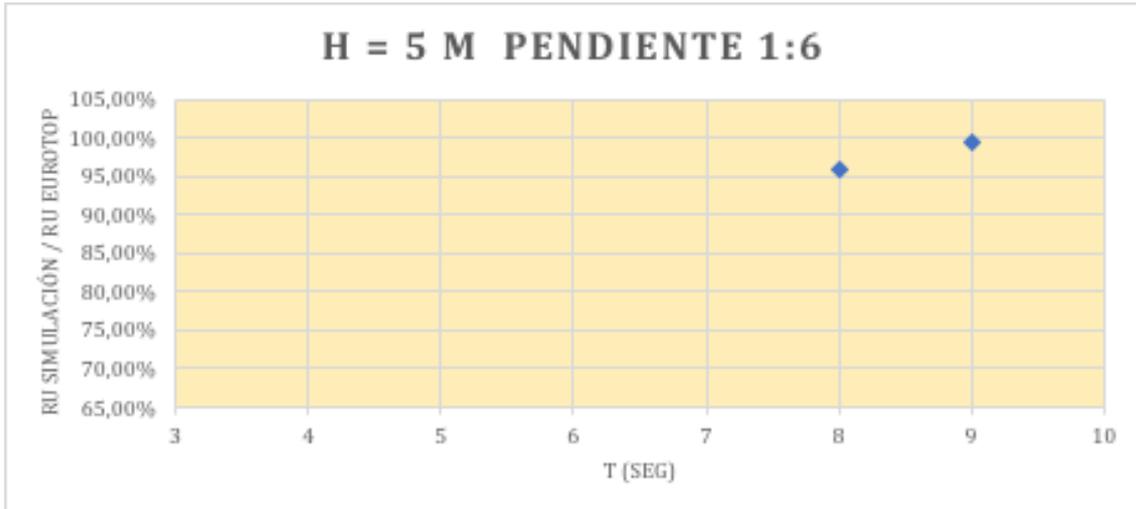


Figura 49. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

TERCER CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,5835	2,201

Tabla 123. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,5880	1,2573	1,2942
9	0,66927	1,4684	1,4731

Tabla 124. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.



Figura 50. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

CUARTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,3455	2,0586

Tabla 125. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	0,8145	1,5847	1,6767
9	0,9269	1,8915	1,9081

Tabla 126. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.



Figura 51. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m.

QUINTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,1769	1,9375

Tabla 127. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,9156	1,6945	1,7739
8	1,0645	2,0591	2,0625

Tabla 128. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

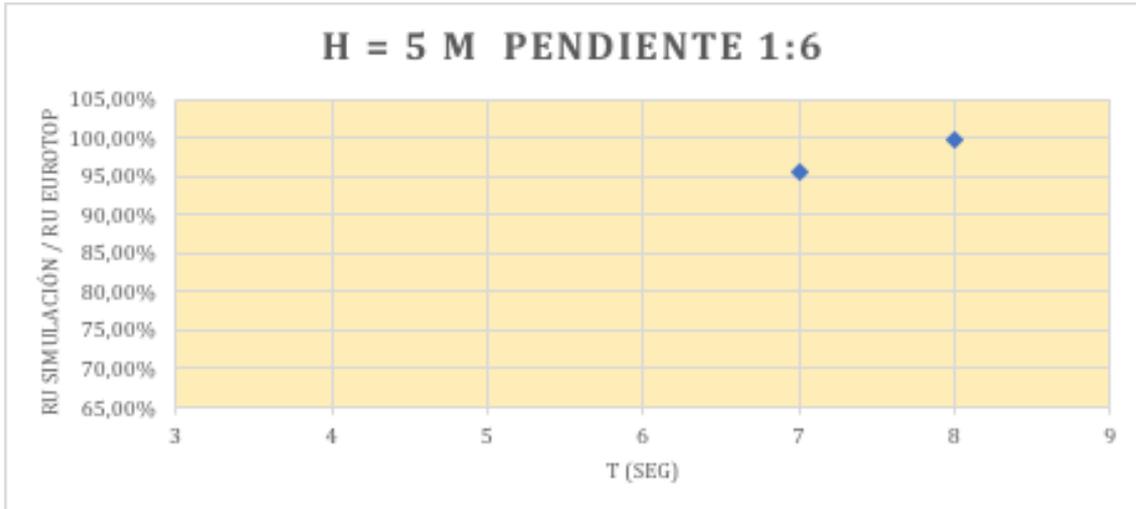


Figura 52. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

SEXO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,1471	1,8954

Tabla 129. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	1,1206	2,2677	2,1239
7	0,9638	1,8255	1,8268

Tabla 130. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

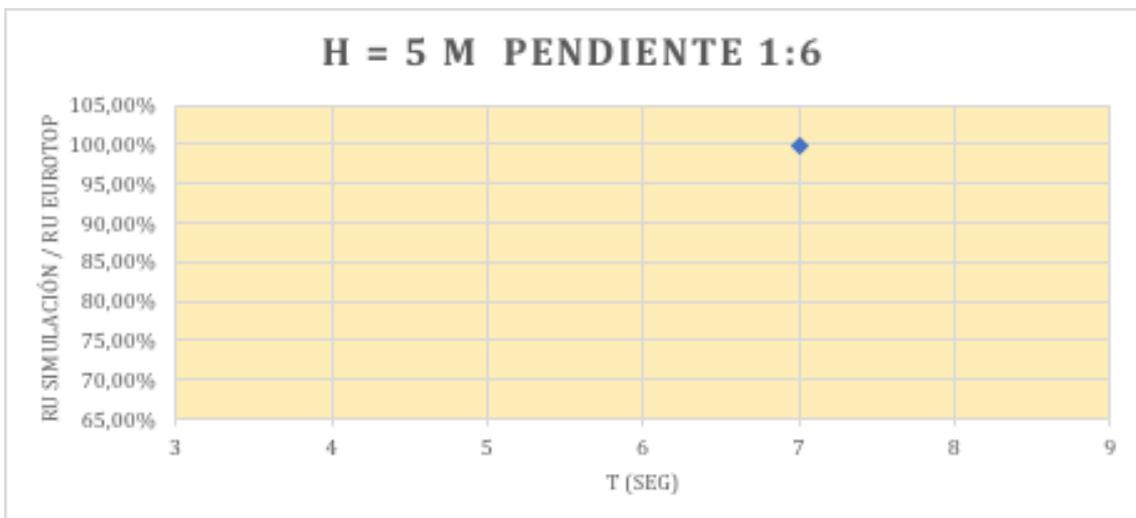


Figura 53. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

SÉPTIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,1669	1,8955

Tabla 131. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	0,9314	1,6932	1,7655
8	1,0829	2,0601	2,0526

Tabla 132. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

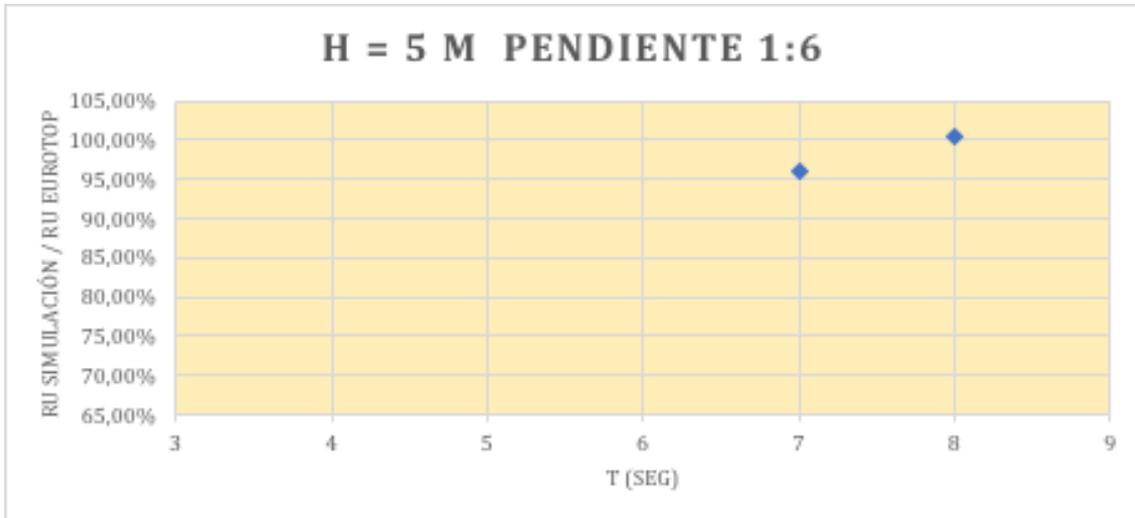


Figura 54. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

OCTAVO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,0017	1,8373

Tabla 133. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	1,4695	2,7834	2,6916
7	1,2639	2,3189	2,3222

Tabla 134. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

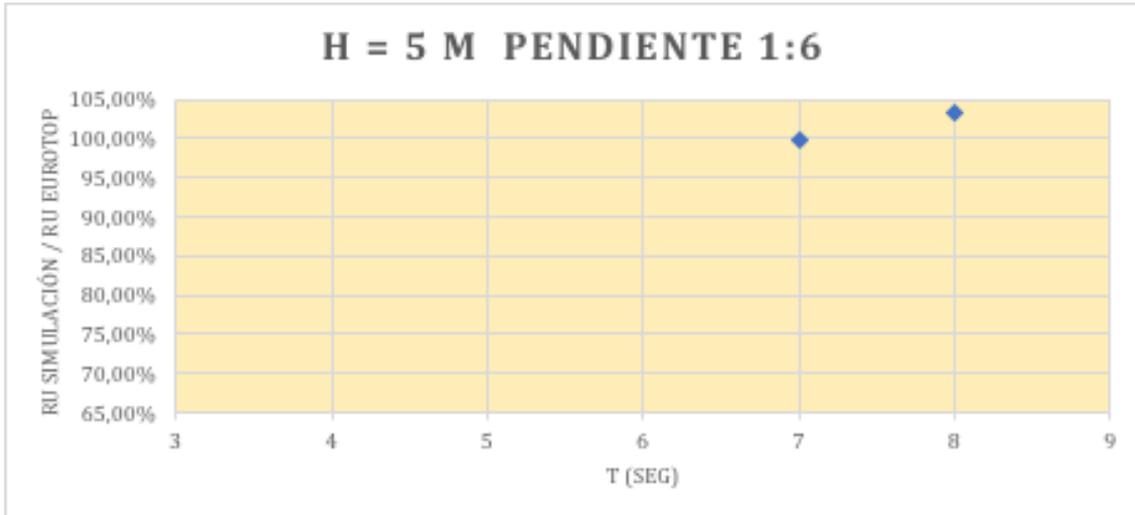


Figura 55. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

**NOVENO CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
1,0579	1,7482

Tabla 135. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	1,1332	1,9128	1,9811
8	1,3175	2,3097	2,3033

Tabla 136. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

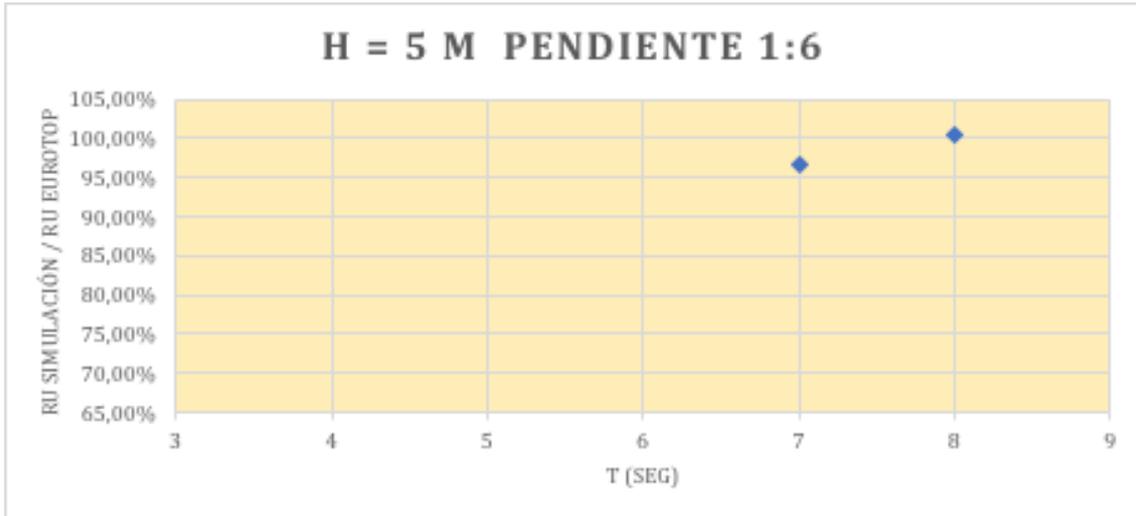


Figura 56. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

DÉCIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,9619	1,6167

Tabla 137. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
8	1,5936	2,6692	2,5767
7	1,3707	2,2137	2,2160

Tabla 138. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

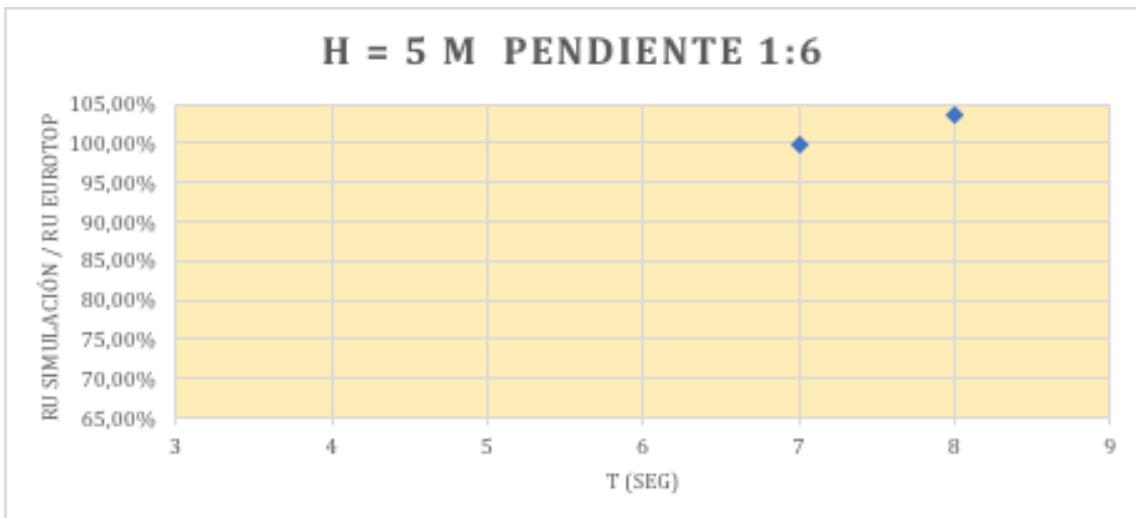


Figura 57. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

UNDÉCIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,9752	1,5957

Tabla 139. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
6	1,1126	1,7428	1,7754
7	1,3335	2,1301	2,1279

Tabla 140. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

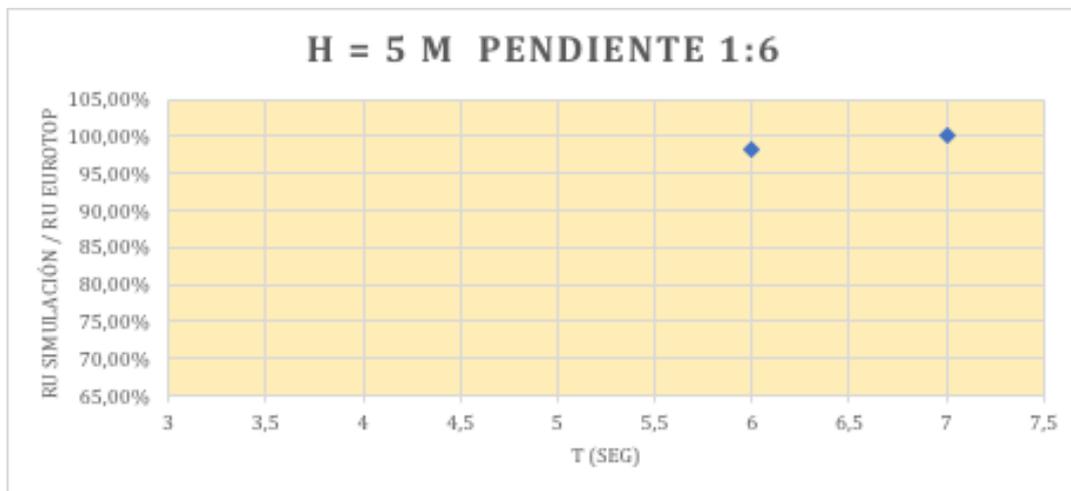


Figura 58. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

DUODÉCIMO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,8727	1,6007

Tabla 141. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
7	1,6652	2,6921	2,6655
6	1,3892	2,2198	2,2237

Tabla 142. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

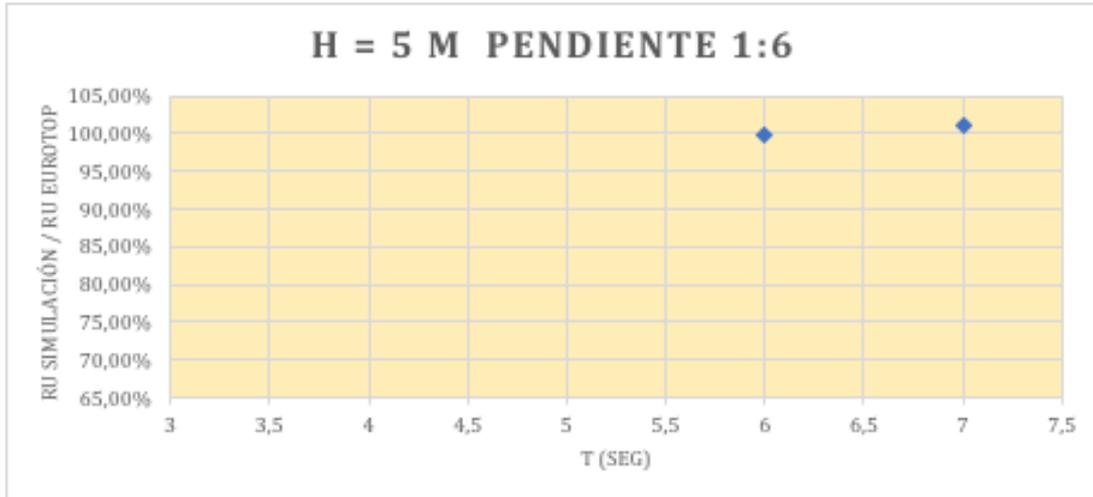


Figura 59. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

**DÉCIMOTERCER CASO:**

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,7934	1,4903

Tabla 143. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
6	1,6808	2,5637	2,5049
5	1,3375	1,9873	1,9933

Tabla 144. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.



Figura 60. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

DÉCIMOCUARTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,7372	1,3904

Tabla 145. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
4	1,1346	1,5452	1,5775
5	1,5492	2,1567	2,1540

Tabla 146. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

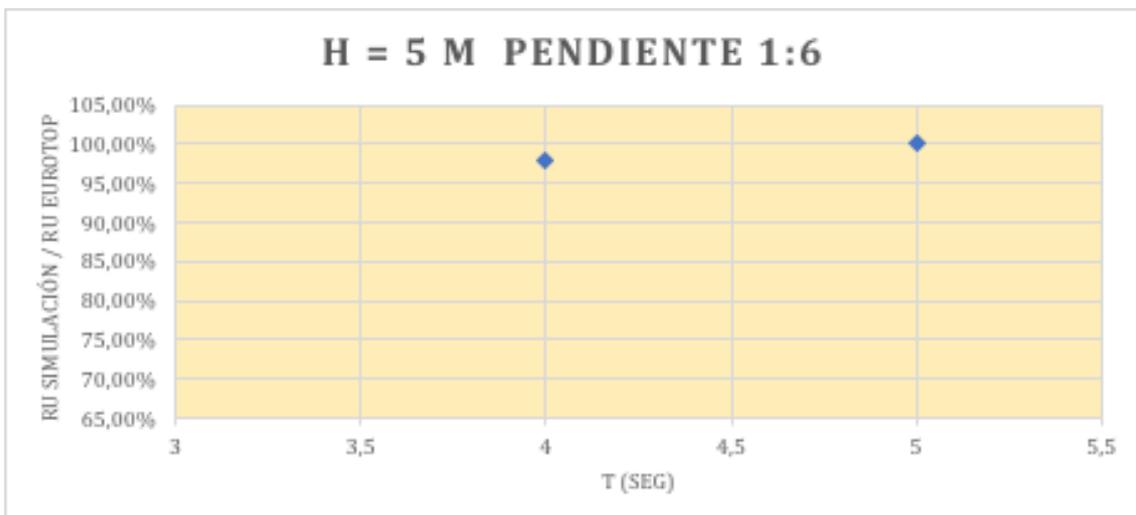


Figura 61. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

DÉCIMOQUINTO CASO:

$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$
0,8298	1,3644

Tabla 147. Datos de la simulación.

<b>h = 5 m</b>			
<b>T (seg)</b>	<b>H (m)</b>	<b>Ru (simulación)</b>	<b>Ru Eurotop</b>
5	1,2227	1,8325	1,8616
6	1,5366	2,1062	2,0965

Tabla 148. Resultados de las simulaciones realizadas con profundidad de agua de 5 m.

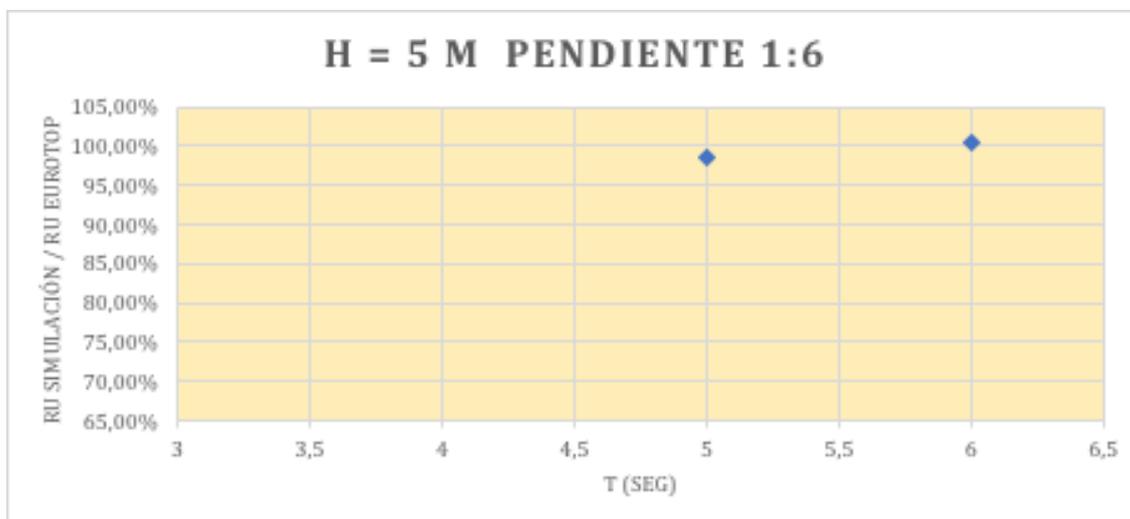


Figura 62. Gráfica con los resultados de las simulaciones con profundidad de agua de 5 m

A continuación, se muestra la tabla resumen de todas las simulaciones del experimento LWI – Nr. 1:6.

								SIMULACIÓN	
	$\xi_{m0}$	$R_{2\%}/H_{m0}$	(H/L)	T (seg)	L (m)	H (m)	h (m)	Ru <sub>2%</sub>	Ru <sub>2%</sub> /H
1	1,6165	2,4636	0,010630	9	60,41	0,64222	5,00	1,5801	2,460
2	1,5868	2,3742	0,011032	9	60,41	0,66648	5,00	1,5715	2,358
3	1,5835	2,201	0,011078	9	60,41	0,66927	5,00	1,4684	2,194
4	1,3455	2,0586	0,015344	9	60,41	0,92697	5,00	1,5847	1,710
5	1,1769	1,9375	0,020055	8	53,08	1,06454	5,00	2,0591	1,934
6	1,1471	1,8954	0,021110	7	45,65	0,96380	5,00	1,8255	1,894
7	1,1669	1,8955	0,020400	8	53,08	1,08286	5,00	2,0601	1,902
8	1,0017	1,8373	0,027684	7	45,65	1,26390	5,00	2,3189	1,835
9	1,0579	1,7482	0,024820	8	53,08	1,31750	5,00	2,3097	1,753
10	0,9619	1,6167	0,030022	7	45,65	1,37066	5,00	2,2137	1,615
11	0,9752	1,5957	0,029209	7	45,65	1,33352	5,00	2,1301	1,597
12	0,8727	1,6007	0,036473	6	38,08	1,38923	5,00	2,2198	1,598
13	0,7934	1,4903	0,044128	5	30,30	1,33748	5,00	1,9873	1,486
14	0,7372	1,3904	0,051112	5	30,30	1,54918	5,00	2,1567	1,392
15	0,8298	1,3644	0,040341	6	38,08	1,53659	5,00	2,1062	1,371

Tabla 149. Resumen de los resultados del experimento LWI – Nr. 1:6.

Realizadas todas las simulaciones, se puede afirmar que el modelo Boussinesq asemeja bien el fenómeno, exceptuando aquellos casos con pendiente igual o superior a 1:3.

En estos casos, con pendiente igual o superior a 1:3, el resultado de run-up es inferior al que se establece en el manual EurOtop, esa infravaloración se encuentra entre un 30 y un 10 por ciento, incluso considerando la no presencia de elemento friccionante.

La infravaloración en el resultado puede deberse a que el software CELERIS Advent subestima el run-up en esas pendientes.

A continuación, se muestra la Figura 63., la cual muestra los resultados de las simulaciones realizadas en CELERIS.

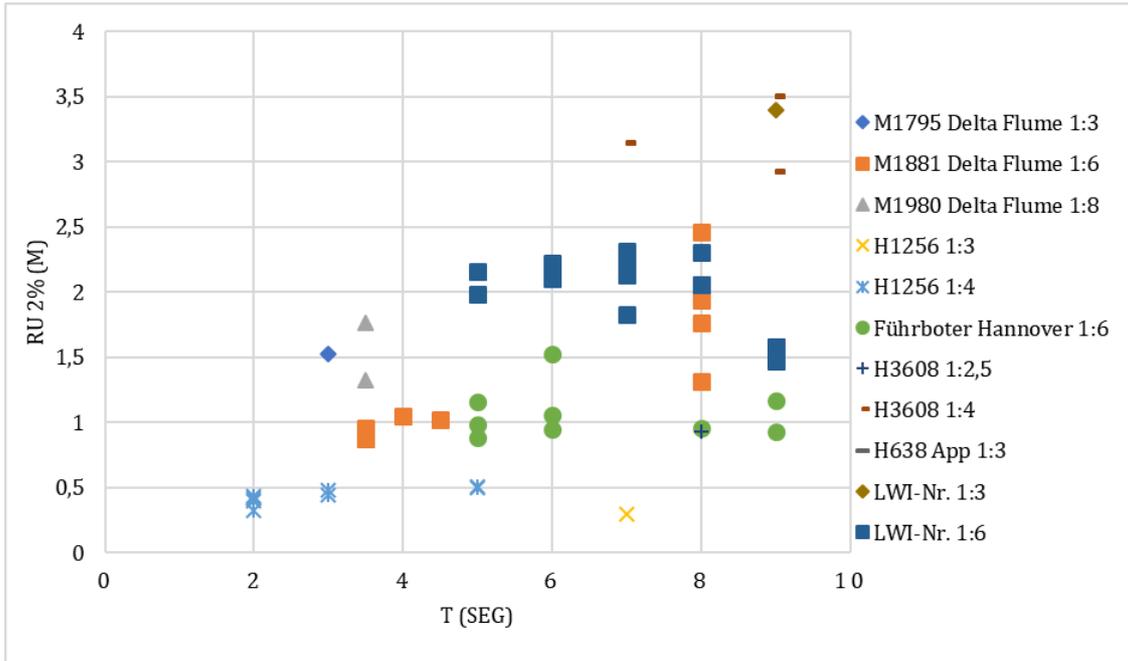


Figura 63. Gráfica con los resultados de todas las simulaciones realizadas con CELERIS.

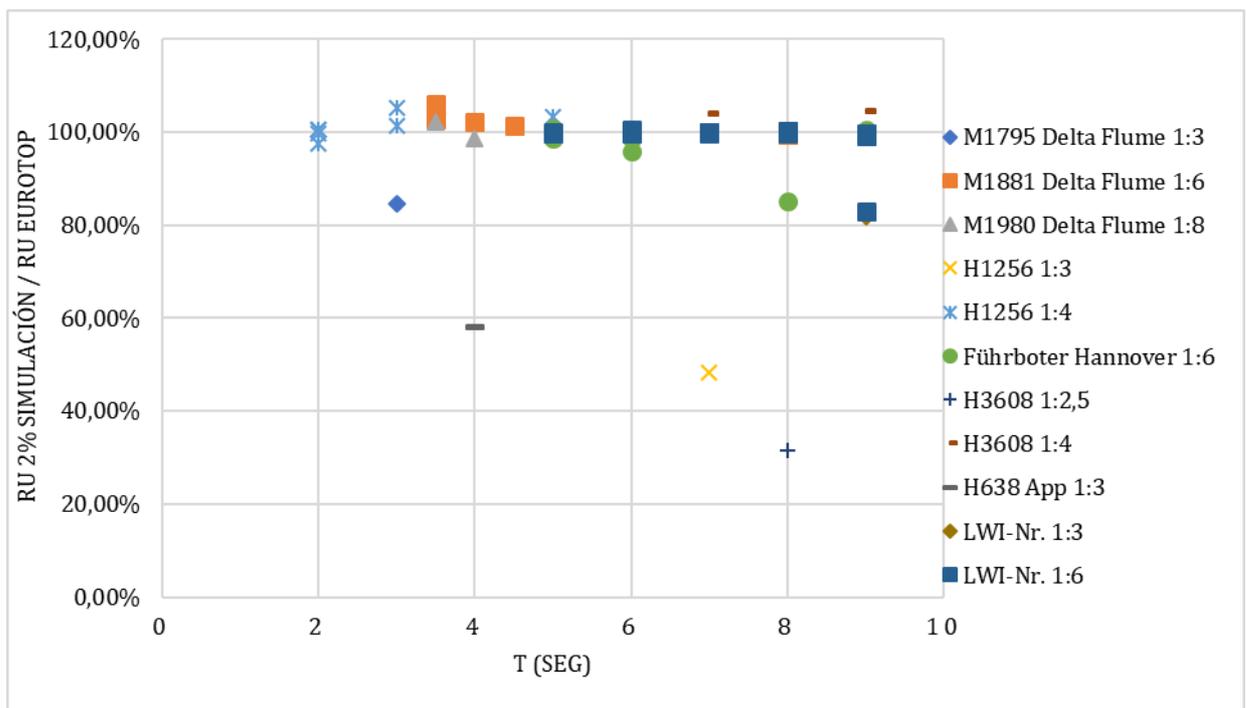


Figura 64. Gráfica con los porcentajes de similitud de todas las simulaciones realizadas con CELERIS.

## VALIDACIÓN 2: INFLUENCIA DEL OLEAJE OBLICUO

En este apartado se estudia la influencia que ejerce la oblicuidad del oleaje sobre el resultado de run-up. Para ello, se genera un tanque numérico de oleaje con la suficiente anchura para que el oleaje se desarrolle completamente y se comprobará que se cumple la gráfica de la Figura 63. A continuación, se adjunta de nuevo para una mayor facilidad de visualización.

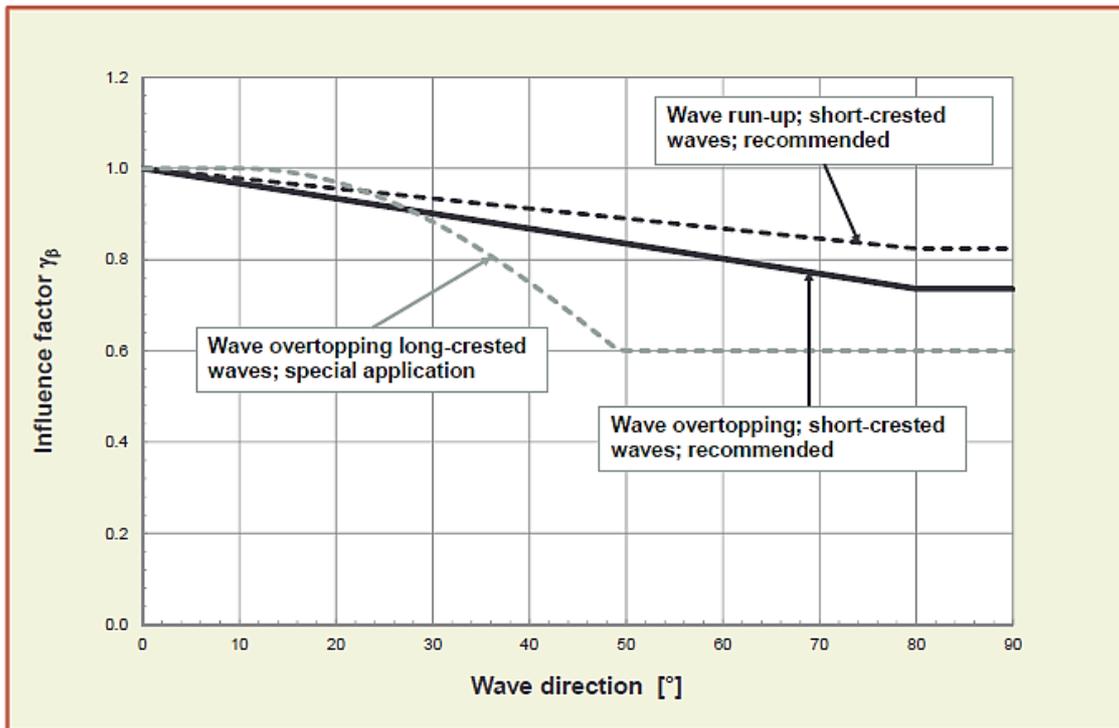


Figura 63. Gráfica de la influencia de la oblicuidad del oleaje sobre el run up.

Para la comprobación se va a emplear el estudio M1881 Delta Flume 1:6, debido a los buenos resultados que este caso presentó. Por lo tanto, se han cogido las características geométricas y de rugosidad, pero aumentando el ancho del canal.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS		
<b>Ancho</b>	690	m
<b>Largo</b>	230	m
<b>Profundidad</b>	7	m
<b>Comienzo perfil</b>	188,00	m

Tabla 150. Características geométricas del experimento M1881 Delta Flume 1:6 con el ancho modificado para la Validación 2.

Antes de mostrar los resultados de las distintas simulaciones considerando oleaje oblicuo, se muestran 6 capturas de pantalla en distintos momentos de una simulación agrupadas en la Figura 64.

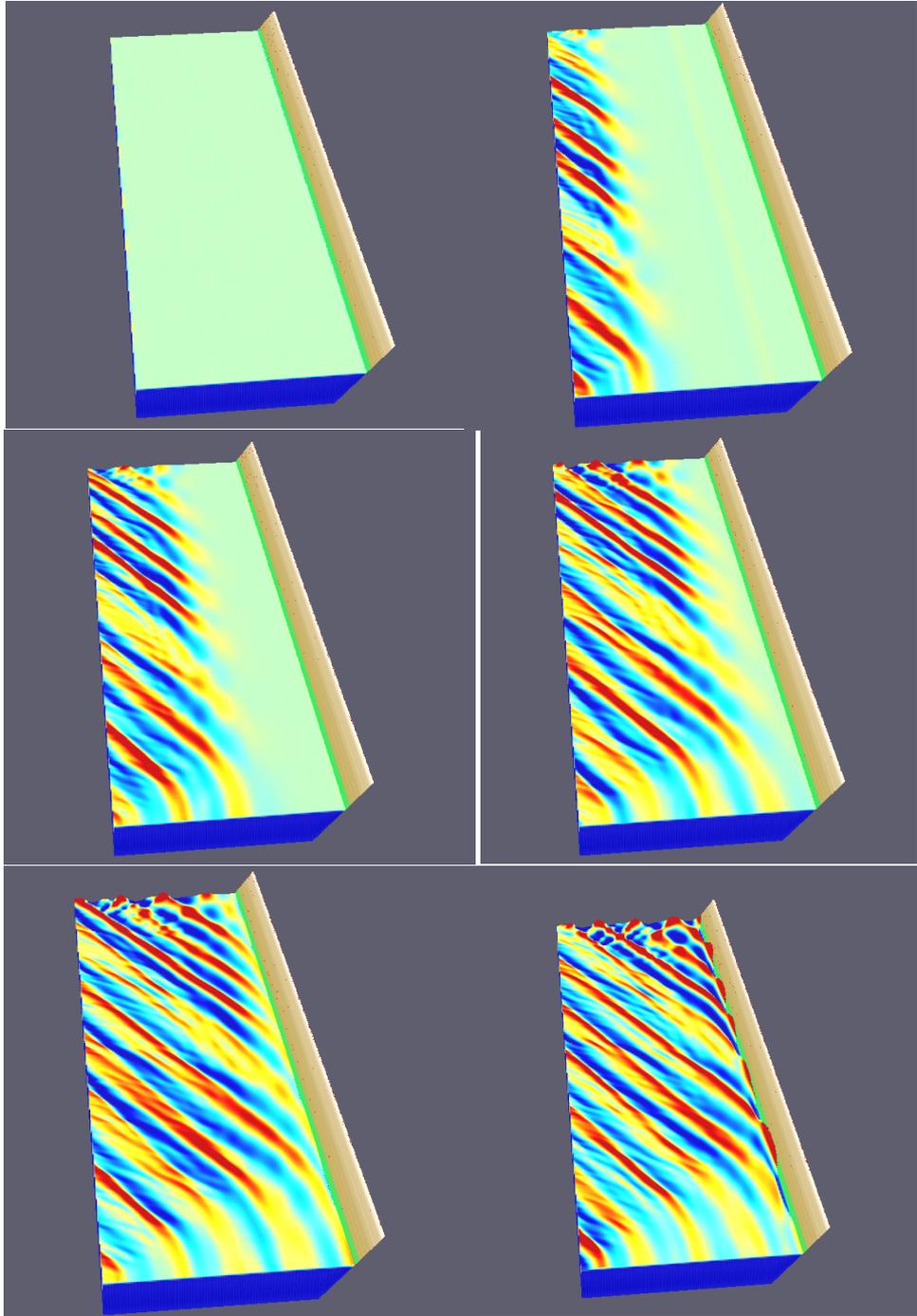


Figura 64. Capturas de pantalla de distintos momentos de la simulación con CELERIS Advent.

PRIMER CASO:

T = 8 seg; h = 4,5 m y H = 0,60317

$\theta$ (°)	Ru (m) Eurotop	Ru (m) simulación
0	1,3867	1,3867
10	1,3439	1,3427
20	1,3151	1,3050
30	1,2817	1,2776
40	1,2530	1,2505
50	1,2196	1,2056
60	1,1862	1,1580
70	1,1573	1,1138
80	1,1333	1,0859
90	1,1328	1,0302

Tabla 151. Resultados de las simulaciones con oleaje oblicuo.

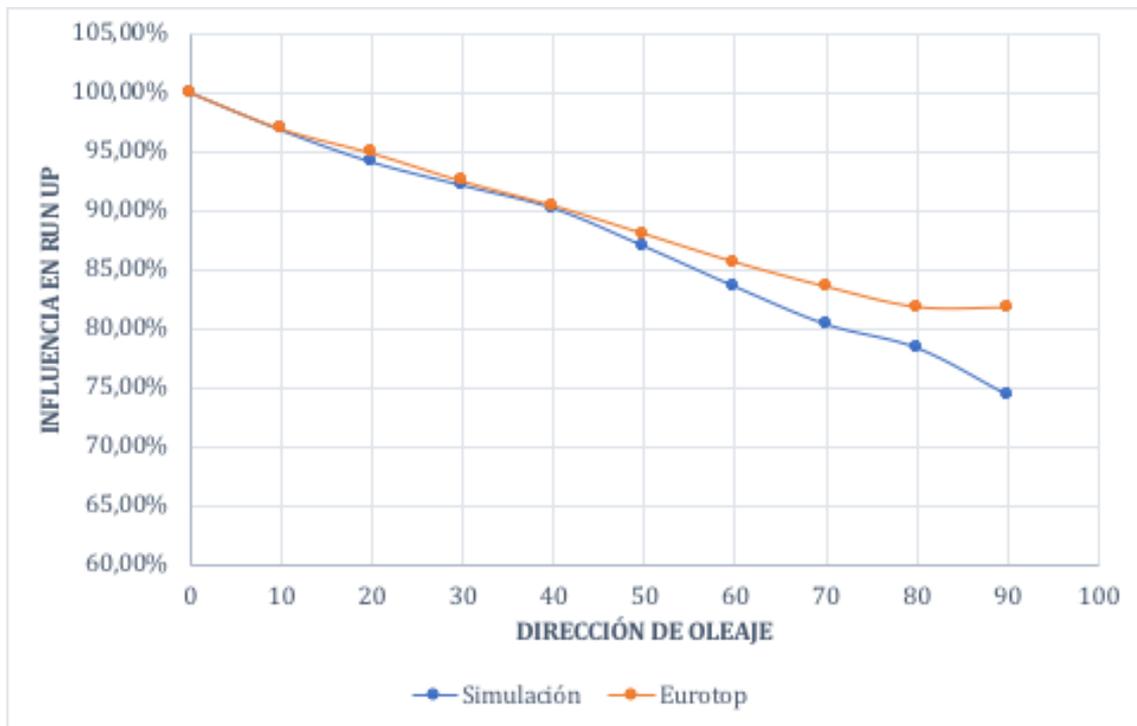


Figura 65. Gráfico con los resultados de las simulaciones y los calculados con EurOtop.

**SEGUNDO CASO:**

T = 8 seg; h = 4,5 m y H = 0,86094

$\theta$ (°)	Ru (m) Eurotop	Ru (m) simulación
0	1,7600	1,7600
10	1,7056	1,7042
20	1,6692	1,6560
30	1,6268	1,6162
40	1,5903	1,5696
50	1,5479	1,5301
60	1,5055	1,4751
70	1,4689	1,4224
80	1,4384	1,3783
90	1,4377	1,3251

Tabla 152. Resultados de las simulaciones con oleaje oblicuo.

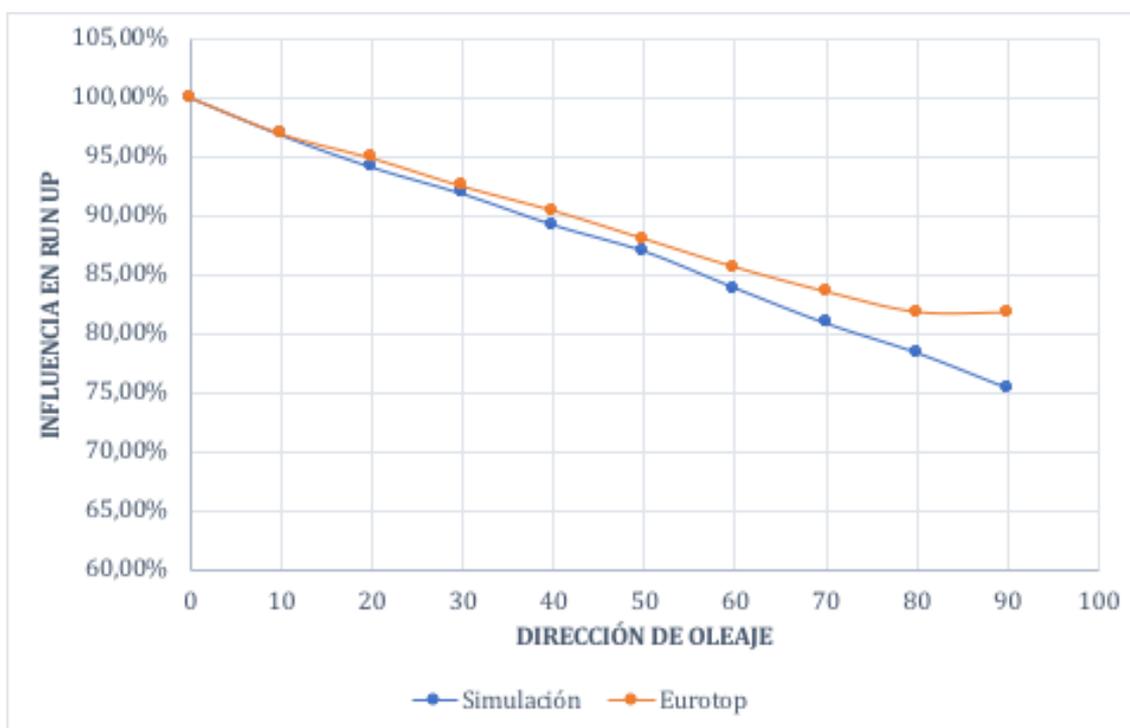


Figura 66. Gráfico con los resultados de las simulaciones y los calculados con EurOtop.

Con objeto de comprobar otras pendientes, se utiliza también el estudio Delta Flume con pendiente 1:8, y así sacar conclusiones de este apartado.

PRIMER CASO:

T = 3,5 seg; h = 4,5 m y H = 0,86235

$\theta$ (°)	Ru (m) Eurotop	Ru (m) simulación
0	0,8772	0,8772
10	0,8501	0,8494
20	0,8319	0,8246
30	0,8108	0,8055
40	0,7926	0,7818
50	0,7715	0,7574
60	0,7504	0,7325
70	0,7321	0,6958
80	0,7169	0,6782
90	0,7166	0,6360

Tabla 153. Resultados de las simulaciones con oleaje oblicuo.

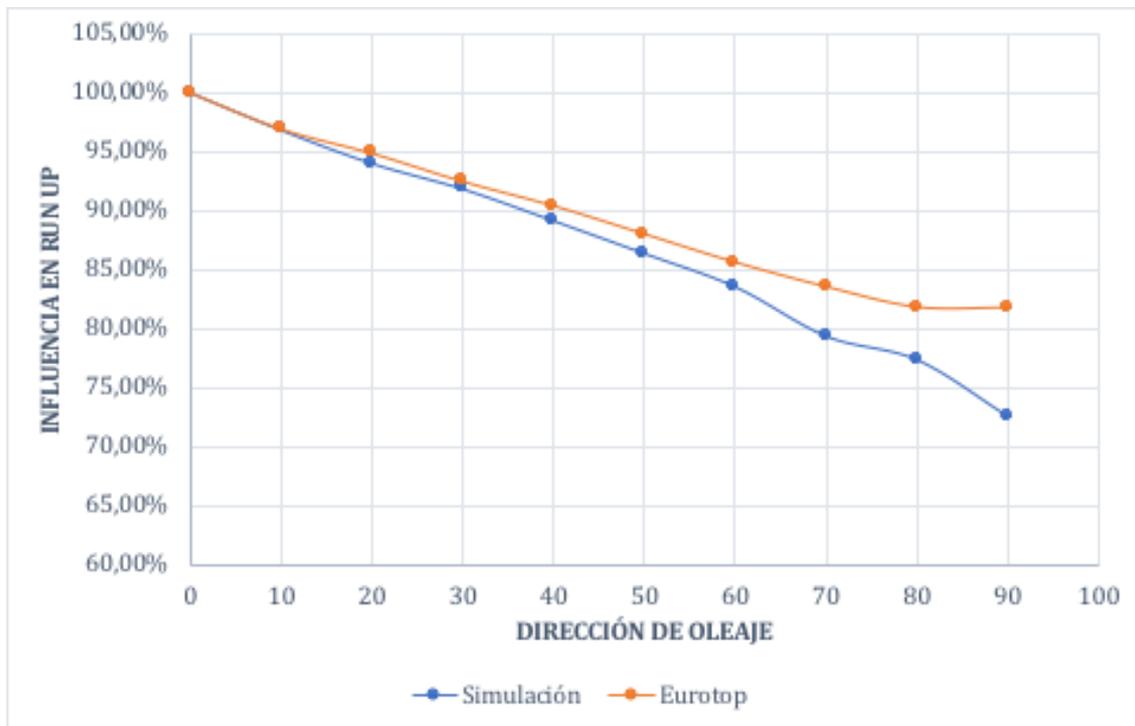


Figura 67. Gráfico con los resultados de las simulaciones y los calculados con EurOtop.

**SEGUNDO CASO:**

T = 5 seg; h = 4,5 m y H = 1,0556

$\theta$ (°)	Ru (m) Eurotop	Ru (m) simulación
0	1,0604	1,0604
10	1,0276	1,0268
20	1,0057	0,9968
30	0,9801	0,9738
40	0,9582	0,9450
50	0,9326	0,9155
60	0,9071	0,8898
70	0,8850	0,8517
80	0,8667	0,8198
90	0,8662	0,7900

Tabla 154. Resultados de las simulaciones con oleaje oblicuo.

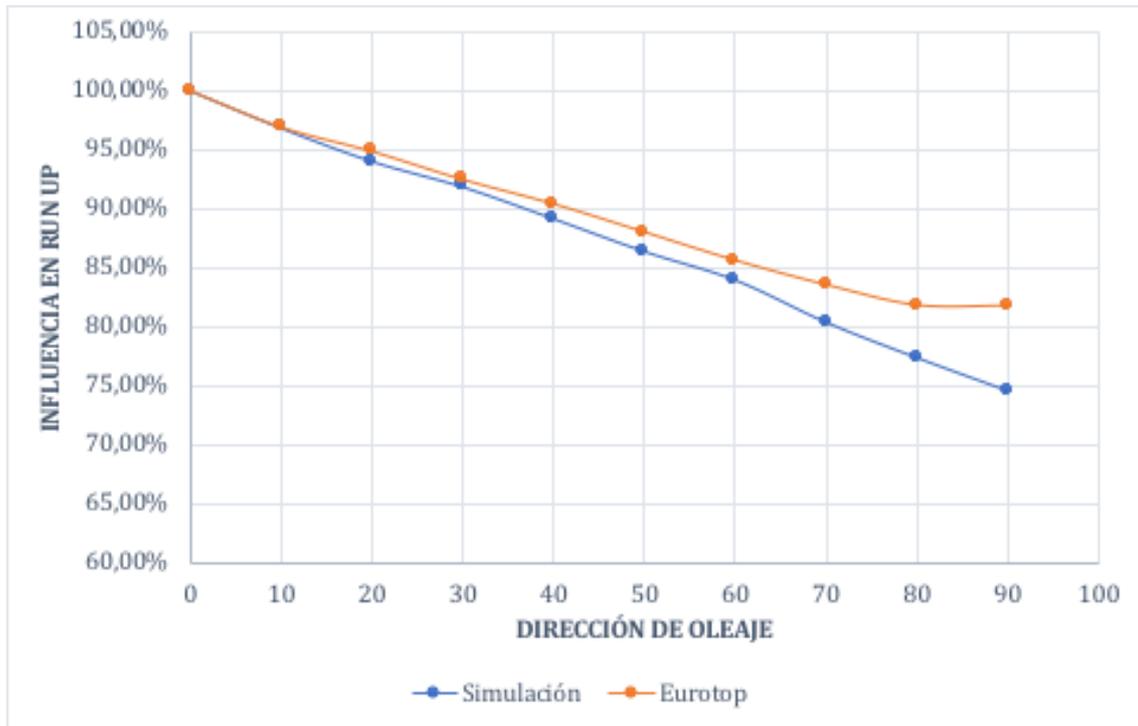


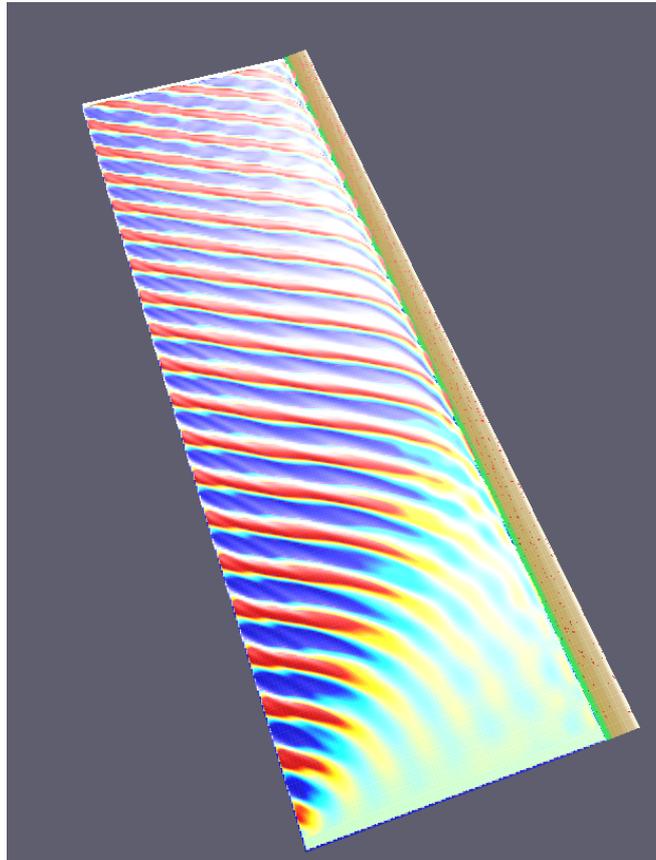
Figura 68. Gráfico con los resultados de las simulaciones y los calculados con EurOtop.

Analizando los gráficos, se puede confirmar que CELERIS Advent da buenos resultados con oleaje oblicuo. Para oleaje con dirección superior a 60 grados

empieza a dar valores inferiores, en torno a un cinco por ciento, a los que se calculan mediante las fórmulas del manual EurOtop.

Esta disminución del run-up respecto del que predice la gráfica del EurOtop puede deberse a que en esas direcciones hay parte del canal al que no llega oleaje, se encuentra a la sombra. Por lo tanto, se pierde zona efectiva para la medición del run-up.

La Figura 69 muestra cómo incide el oleaje con una dirección de 60°.



*Figura 69. Incidencia del Oleaje a 60° sobre el canal*

Por lo tanto, se puede observar en la imagen que en el tercio inferior del dique no se generan los run-up.



### VALIDACIÓN 3: INFLUENCIA DE LA EXISTENCIA DE BERMA

En este apartado se va a estudiar la influencia que ejerce sobre el run-up la existencia de una berma en el talud o berma intermedia. Se compara el resultado que aporta el software CELERIS Advent con el que debería dar según las ecuaciones que establece el manual EurOtop.

La disposición de una berma intermedia se realiza para conseguir una mayor disipación del oleaje porque con la berma se consigue una mayor área de disipación.

Las características de la berma se han calculado siguiendo las directrices que dicta el EurOtop.

Primero se ha establece un valor para el ancho de berma, B. La recomendación es que el ancho de la berma no debe superar la cuarta parte de longitud de la berma.

Después se ha determinado que la berma se encuentra a diferentes alturas por encima y debajo del nivel medio del mar en reposo.

Con estas características, se calcula el valor del coeficiente  $\gamma_b$  que afecta al cálculo del  $Ru_{2\%}$ , adopta valores inferiores a la unidad y se calcula de la siguiente forma:

$$\gamma_b = 1 - r_B(1 - r_{db})$$

La primera parte ( $r_B$ ) representa la influencia del ancho de la berma  $L_{Berm}$  y es nulo si no hay berma.

$$r_B = \frac{B}{L_{Berm}}$$

Longitud de la berma se ha calculado tal y como indica la Figura 6.; proyectando el valor de  $H_{m0}$  en ambos lados de B con base en el talud de la estructura.

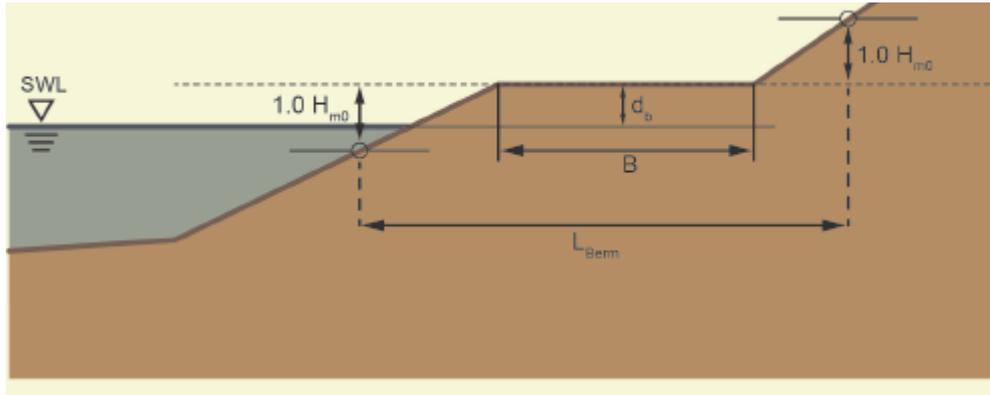


Figura 70. Gráfico para el cálculo de  $L_{Berm}$ .

La segunda parte ( $r_{db}$ ) representa la diferencia vertical  $d_b$  entre el nivel medio del mar en reposo (SWL) y el centro de la berma y es nulo si la berma se encuentra en el nivel medio del mar en reposo. Se calcula de distinta forma si la berma se encuentra sobre o bajo el nivel medio del mar en reposo.

$$r_{db} = 0,5 - 0,5 \cos\left(\pi \frac{d_b}{R_{u2\%}}\right); \text{ si la berma se encuentra sobre SWL}$$

$$r_{db} = 0,5 - 0,5 \cos\left(\pi \frac{d_b}{2 \cdot H_{m0}}\right); \text{ si la berma se encuentra bajo SWL}$$

Donde:

- $d_b$ : distancia vertical entre el nivel medio del mar en reposo y la posición de la berma.
- $R_{u2\%}$ : run-up del 2%.
- $H_{m0}$ : altura de oleaje.

La reducción del run-up es máxima para una berma situada a la altura del nivel medio del mar en reposo y disminuye al aumentar la  $d_b$ . Por lo tanto, una berma situada en la SWL es más efectiva. Una berma que se encuentra por debajo de  $2H_{m0}$  o por encima de  $R_{u2\%}$  no tiene influencia sobre el avance de la onda y el sobregiro de la onda.

Antes de comenzar a mostrar los resultados, se van a visualizar 6 capturas de pantalla en distintos momentos de la simulación agrupadas en la Figura 71.

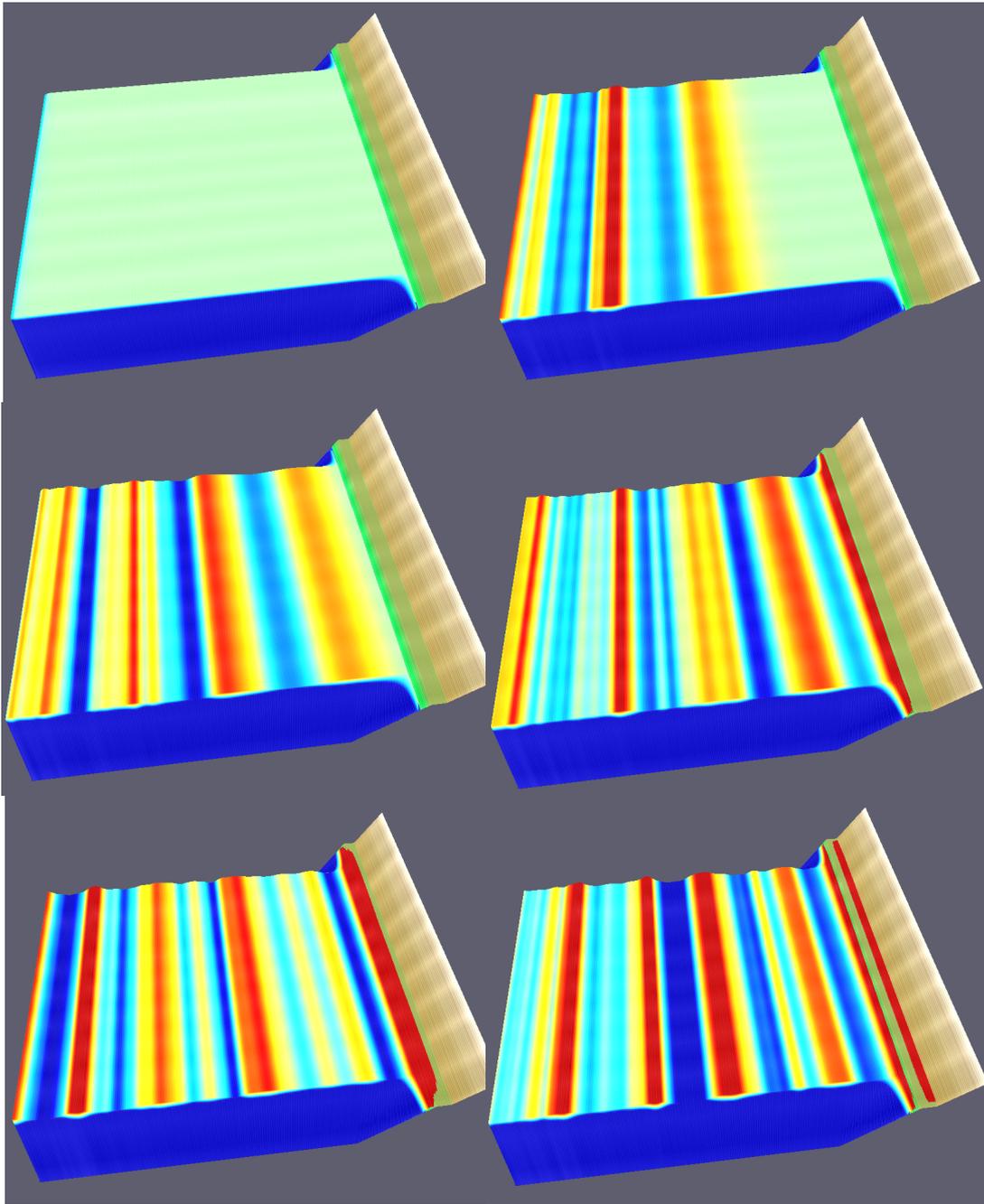


Figura 71. Capturas de pantalla de distintos momentos de la simulación con CELERIS Advent.

A continuación, para una de las simulaciones del experimento Delta Flume 1:6, se van a probar distintas anchos y alturas de berma sobre y bajo el nivel medio del mar en reposo para verificar que se cumple lo establecido en el EurOtop.

En la tabla 155, se definen las condiciones de oleaje, así como el resultado de run-up, de dicha simulación para comenzar con la tercera validación.

CONDICIONES INICIALES		
$H_{m0}$	T (seg)	$Ru_{2\%}$
0,60317	8	1,3158

Tabla 155. Condiciones iniciales de la simulación.

B = 2,5 m

Se prueba como ancho de berma, B = 2,5 m, lo cual supone una longitud de la berma de 9,74 metros.

db	$R_b$	$r_{db}$	$\gamma_b$	Ru Eurotop	Ru simulación	%
0,8	0,2567	0,6664	0,9144	1,2031	1,2873	107,00%
0,6	0,2567	0,4311	0,8539	1,1236	1,1934	106,21%
0,4	0,2567	0,2112	0,7975	1,0493	1,1502	109,61%
0,2	0,2567	0,0559	0,7576	0,9969	1,0633	106,66%
0	0,2567	0,0000	0,7433	0,9780	1,0066	102,92%
-0,2	0,2567	0,0663	0,7603	1,0004	1,0946	109,42%
-0,4	0,2567	0,2476	0,8068	1,0616	1,1369	107,09%
-0,6	0,2567	0,4959	0,8706	1,1455	1,2122	105,82%
-0,8	0,2567	0,7452	0,9346	1,2297	1,2976	105,52%

Tabla 156. Resultados de las simulaciones con berma intermedia.

Realizados los cálculos en la tabla anterior se muestran las siguientes gráficas para poder interpretar con mayor claridad los resultados obtenidos, y para compararlos con los que debería dar según el manual del Eurotop.

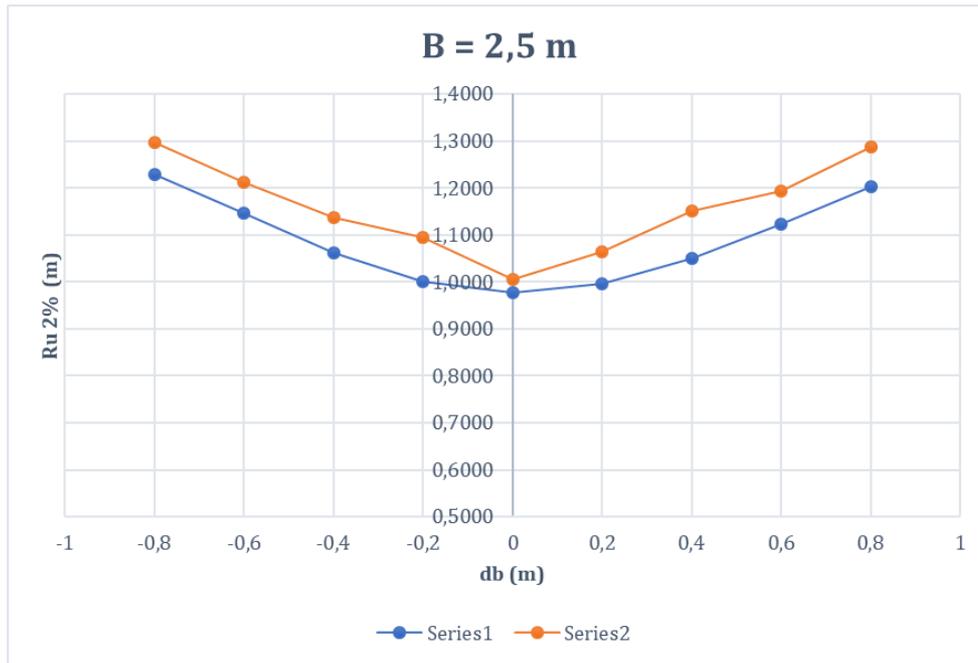


Figura 72. Comparación de Resultados del EurOtop con las simulaciones.

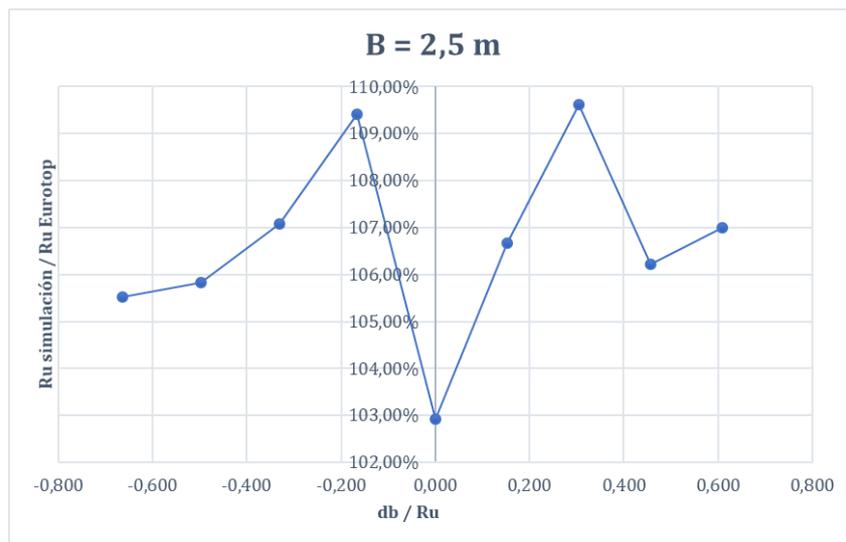


Figura 73. Porcentaje de similitud entre EurOtop y las simulaciones.

Las gráficas anteriores muestran que en cada uno de los casos las simulaciones de CELERIS Advent aportan mayores valores de run-up de los que se calcularían mediante las fórmulas que establece el manual EurOtop, esa superioridad se encuentra entre un 3 y un 10 por ciento.

B = 5 m

Con un ancho de berma de 5 metros, la longitud de la berma, proyectando el valor de  $H_{m0}$  en ambos lados de B con base en el talud de la estructura queda 12,24 metros.

db	$R_b$	$r_{db}$	$\gamma_b$	Ru Eurotop	Ru simulación	%
0,8	0,4086	0,6664	0,8637	1,1365	1,1792	103,76%
0,6	0,4086	0,4311	0,7676	1,0100	1,1278	111,67%
0,4	0,4086	0,2112	0,6777	0,8918	1,0277	115,24%
0,2	0,4086	0,0559	0,6143	0,8083	0,8853	109,53%
0	0,4086	0,0000	0,5914	0,7782	0,8446	108,53%
-0,2	0,4086	0,0663	0,6185	0,8139	0,9079	111,56%
-0,4	0,4086	0,2476	0,6926	0,9113	1,0733	117,77%
-0,6	0,4086	0,4959	0,7940	1,0448	1,1102	106,26%
-0,8	0,4086	0,7452	0,8959	1,1788	1,2945	109,81%

Tabla 157. Resultados de las simulaciones con berma intermedia.

Realizados los cálculos en la tabla anterior se muestran las siguientes gráficas al igual que en el caso anterior.

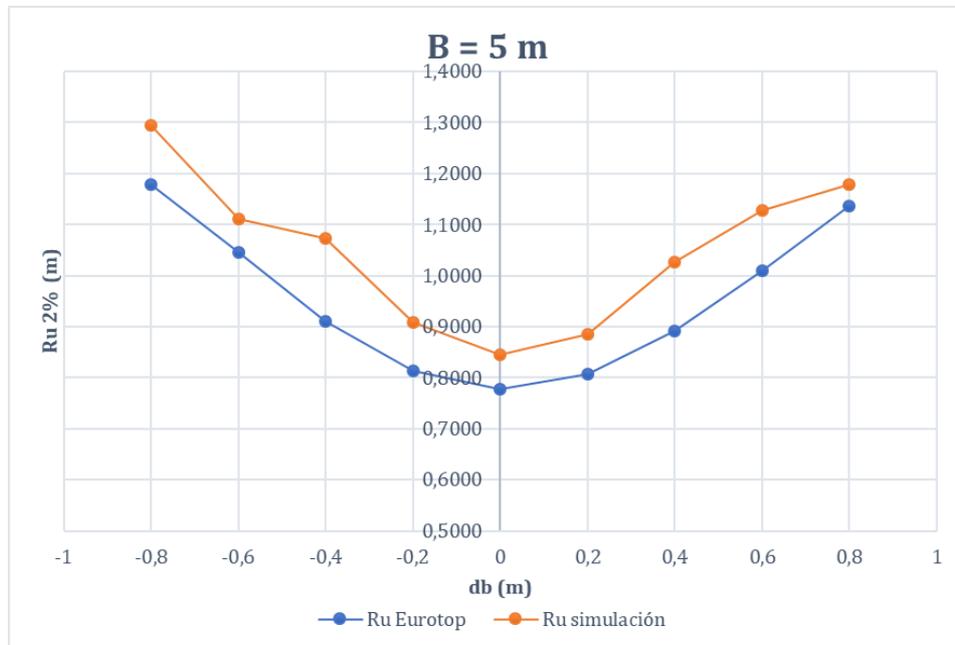


Figura 74. Comparación de Resultados del EurOtop con las simulaciones.

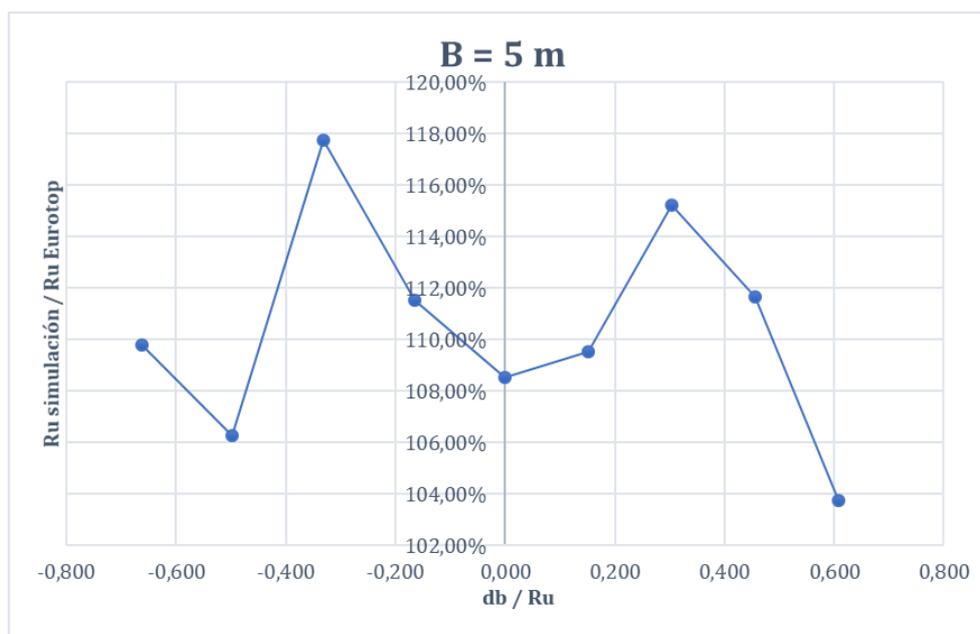


Figura 75. Porcentaje de similitud entre EurOtop y las simulaciones.

Las gráficas anteriores muestran que, al igual que en el caso anterior, las simulaciones de CELERIS Advent aportan mayores valores de run-up de los que se calcularían mediante las fórmulas que establece el manual Eurotop, esa superioridad se encuentra entre un 5 y un 20 por ciento.

**B = 7,5 m**

Se prueba otro ancho de berma, B = 7,5 m, lo cual supone una longitud de la berma de 14,74 metros.

<b>db</b>	<b>R<sub>b</sub></b>	<b>r<sub>db</sub></b>	<b>γ<sub>b</sub></b>	<b>Ru Eurotop</b>	<b>Ru simulación</b>	<b>%</b>
0,8	0,608	0,5089	0,6664	0,8302	1,0924	1,1492
0,6	0,456	0,5089	0,4311	0,7105	0,9349	1,1178
0,4	0,304	0,5089	0,2112	0,5986	0,7876	0,9934
0,2	0,152	0,5089	0,0559	0,5196	0,6837	0,8367
0	0,000	0,5089	0,0000	0,4911	0,6462	0,7937
-0,2	-0,166	0,5089	0,0663	0,5249	0,6906	0,8502
-0,4	-0,332	0,5089	0,2476	0,6171	0,8120	0,9631
-0,6	-0,497	0,5089	0,4959	0,7435	0,9782	1,037
-0,8	-0,663	0,5089	0,7452	0,8703	1,1452	1,1601

Tabla 158. Resultados de las simulaciones con berma intermedia.

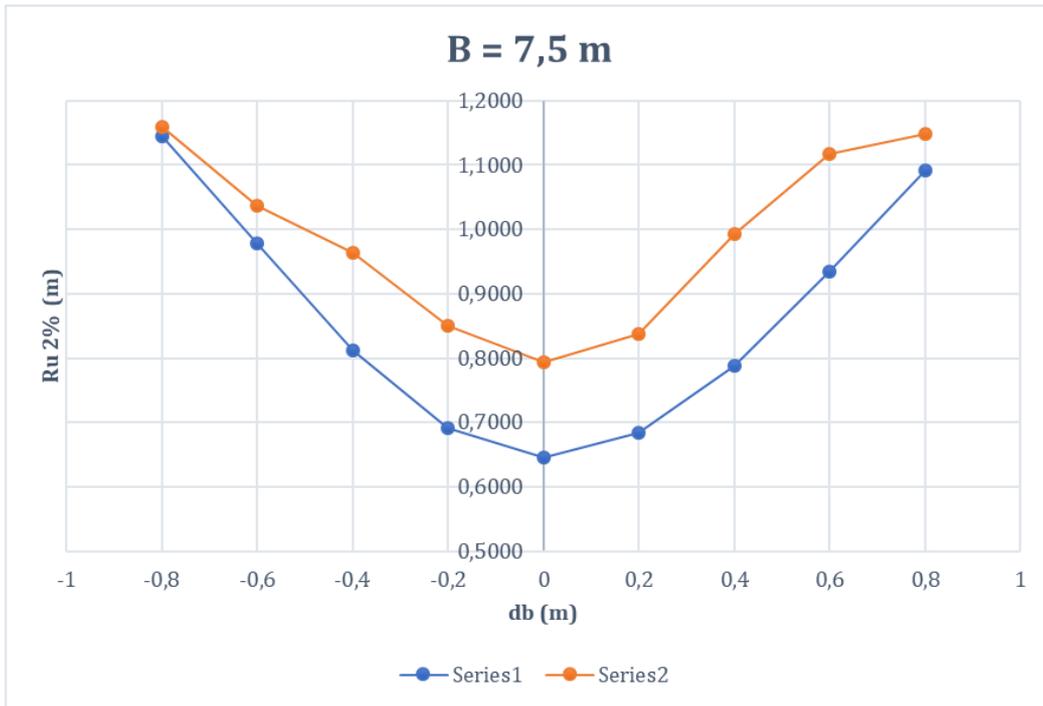


Figura 76. Comparación de Resultados del EurOtop con las simulaciones.

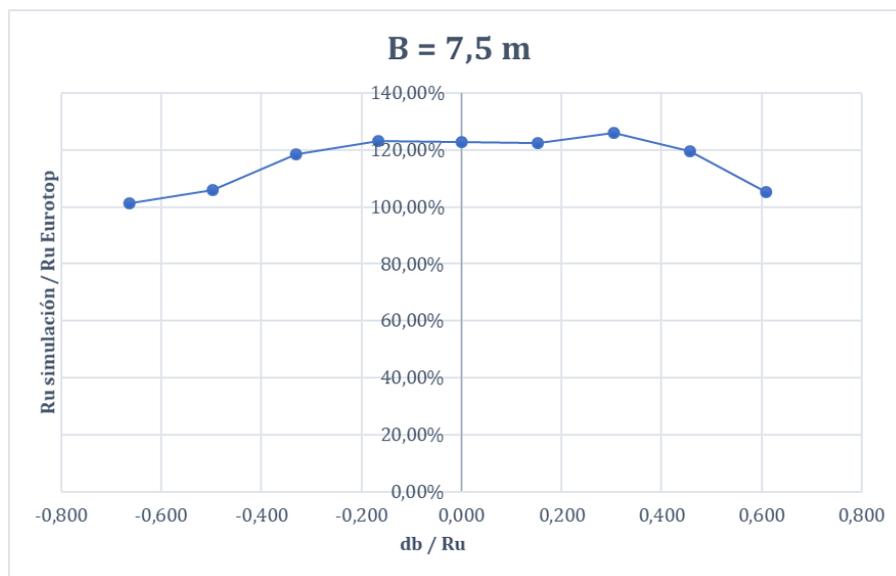


Figura 77. Porcentaje de similitud entre EurOtop y las simulaciones.

La situación es la misma que en los casos anteriores, las simulaciones presentan resultados superiores, y esa superioridad está en torno a un 20 por ciento.

Se puede decir que cuando existe berma intermedia en el talud, el software CELERIS Advent asemeja bien el fenómeno, pero repite un déficit en el resultado. Esto puede significar que, como la berma intermedia se emplea para una mayor disipación, la disipación en el modelo Boussinesq es menor.



Para comprobarlo, se va a coger una de las anteriores simulaciones y se le va a aumentar el coeficiente de fricción.

<b>B = 5 m db = 0,4 m Ru<sub>EurOtop</sub> = 0,8918 m</b>	
<b>N (coeficiente de fricción)</b>	<b>Ru<sub>2%</sub> simulación</b>
0,006	1,0277
0,009	0,9397
0,012	0,9003

Tabla 159. Resultados de las simulaciones con cambios en la fricción.

Los resultados mostrados en la tabla 159 demuestran que en el caso de existencia de berma intermedia si se aumenta el coeficiente de fricción se puede llegar al run-up establecido por el EurOtop.

## CONCLUSIONES GENERALES

Después de haber realizado cada una de las simulaciones en CELERIS Advent, y a la vista de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes observaciones.

### Influencia de la pendiente en el talud para incidencia normal.

En los primeros casos en los que el objetivo era obtener el coeficiente de fricción empleado en los distintos ensayos físicos, se han realizado los ensayos agrupándolos por estudio realizado y pendiente del mismo. El modelo numérico Boussinesq asemeja bien el fenómeno y se han obtenido buenos resultados para pendientes inferiores a 1:4, con ella inclusive.

En aquellos casos con pendientes superiores a dicho valor, en todo momento se han obtenido resultados infravalorados de run-up en las fases iniciales, es decir, sin haber podido establecer un valor en el coeficiente de fricción. Por ello se ha supuesto que, en esos casos, por la pendiente que supone el software empleado subestima el valor de run-up.

Se recomienda el empleo del modelo numérico de Boussinesq para las simulaciones de casos reales exceptuando aquellos casos que presenten pendientes superiores o iguales a 1:3.

### Influencia del oleaje oblicuo

En la parte en la que se estudia la influencia del oleaje oblicuo, como ya se ha dicho anteriormente, el software simula bien la influencia de la oblicuidad, siempre y cuando cumple los requisitos de la primera validación. Cuando la oblicuidad supera los 60 grados centígrados los resultados difieren de los propuestos por el manual EurOtop

Se ha supuesto que esa inferioridad en el resultado se debe a la pérdida de zona efectiva para la medición del run up.

Se recomienda el empleo del modelo numérico de Boussinesq en aquellos casos con pendiente inferior a 1:3, y una oblicuidad inferior a 60 grados centígrados.

### Influencia de la existencia de berma

Por último, se ha estudiado la influencia que ejerce la existencia de una berma en el talud sobre el resultado de run-up.

Se han comparado los resultados que dan las fórmulas para el cálculo de run-up según el manual EurOtop con los valores que aportan las simulaciones de CELERIS Advent. En todos los casos, el software ha sobrestimado el valor de run-up. Y esa superioridad ha estado entre un 10 y un 20 por ciento.

La superioridad del resultado puede deberse a que el software subestima la disipación que ejerce el talud sobre el oleaje.

Se ha propuesto aumentar el coeficiente de fricción hasta llegar al valor esperado, y se ha conseguido.

Por lo tanto, se recomienda el empleo del modelo numérico de Boussinesq cuando exista berma intermedia y la pendiente del talud sea inferior a 1:3.

### Estudios Futuros

En vistas a mejorar la precisión en la simulación de casos reales mediante el modelo numérico de Boussinesq, se propone:

- Estudiar de qué manera se puede mejorar la simulación del run-up de los experimentos con pendiente superior a 1:3.
- Realizar más estudios sobre el oleaje con oblicuidad superior a 60 grados centígrados, que consistan, por ejemplo, en aumentar el ancho del tanque de simulación.
- Y, por último, analizar la propuesta de aumentar el coeficiente de fricción en aquellos experimentos que dispongan de berma intermedia.

## ANEXO 1

Se adjunta copia del código que evalúa el resultado de run-up:

```
clear all
close all
clc

%%
Dt=0.005; % OJO coherente con el fichero CML
timestep=200; % OJO coherente con el fichero CML

t=timestep*Dt; % cada cuanto se graba el mapa
Dx=1.0;
Dy=Dx;

%%

%A=load('parche.txt');
copyfile('parche.txt','temp.txt')
A=load('temp.txt');
delete('temp.txt')
ini=A(1,2); % identifico el inicio del bloque espacial grabado en la
dirección Y
%%s=find(ini==A(:,2)); % identifico la posición donde inicia cada
bloque
dy=diff(A(:,2));
s=find(dy<=-2);
s=[1;s+1];

%% leo el archivo de batimetría, para incluirlo en el mismo gráfico

fid=fopen('C:\Users\Compaq\Documents\MASTER CAMINOS\TRABAJO FIN DE
MASTER\EUROTOP\OO Delta Flume 1_6\DeltaFlume1_6.cbf','r');
k=fgetl(fid);
nxb=str2num(k(5:end));
k=fgetl(fid);
nyb=str2num(k(5:end));
k=fgetl(fid);
k=fgetl(fid);
k=fgetl(fid);
k=fgetl(fid);
k=fgetl(fid);

xb=0:Dx:(nxb-1).*Dx;
xb=xb+Dx;

bat=fscanf(fid,'%f',[nxb,nyb]);
[x0,y0]=meshgrid(0:1:nxb-1,0:1:nyb-1);
%x0=x0.*(30/601);
%y0=y0.*(30/601);

fclose all;
%%
Dt=1; % si pones 1 te dibuja todos los mapas,
clear RES
k=1;
```

```

for i=1:Dt:length(s)-1
    X=A(s(i):s(i+1)-1,1);
    Y=A(s(i):s(i+1)-1,2);
    eta=A(s(i):s(i+1)-1,3); % 3era columna

    ini_x=X(1);
    nx=find(ini_x==X); % identifico la posición donde inicia cada
bloque

    % hago las matrices rectangulares
    xx=(reshape(X,size(Y,1)/size(nx,1),size(nx,1)).*Dx)-Dx;
    yy=(reshape(Y,size(Y,1)/size(nx,1),size(nx,1)).*Dy)-Dy;
    eeta=reshape(eta,size(Y,1)/size(nx,1),size(nx,1));

    %     figure(3)
    %     surf(xx,yy,eeta)
    %     shading interp
    %     pause(0.1)
    %
    %
    n=round(size(xx,2)./2); % a medio canal en y
    xi=xx(2:end,n); % vector donde quiero interpolar el perfil
    etai=eeta(2:end,n);

    nb=round(size(bat,2)./2);
    bati=bat(:,nb);
    %bati2=[bati(1,1);bati(1:end-1)];
    %xi3=x0(nb,:);
    %

    bati2=interp1(xb,bati,xi);
    %plot(xi,bati2,'k-',xi,etai,'b-')

    comp=(etai-bati2);
    s3=[];
    e=0.001;
    u=0.001;
    while isempty(s3)==1
        ss=find(abs(comp)<=u); % OJO, moverlo
        etai(ss)=NaN;

        plot(xi,etai,'b',xb,bati,'k','linewidth',2)
        %hold off
        axis([min(xi) max(xi) -3 5])
        title(['t=',num2str((i-1)*t),' s'])

        s2=isnan(etai);
        s3=find(s2==1);
        u=u+e;
    end
    % etai(s2)=[];
    ds2=diff(s2);
    s3=find(ds2==1);
    if length(s3)>1
        %     'hola'
    end
end

```

```

RES(k,1)=(i-1)*t;
RES(k,2)=etai(s3(end)-0); % si quiero pillar el runup izquierdo
%RES(i,3)=etai(s3(end)+1); % si quiero pillar el runup derecho
k=k+1;
%surf(xx,yy,eeta)
% si quieres incluir la batimetría, si no comenta estas lineas ...
%     hold on
%     surf(x0,y0,bat')
%     shading interp
%     hold off
% ... hasta aquí
%axis equal
%axis([min(X) max(X) min(Y) max(Y) min(bat(:)) 1])

% colorbar
%caxis([-0.01 0.01])
% pause(0.1)
figure(2)
plot(RES(:,1),RES(:,2),'b.-')%,RES(:,1),RES(:,3),'r.-')

end

%%
%Identifico solo los valores positivos y máximos del RU (los picos)
s=find(RES(:,2)<0);
Ru=RES(:,2);
ti=RES(:,1);
Ru(s)=[];
ti(s)=[];

[p,t]=peaks(Ru);

figure(3)
plot(ti,Ru,'b.-',ti(p),Ru(p),'ro')%,RES(:,1),RES(:,3),'r.-')
Ru_i=Ru(p); %solo los picos que corresponden a los Ru's
n_Ru=length(Ru_i); % número de runups
por_2=ceil(0.02.*n_Ru); % 2% del número de Ru's
Ru_orden=sort(Ru_i);
Ru2p=Ru_orden(end-por_2);
disp(['Ru2% = ',num2str(Ru2p),' m'])
title(['Ru2% = ',num2str(Ru2p),' m; number of
runups=',num2str(n_Ru)]);
xlabel('t (s)')
ylabel('Ru (m)')

print(gcf,'-dpng','-r300',['Runup 2%'])

```

## BIBLIOGRAFÍA

EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.

[www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)

J.W. van der Meer & J.P. de Waal. *Influence of oblique wave attack and short-crested waves on wave run-up and wave overtopping* (in Dutch; original title: Invloed van scheve golfinval en richtingspreiding op golfoploop en overslag). WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 638, November 1990.

J.W. van der Meer & J.P. de Waal. *Water movement on slopes. Influence of berm, roughness, shallow foreshore and oblique long- and short-crested wave attack*. (in Dutch; original title: Waterbeweging op taluds. Invloed van berm, ruwheid, ondiep voorland en scheve Langen kortkammige golfaanval). WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 1256, April 1993.

Oumeraci, H., Möller, J., Kübler, S., Zimmermann, C., Daemrich, K. F. & Ohle, N. 2002 *Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenauflauf*. LWI-Report No. 880.

Tavakkol, S., Lynett, P.. Celeris Advent, User's Manual.

Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. *Wave runup on smooth and rock slopes*. ASCE, Journal of WPC and OE, Vol. 188, No. 5, pp. 534-550, New York. Also Delft Hydraulics Publication No. 454. 1992.

Van Gent, M. R. A.. *Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores: 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra.* Rep. H3608, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 1999

Van der Meer Consulting B.V. COASTAL ENGINEERING CONSULTANCY & RESEARCH. <http://www.vandermeerconsulting.nl>



# MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

## CONFORMIDAD A LA DEFENSA DEL TFM

<b>Nombre y Apellidos:</b>	GEMA PÉREZ GONZÁLEZ		
<b>D.N.I.:</b>	54062832K		
<b>Título del TFM:</b>	PREDICCIÓN DEL REMONTE DEL OLEAJE (RU2%) EN DIQUES EN TALUD CON UN MODELO DE BOUSSINESQ		
<b>Título del TFM en inglés</b>	PREDICTION OF RUN-UP (RU2%) IN SLOPES WITH A BOUSSINESQ NUMERICAL MODEL		
<b>Área de conocimiento:</b>	INGENIERÍA DE COSTAS		
<b>Director/es:</b>	GABRIEL DÍAZ HERNÁNDEZ		
<b>Convocatoria</b>	Febrero	<b>Año</b>	2018
<b>Idioma de defensa</b>	Español		

### Comentarios de los directores sobre el desarrollo del TFM:

Estructura y presentación del documento	<input checked="" type="checkbox"/> MUY BIEN	<input type="checkbox"/> BIEN	<input type="checkbox"/> REGULAR	<input type="checkbox"/> MAL
Desarrollo teórico-práctico del documento	<input checked="" type="checkbox"/> MUY BIEN	<input type="checkbox"/> BIEN	<input type="checkbox"/> REGULAR	<input type="checkbox"/> MAL
Proceso de realización del trabajo	<input type="checkbox"/> MUY BIEN	<input checked="" type="checkbox"/> BIEN	<input type="checkbox"/> REGULAR	<input type="checkbox"/> MAL
Otros comentarios	La alumna ha terminado con éxito su estudio y la redacción del TFM, por lo tanto se encuentra capacitada para realizar su presentación y defensa ante tribunal.			

LA DIRECCIÓN Y LA COMISIÓN DE TFM DAN SU CONFORMIDAD A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER ARRIBA MENCIONADO, PARA QUE SEA DEFENDIDO ANTE EL TRIBUNAL CORRESPONDIENTE.

DIRECTOR/ES Gabriel Díaz Hernández 	COMISIÓN TFM
FECHA Y FIRMA 22/02/2018	FECHA Y FIRMA

# Prediction of run-up $Ru_{2\%}$ in slopes with a Boussinesq numerical model.

Gema Pérez González

Director: Gabriel Díaz Hernández

## Abstract

The adequate understanding of the overflow of the waves on the coastal and port structures is a key requirement for the efficient design of coastal defences. The natural phenomena associated with storm surges can cause considerable economic damage, the stoppage in the use of this structure, and even the possible loss of human lives, must be properly quantified.

At present, the traditional way of predicting and quantifying the average flow of overflow on any structural type on the coast is done following the EurOtop manual. This publication deals with two phenomena to be considered in the functional design of the structures: the phenomenon of run-up or ascent of the waves and the overflow of this, also known as overtopping.

The first one is defined as the distance of ascent of the sea on the beach slope, measured vertically from the still water line, and the second as the transport of a quantity of water on the coronation of a structure.

The phenomenon on which this end-of-master project is focused is that of run-up or ascent. The manual establishes semi-empirical equations that in turn take into account certain variables related to coastal structures (rugosity of the wall, existence of berm in the profile ...) and wave conditions (wave height, period, wave obliquity ...).

These equations are based on numerous studies carried out through laboratory tests representing the behavior of the waves, and measuring the interaction with the simulated coastal structures.

The present master's degree project explores the possibility of predicting the phenomenon of run-up on structures in slope of loose materials based on the use of a numerical model of wave propagation based on non-linear and transient Boussinesq equations.

Therefore, it is proposed to know and quantify the capabilities of this type of numerical tool in the prediction of this functional variable associated with the interaction of waves with this type of structure.

## Keywords

Eurotop --- Run up --- Virtual simulation --- Channel --- Roughness --- Berm --- Irregular waves --- Oblique waves --- Boussinesq

## Objectives

The validation of the Boussinesq numerical model seeks to compare values of run-up provided by numerical model with those offered by the EurOtop Manual, in three aspects:

- Getting run-up considering the geometrical conditions, irregular waves and roughness of each one of the studies that appear in the EurOtop Manual.
- Studying the influence exerted by the oblique waves on run-up, considering the roughness already studied in the previous section.
- Analysing the change in run-up result when there is a berm on the slope of the channel.

## METHODOLOGY

First, the value of  $Ru_{2\%}$  was quantified based on the laboratory experiments collected in EurOtop manual.

Secondly, each experiment is simulated with the numerical tool, faithfully following its dimensions and conditions of waves and geometry.

Once the simulation has been carried out, the comparison of the values of  $Ru_{2\%}$  obtained from EurOtop with those provided by the simulation is made. This comparison will provide conclusions about the capacity of the model for the prediction of this complex phenomenon.

The second validation that is carried out is to include oblique waves to the simulations. After the execution of different simulations with oblique waves, the comparison with the data derived from the EurOtop formulas is repeated.

Finally, the influence exerted by an intermediate berm on the slope is investigated. For this, the different simulations are carried out and compared with the results of the EurOtop formulas.

### Description of the used Boussinesq model

The software used in the numerical representation of the tests shown in the EurOtop manual is called CELERIS Advent (Sasan Tavakkol et al.). This software solves the extended Boussinesq equations and is accelerated by a graphic processing unit. CELERIS uses a hybrid scheme of finite volume - finite difference to discretize the governing equations.

## Influence of slope

The simulation of an assay using the Celeris Advent software requires several input data such as channel geometry, roughness and wave conditions.

### Channel geometry

Being a simulation of real cases, the geometry is given by the channel that was used in each of the studies that appear in Figure 1. Therefore, a research work has been done consulting each of

the documents of the EurOtop bibliography that refers to these studies, to find out what geometry those channels would have. In some cases, it has been impossible to access these documents.

### Channel roughness

The roughness of the channel is a parameter that will serve as an adjustment of the results of the virtual test. First, the virtual test has been carried out using a null rugosity testing different wave conditions until obtaining a run up that is sufficiently superior to the one that the test should give. Subsequently, a roughness is defined in the channel so that the result of Run up is as expected.

### Wave conditions

The swell that is used is an irregular swell and it insides normal to the slope of the channel.

The water depth of the channel, wave height and period of the same is established.

While the simulation is running, the data of the ascent and descent of the wave generated on the slope are recorded in a txt file. This txt file will be analysed to obtain the run up of 2%.

## Influence of Oblique waves

The influence exerted by the obliquity of the waves on run-up result has been studied simulating a wave tank with sufficient width so that the oblique waves develop completely. Some of the studies in the previous section are used because roughness conditions and run up are known.

As established by EurOtop in its guidelines, the influence exerted by the oblique wave on the value of run-up, results in a decrease in it. The main objective of this section is to verify if using the numerical tool of Boussinesq the results of the EurOtop are obtained and what limitations it presents.

## Influence of the existence of berm

In this section we study the influence exerted on the run-up by the existence of a berm on the slope or intermediate berm. The result of the CELERIS Advent software is compared with the result that

should be given according to the equations established in the EurOtop manual.

The arrangement of an intermediate berm is made to achieve a greater dissipation of the waves. The characteristics of the berm have been calculated following the guidelines dictated by Eurotop.

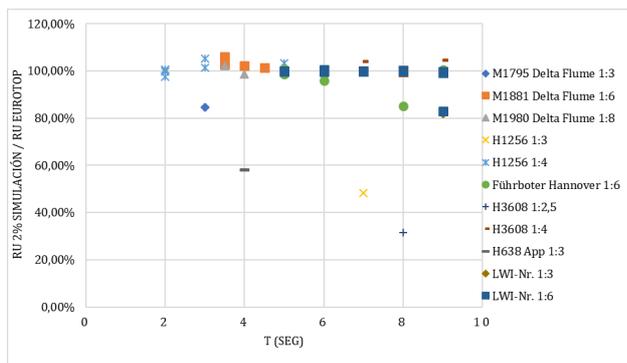
### Results

After having performed each of the simulations in CELERIS Advent, the following results have been obtained.

#### Influence of slope

In the first cases in which the objective was to obtain the coefficient of friction used in the different physical tests, the tests have been carried out by grouping them by study carried out and pending of it. The numerical model Boussinesq resembles the phenomenon well, obtaining good results for slopes lower than 1: 4, with it included.

In those cases, with slopes greater than this value, at all times lower values of run-up have been obtained in the initial phases, that is, without having been able to establish a value in the coefficient of friction. Therefore, it has been assumed that, in those cases, the slope of the software used underestimates the run-up value.

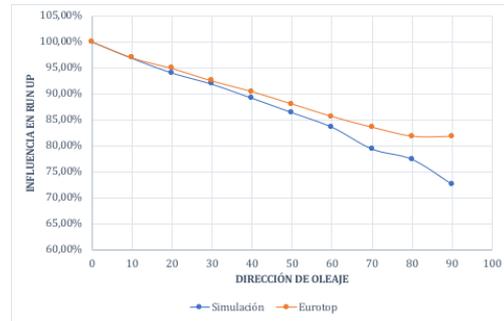


**Figure 1.** Comparison Run up Eurotop vs. CELERIS.

#### Influence of Oblique Waves

In the part where the influence of the oblique wave is studied, as it has been said previously, the software simulates the influence of obliquity well, as long as it meets the requirements of the first validation. When the obliquity exceeds 60 degrees Celsius the results differ from those proposed by the EurOtop manual

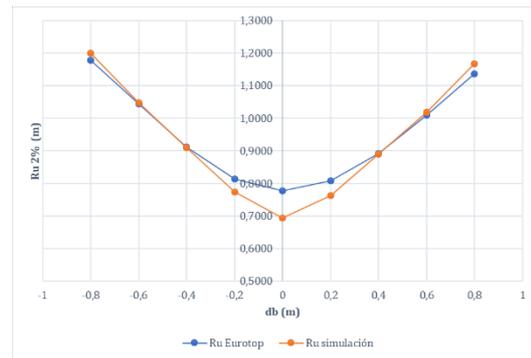
It has been assumed that this inferiority in the result is due to the loss of effective area for the measurement of run-up.



**Figure 2.** Comparison Run up Eurotop vs. CELERIS with oblique waves.

#### Influence of the existence of a berm

Figure 3 shows that for all simulations performed with berm, distance or near the mean sea level at rest, the simulations have values higher than those calculated by the Eurotop manual.



**Figurea 3.** Comparison Run up Eurotop vs. CELERIS with berm.

An increase in the coefficient of friction has also been made and the expected run-up value has been reached.

### Conclusions

After having carried out the previous simulations, the use of the numerical model of Boussinesq is recommended for the simulation of the different phenomena studied.

The limitations that it presents are:

- Values lower than those calculated by the Eurotop when the slope is equal to or greater than 1: 3.
- Values lower than those calculated by the Eurotop when the obliquity of waves is higher than 60 degrees centigrade.

- Values higher than those calculated by the EurOtop when there is an intermediate berm on the slope.

In order to use it in future studies, it would be advisable to:

- Study how the simulation of the run-up of the experiments with slope greater than 1: 3 can be improved.
- Carry out more studies on the wave with obliquity higher than 60 degrees Celsius, which consist, for example, in increasing the width of the simulation tank.
- And finally, analyze the proposal to increase the coefficient of friction in those experiments that have an intermediate berm.

and OE, Vol. 188, No. 5, pp. 534-550, New York. Also Delft Hydraulics Publication No. 454.

Van Gent, M. R. A. (1999). "Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores: 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra." Rep. H3608, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Van der Meer Consulting B.V. COASTAL ENGINEERING CONSULTANCY & RESEARCH. <http://www.vandermeerconsulting.nl>

### Bibliography

EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)

J.W. van der Meer & J.P. de Waal. Influence of oblique wave attack and short-crested waves on wave run-up and wave overtopping. WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 638, November 1990.

J.W. van der Meer & J.P. de Waal. Water movement on slopes. Influence of berm, roughness, shallow foreshore and oblique long- and short-crested wave attack. WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 1256, April 1993.

Oumeraci, H., Möller, J., Kübler, S., Zimmermann, C., Daemrich, K. F. & Ohle, N. 2002 Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenaufbau. LWI-Report No. 880.

Tavakkol, S., Lynett, P.. Celeris Advent, User's Manual.

Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. Wave runup on smooth and rock slopes. ASCE, Journal of WPC

# Predicción del Remonte del Oleaje ( $Ru_{2\%}$ ) en Diques en Talud con un modelo Boussinesq

Gema Pérez González

Director: Gabriel Díaz Hernández

## Resumen

La adecuada comprensión del rebase del oleaje sobre las estructuras costeras y portuarias, es un requisito clave para el diseño eficaz de las defensas costeras. Estos fenómenos naturales asociados a oleaje de temporal pueden llegar a provocar cuantiosos daños económicos, la parada en el uso de dicha estructura, e incluso la posible pérdida de vidas humanas, deben ser adecuadamente cuantificados.

En la actualidad la forma tradicional de predecir y cuantificar el rebase, también denominado run-up, sobre cualquier tipología estructural en costa se realiza siguiendo el manual EurOtop. Dicha publicación trata dos fenómenos a considerar en el diseño funcional de las estructuras: el fenómeno de run-up y el rebase de este, también conocido con el nombre de overtopping.

El primero de ellos se define como la distancia de ascenso del mar sobre el talud de playa, medidos en vertical desde el nivel medio en reposo, y el segundo como el transporte de una cantidad de agua sobre la coronación de una estructura.

El fenómeno en el que se centra este trabajo de fin de máster es el del run-up o ascenso del oleaje sobre diques en talud de materiales sueltos. El manual establece ecuaciones semi-empíricas que a su vez tienen en cuenta ciertas variables relativas a las estructuras costeras (rugosidad del paramento, existencia de berma en el perfil...) y a condiciones del oleaje (altura de ola, período, oblicuidad del oleaje...).

Estas ecuaciones están basadas en numerosos estudios realizados mediante ensayos de laboratorio representando el comportamiento del oleaje, y midiendo la interacción con las estructuras costeras simuladas.

El presente trabajo fin de máster explora la posibilidad de predecir el fenómeno de run-up sobre estructuras en talud de materiales sueltos con base en el uso de un modelo numérico de propagación de oleaje basado en las ecuaciones de Boussinesq no lineales y transitorias.

Se plantea, por lo tanto, conocer y cuantificar las capacidades de este tipo de herramienta numérica en la predicción de esta variable funcional asociada a la interacción del oleaje con este tipo de estructuras.

## Palabras Clave

EurOtop --- Run up --- Simulación virtual --- Ascenso --- Canal --- Rugosidad --- Berma --- Oleaje irregular --- Oleaje oblicuo --- Boussinesq

## Objetivos

La validación del modelo numérico Boussinesq persigue comparar los valores que aporta el modelo de run-up con aquellos que ofrece el EurOtop Manual, en tres aspectos:

- Obtención del run-up considerando las condiciones geométricas, de oleaje irregular y

de rugosidad de cada uno de los estudios que aparecen en el EurOtop Manual.

- Estudiar la influencia que ejerce la oblicuidad del oleaje sobre el run-up, teniendo en cuenta la rugosidad ya estudiada en el apartado anterior.

- Analizar el cambio en el resultado de run-up cuando existe una berma intermedia en el talud del canal.

## METODOLOGÍA GENERAL

Primero, se ha cuantificado el valor de  $Ru_{2\%}$  en base a los experimentos de laboratorio recogidos en el manual EurOtop.

En segundo lugar, se simula con la herramienta numérica cada experimento siguiendo fielmente sus dimensiones y condicionantes de oleaje y geometría.

Una vez ejecutada la simulación, se realiza la comparación de los valores de  $Ru_{2\%}$  obtenidos del EurOtop con los que aporta la simulación. Esta comparación aportará conclusiones sobre la capacidad del modelo para la predicción de este complejo fenómeno.

La segunda validación que se realiza es incluir oleaje oblicuo a las simulaciones. Tras la ejecución de diferentes simulaciones con oleaje oblicuo, se repite la comparación con aquellos datos derivados de las fórmulas del EurOtop.

Por último, se investiga la influencia que ejerce una berma intermedia en el talud. Para ello se realizan las distintas simulaciones y se compara con los resultados de las fórmulas del EurOtop.

### Descripción del modelo Boussinesq usado

El software empleado en la representación numérica de los ensayos mostrados en el manual EurOtop recibe el nombre de CELERIS Advent (Sasan Tavakkol et al.). Este software resuelve las ecuaciones de Boussinesq extendidas y es acelerado por una unidad de procesamiento gráfico. CELERIS usa un esquema híbrido de volumen finito - diferencia finita para discretizar las ecuaciones gobernantes.

### Influencia de la pendiente en el talud

La simulación de un ensayo mediante el software CELERIS Advent necesita varios datos de entrada como geometría del canal, su rugosidad y las condiciones de oleaje.

### Geometría del canal

Al tratarse de una simulación de casos reales, la geometría viene dada por el canal que se empleó en cada uno de los experimentos recogidos en el EurOtop. Por lo tanto, se ha realizado un trabajo de investigación consultando cada uno de los documentos de la bibliografía del EurOtop que hacen referencia a esos estudios, para averiguar qué geometría tendrían esos canales. En algunos casos ha sido imposible tener acceso a dichos documentos.

### Rugosidad del canal

La rugosidad del canal es un parámetro que servirá como ajuste de los resultados del ensayo virtual. Es decir, primero se ha realizado el ensayo virtual empleando una rugosidad nula probando distintas condiciones de oleaje hasta obtener un run-up que sea lo suficientemente superior al que debería dar el ensayo. Posteriormente, se define una rugosidad en el canal para que el resultado de run-up sea el esperado.

### Condiciones de oleaje

El oleaje que se emplea es un oleaje irregular y que incide normal al talud del canal.

Se establece la profundidad de agua del canal, altura de oleaje y período del mismo.

Mientras se está ejecutando la simulación, los datos del ascenso y descenso del oleaje generado sobre el talud se van registrando en un archivo txt., que posteriormente será analizado para obtener el run up o ascenso del 2%.

### Influencia del Oleaje Oblicuo

La influencia que ejerce la oblicuidad del oleaje sobre el resultado de run-up se ha estudiado simulando un tanque numérico de oleaje con la suficiente anchura para que el oleaje oblicuo se desarrolle completamente. Se emplean algunos de los estudios de la validación ya que se conocen las condiciones de rugosidad y el valor del run-up.

Según establece el EurOtop en sus directrices, la influencia que ejerce el oleaje oblicuo sobre el valor de run-up, se traduce en una disminución del mismo. El objetivo principal de este apartado es

verificar si empleando la herramienta numérica de Boussinesq se consiguen los resultados del EurOtop y qué limitaciones presenta.

### Influencia de la existencia de berma

En este apartado se estudia la influencia que ejerce sobre el run-up la existencia de una berma en el talud o berma intermedia. Se compara el resultado que aporta el software CELERIS Advent con el que debería dar según las ecuaciones que establece el manual EurOtop.

La disposición de una berma intermedia se realiza para conseguir una mayor disipación del oleaje. Las características de la berma se han calculado siguiendo las directrices que dicta el Eurotop.

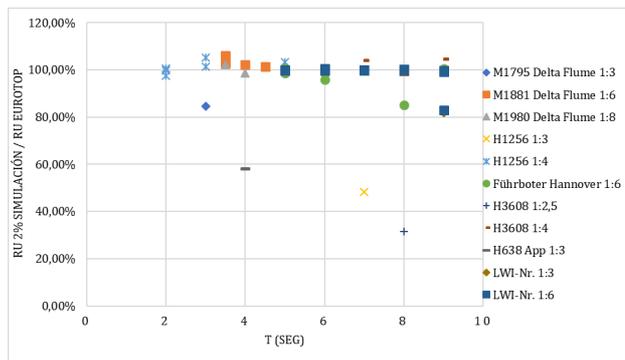
### Resultados

Después de haber realizado cada una de las simulaciones en CELERIS Advent, se han obtenido los siguientes resultados.

#### Influencia de la pendiente del talud

En los primeros casos en los que el objetivo era obtener el coeficiente de fricción empleado en los distintos ensayos físicos, se han realizado los ensayos agrupándolos por estudio realizado y pendiente del mismo. El modelo numérico Boussinesq asemeja bien el fenómeno, obteniendo buenos resultados para pendientes inferiores a 1:4, con ella inclusive.

En aquellos casos con pendientes superiores a dicho valor, en todo momento se han obtenido valores inferiores de run-up en las fases iniciales, es decir, sin haber podido establecer un valor en el coeficiente de fricción. Por ello se ha supuesto que, en esos casos, por la pendiente que supone el software empleado subestima el valor de run-up.

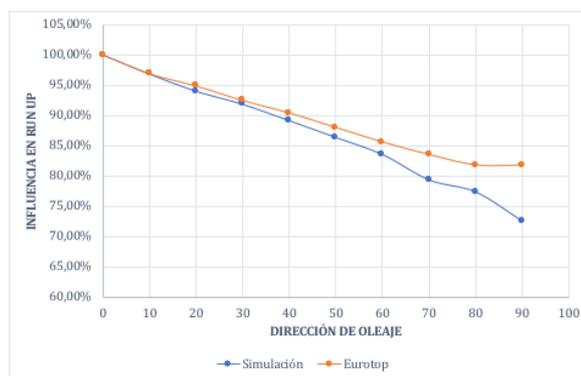


**Figura 1.** Comparación run-up EurOtop vs. CELERIS.

#### Influencia del oleaje oblicuo

En la parte en la que se estudia la influencia del oleaje oblicuo, como ya se ha dicho anteriormente, el software simula bien la influencia de la oblicuidad, siempre y cuando cumple los requisitos de la primera validación. Cuando la oblicuidad supera los 60 grados centígrados los resultados difieren de los propuestos por el manual EurOtop

Se ha supuesto que esa inferioridad en el resultado se debe a la pérdida de zona efectiva para la medición del run-up.



**Figura 2.** Comparación run-up EurOtop vs. CELERIS con oleaje oblicuo.

#### Influencia de la existencia de una berma

La Figura 3. muestra que para todas las simulaciones realizadas con berma, alejada o cerca del nivel medio del mar en reposo, las simulaciones presentan valores superiores a los calculados mediante el manual EurOtop.

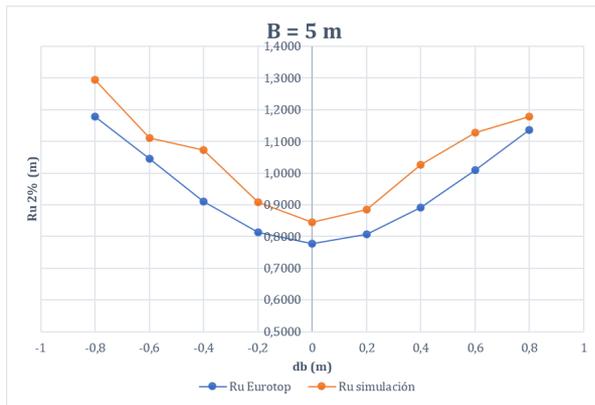


Figura 3. Comparación run-up EurOtop vs. CELERIS con berma.

Se ha realizado también un aumento en el coeficiente de fricción y se ha llegado al valor esperado de run-up.

### Conclusiones

Después de haber realizado las anteriores simulaciones, se recomienda el empleo del modelo numérico de Boussinesq para la simulación de los distintos fenómenos estudiados.

Las limitaciones que presenta son:

- Valores inferiores a los calculados mediante el EurOtop cuando la pendiente es igual o superior a 1:3.
- Valores inferiores a los calculados mediante el EurOtop cuando la oblicuidad del oleaje es superior a 60 grados centígrados.
- Valores superiores a los calculados mediante el EurOtop cuando existe una berma intermedia en el talud.

En vistas a emplearlo en estudios futuros, convendría:

- Estudiar de qué manera se puede mejorar la simulación del run-up de los experimentos con pendiente superior a 1:3.
- Realizar más estudios sobre el oleaje con oblicuidad superior a 60 grados centígrados, que consistan, por ejemplo, en aumentar el ancho del tanque de simulación.
- Y, por último, analizar la propuesta de aumentar el coeficiente de fricción en

aquellos experimentos que dispongan de berma intermedia.

### Bibliografía

- EurOtop. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)
- J.W. van der Meer & J.P. de Waal. Influence of oblique wave attack and short-crested waves on wave run-up and wave overtopping. WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 638, November 1990.
- J.W. van der Meer & J.P. de Waal. Water movement on slopes. Influence of berm, roughness, shallow foreshore and oblique long- and short-crested wave attack. WL | Delft Hydraulics, report on model investigation, H 1256, April 1993.
- Oumeraci, H., Möller, J., Kübler, S., Zimmermann, C., Daemrich, K. F. & Ohle, N. 2002 Einfluss von Bermen und Knicken im Deichquerschnitt auf den schrägen Wellenauflauf. LWI-Report No. 880.
- Tavakkol, S., Lynett, P.. Celeris Advent, User's Manual.
- Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. Wave runup on smooth and rock slopes. ASCE, Journal of WPC and OE, Vol. 188, No. 5, pp. 534-550, New York. Also Delft Hydraulics Publication No. 454.
- Van Gent, M. R. A. (1999). "Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores: 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra." Rep. H3608, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Van der Meer Consulting B.V. COASTAL ENGINEERING CONSULTANCY & RESEARCH. <http://www.vandermeerconsulting.nl>