



Métodos Experimentales en Ingeniería

Modelado Físico en Laboratorio Errores, tipos y ejemplos

Maria Maza (mazame@unican.es)

Índice

- Errores en el Modelado Físico
- Tipos de Modelos Físicos
- Ejemplos de Aplicación

Errores en el Modelado Físico

- **Errores de la medida:** Dado que no se emplean los mismos instrumentos en prototipo y modelo, no tienen muchas veces el mismo sistema ni filosofía de medida, ni tienen la misma resolución ni prestaciones.
 - Ejemplo: El oleaje en el mar se mide habitualmente mediante boyas dotadas de acelerómetros, inclinómetros y compás.
 - En el laboratorio, el oleaje se mide con grupos de sensores de superficie libre, o con perfiladores de velocidad doppler.

- **Errores del modelo:** incorrecta reproducción en modelo de algunas de las características del prototipo: geometría, masa, distribución de masas (inercias), rugosidad, contornos, flujo, oleaje, propiedades del fluido, etc.

- **Efectos de escala:** Al no ser capaces de mantener todas las relaciones de semejanza necesarias para hacer una semejanza completa.

Tipos de modelos físicos

Los tipos de modelos que se presentan a continuación **no son excluyentes**.

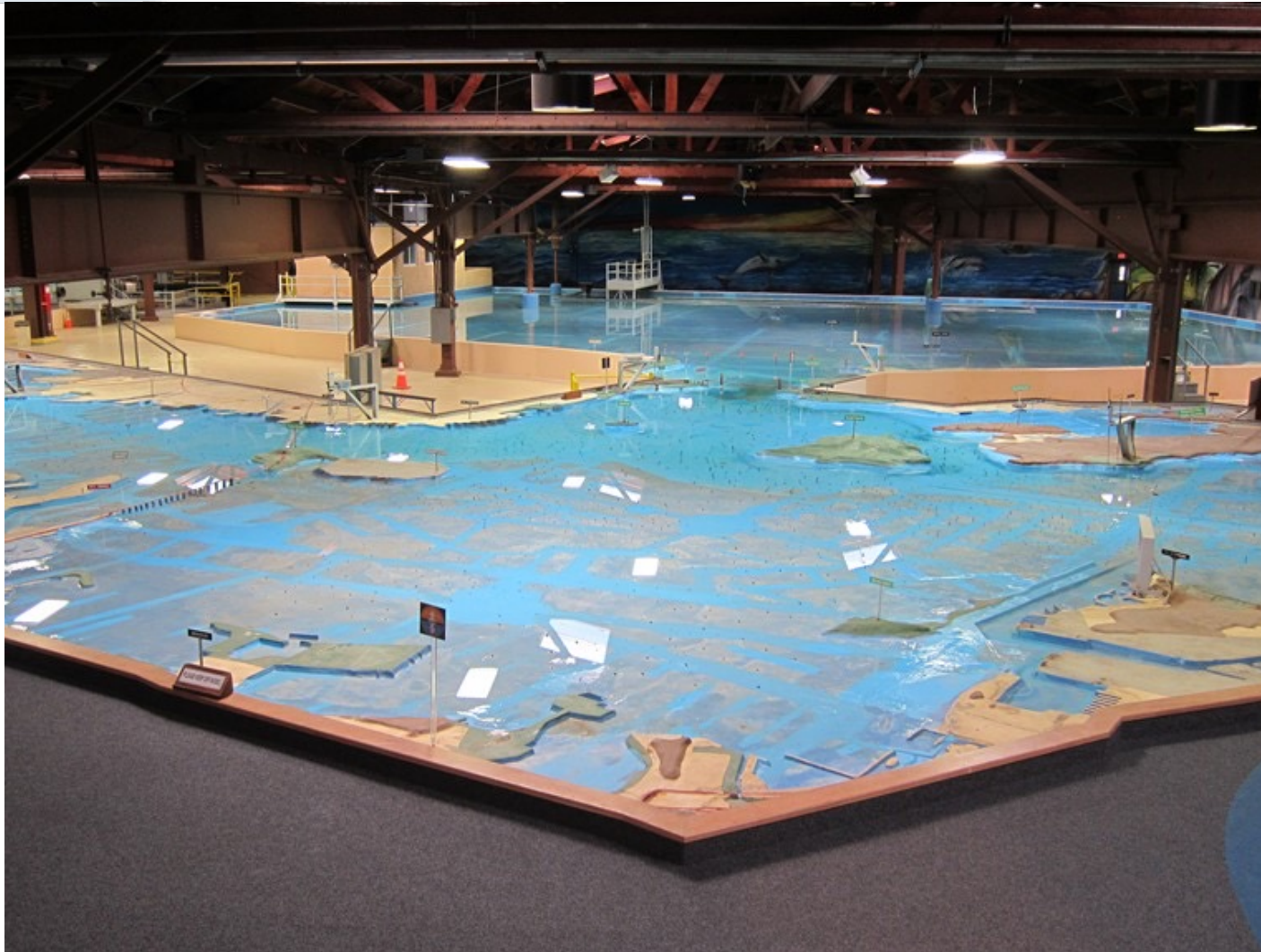
Modelos geoméricamente distorsionados.

Cuando se conserva la semejanza con el prototipo, pero aplicando diferentes factores de escala para diferentes dimensiones del mismo → Distorsión.

Por ejemplo, escala Horizontal \neq Vertical

Los modelos distorsionados son necesarios cuando un factor de escala geométrica único produce una reducción demasiado grande en las dimensiones verticales, lo cual originaría, por ejemplo, efectos significativos en fuerzas que en el modelo son despreciables.

Ejemplo: modelado de corrientes de marea en un estuario



Modelo físico verticalmente distorsionado de una porción de la bahía de San Francisco

Modelos de contorno fijo o móvil

- Modelos de **contorno fijo**: la deformación del contorno no es relevante.

Ejemplos: sistemas de presión, canales revestidos o cursos naturales donde el fondo no experimente muchos cambios, cargas en estructuras fijas.

- Modelos de **contorno móvil**: Cuando la deformación del contorno es relevante.

Ejemplos: Erosión en una cimentación, transporte de sedimentos, playas, riberas de ríos, diques en talud, etc.



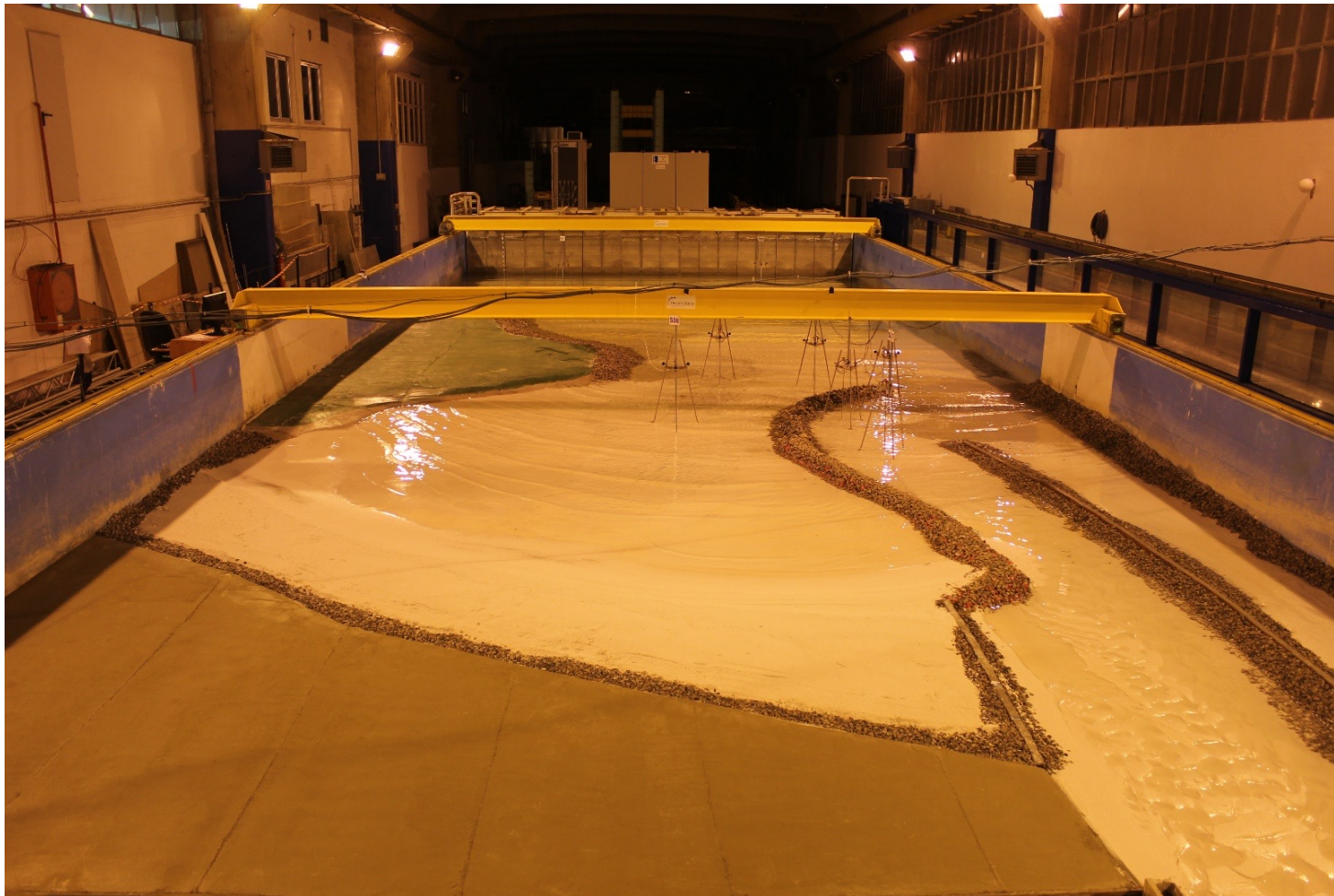
Modelo físico de lecho móvil de una playa protegida con diques exentos



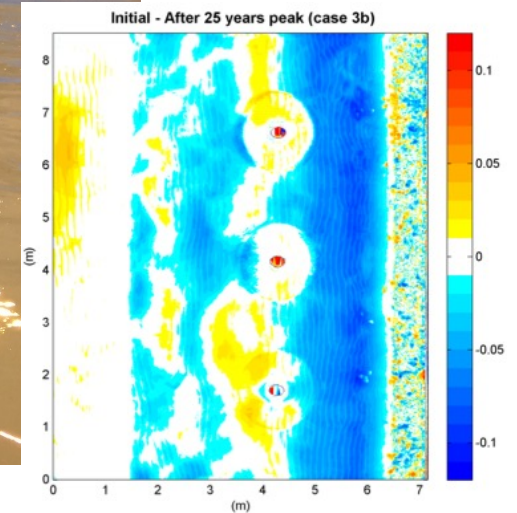
Modelo físico de lecho móvil de la erosión alrededor de la cimentación de plataformas Offshore.



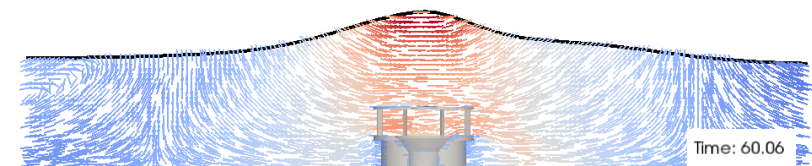
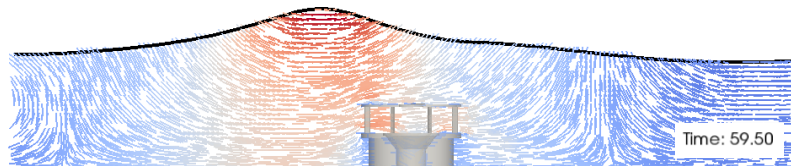
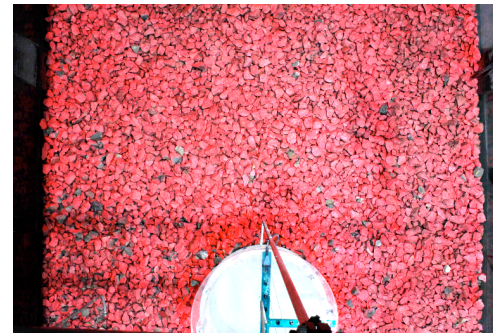
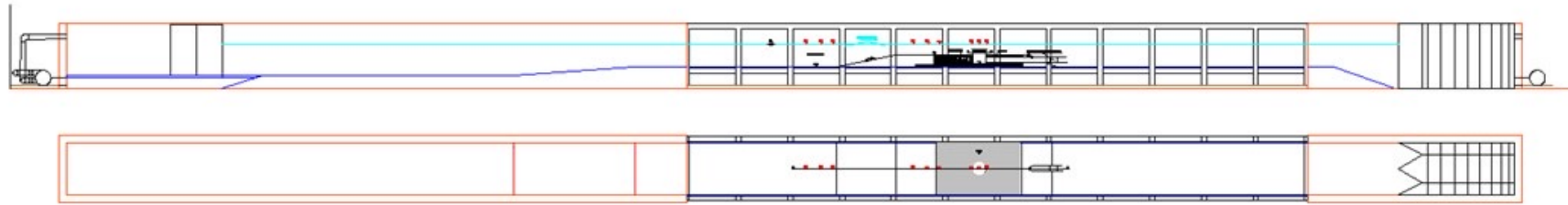
Modelo físico de lecho móvil de la erosión alrededor de la cimentación de una plataforma Offshore de gravedad



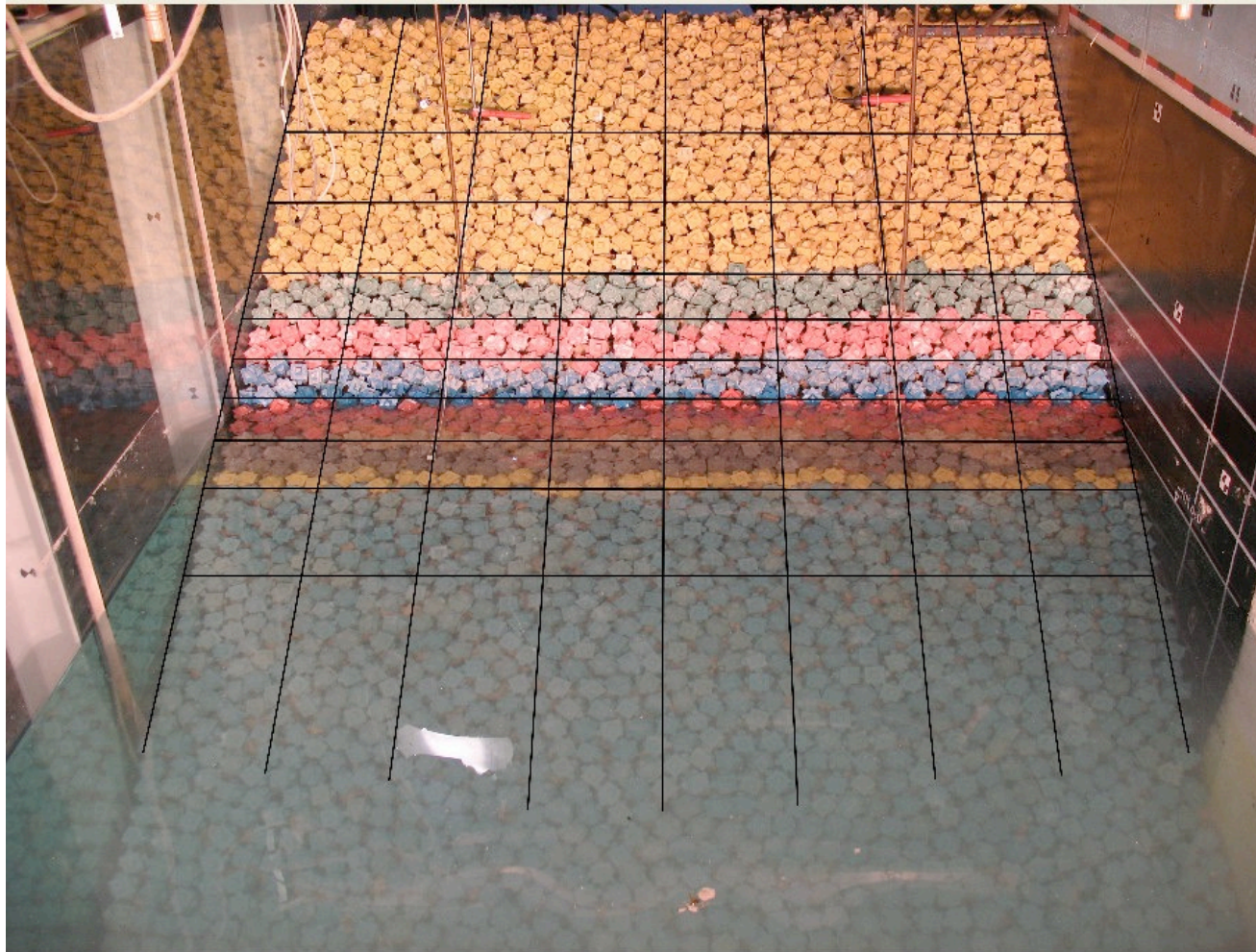
Modelo físico de lecho móvil de la evolución del lecho en la desembocadura de la ría de San Martín, Suances, Cantabria.



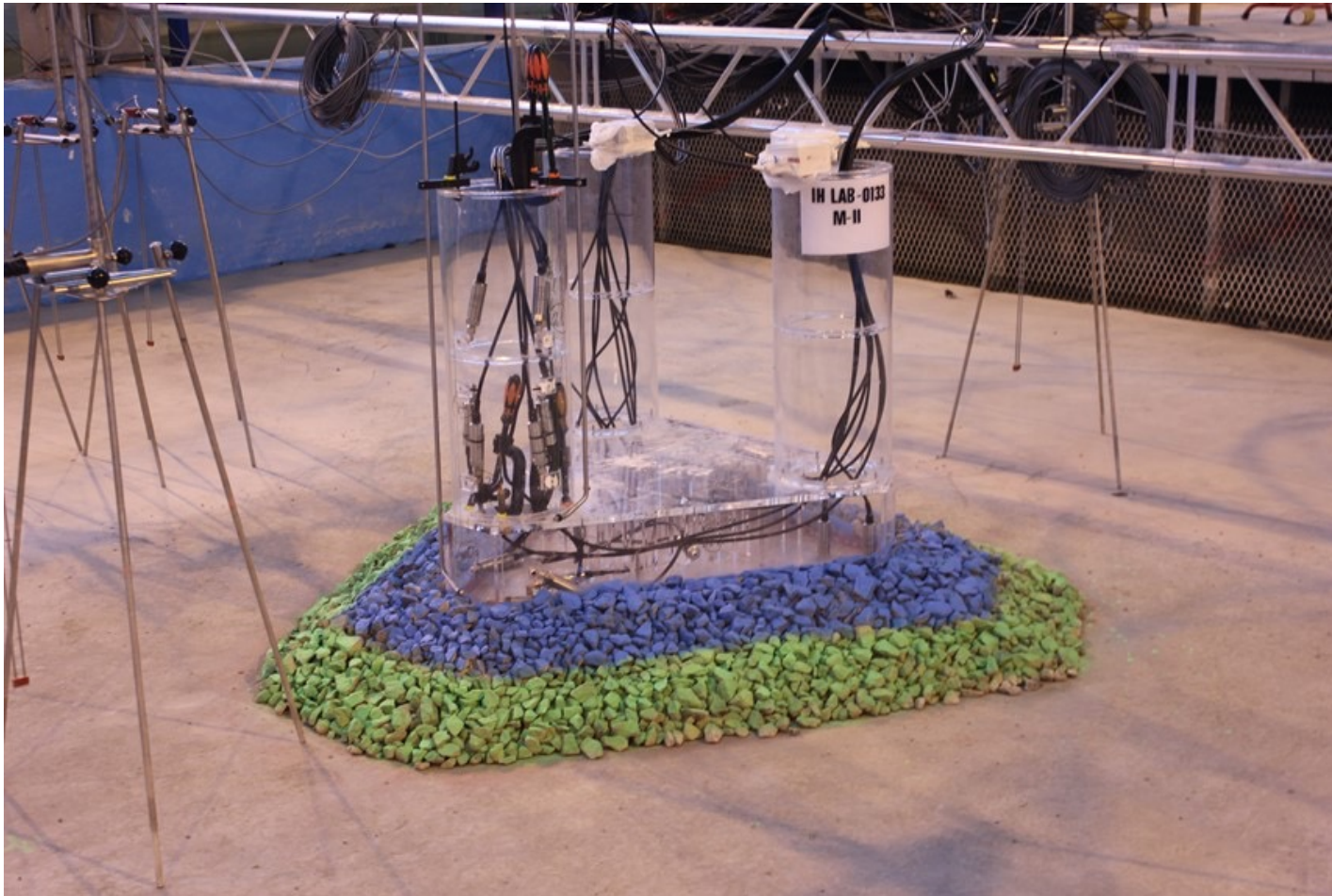
Modelo físico de lecho móvil de la evolución de la protección de las pilas y fondo de un puente marino en la isla de Reunión.



Modelo físico de lecho móvil de la evolución del fondo y cargas hidrodinámicas del oleaje sobre la toma de refrigeración de una central térmica.



Modelo físico para determinar la estabilidad de un dique de cubípodos. Se observa la malla virtual utilizada para la evaluación del daño.



Modelo físico para la determinación de las cargas del oleaje sobre una plataforma de gravedad.

Ejemplos de Aplicación

Ejemplo 1

Se dispone de una zona en el laboratorio, de 10 x 1 metros para hacer ensayos de una conducción de agua a presión.

1. Conocido el largo de la tubería en prototipo de 50 metros, y un diámetro de 0.3 metros, determinar una escala geométrica máxima para poder llevar a cabo los ensayos.
2. Si se han medido en el prototipo velocidades por la tubería de 2 m/s, ¿cual es el caudal con el que hay que ensayar en el modelo?

Ejemplo 1

1. Conocido el largo de la tubería en prototipo de 50 metros, y un diámetro de 0.3 metros, determinar una escala geométrica máxima para poder llevar a cabo los ensayos.

La longitud disponible en el laboratorio, 10 m, nos impone una escala geométrica mínima:

$$\lambda_L = \frac{50}{10} = 5$$

Ejemplo 1.

2. Si se han medido en el laboratorio velocidades por la tubería de 2 m/s, ¿cual es el caudal con el que hay que ensayar el modelo?.

Dado que se trata de un flujo subsónico confinado en tubería de presión, el principal número adimensional a mantener es el de Reynolds, cuyo valor en el prototipo es:

$$R_{ep} = \left(\frac{DV}{\nu} \right)_p = \frac{0,3 * 2}{10^{-6}} = 0,6 * 10^6$$

Ejemplo 1.

Como la escala geométrica, λ_L impone un diámetro en el modelo de $0.3/5 = 0,06 \text{ m}$, la velocidad a la que hay que realizar el ensayo para mantener el n° de Reynolds del flujo es:

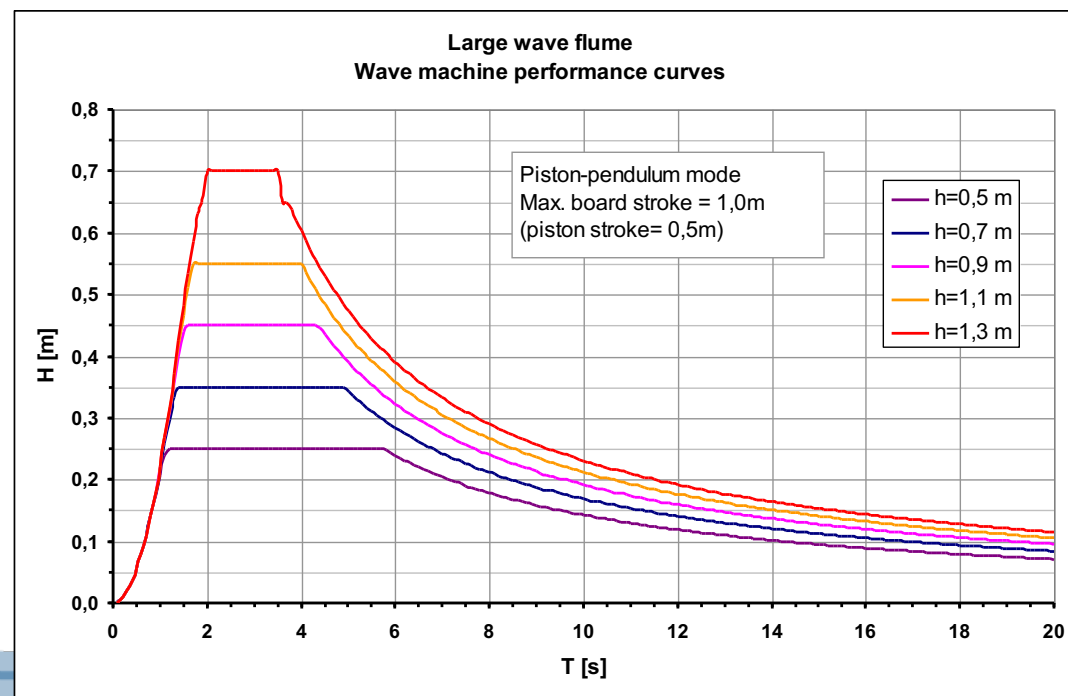
$$R_{em} = \left(\frac{DV}{\nu} \right)_m = \frac{0,06 * V_m}{10^{-6}} = 0,6 * 10^6 \rightarrow V_m = 10 \text{ m/s}$$

El caudal de ensayo será pues:

$$q_m = \left(\frac{\pi D^2}{4} V \right)_m = \frac{\pi * 0,06^2}{4} * 10 = 0,0283 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ejemplo 2.

Se dispone de una canal en el laboratorio, de $70 \times 2 \times 2 \text{ m}$ para hacer unos ensayos de rebase sobre un dique, con manto principal $D_{n50} = 2 \text{ m}$ y núcleo $D_{n10} = 0,10 \text{ m}$, con anchura media $\Delta L = 35 \text{ m}$ y porosidad $P = 0,30$, para unas condiciones de oleaje de $H_s = 5 \text{ m}$, $T_p = 10 \text{ s}$ y un calado a pie de dique de $h = 15 \text{ m}$. La capacidad máxima de generación de oleaje monocromático de la pala del canal viene definida por las curvas:



Ejemplo 2.

Se pide:

1. Determinar una escala geométrica máxima teórica para poder llevar a cabo los ensayos y cuales deben ser los valores de H_s , T_p y h con los que se deberá realizar los ensayos en el laboratorio.
2. Determinar las dimensiones de los áridos a utilizar en el manto principal y núcleo del modelo.

Ejemplo 2.

1. Determinar una escala geométrica máxima teórica para poder llevar a cabo los ensayos y cuales deben ser los valores de H_s , T_p y h con los que se deberá realizar los ensayos en el laboratorio.

Las limitaciones a la escala vendrán impuestas por la profundidad del agua o por la capacidad de generación de oleaje.

Dado que es un modelo de ondas de gravedad no distorsionado, el n° de Froude del modelo deberá ser igual al del prototipo.

$$F_{rp} = \left(\frac{V}{\sqrt{gh}} \right)_p = \left(\frac{V}{\sqrt{gh}} \right)_m$$

Ejemplo 2.

Como la aceleración de la gravedad es la misma en el modelo y en el prototipo, se obtiene la conocida relación entre la escala de velocidades y geométrica:

$$\lambda_h = \lambda_v^2$$

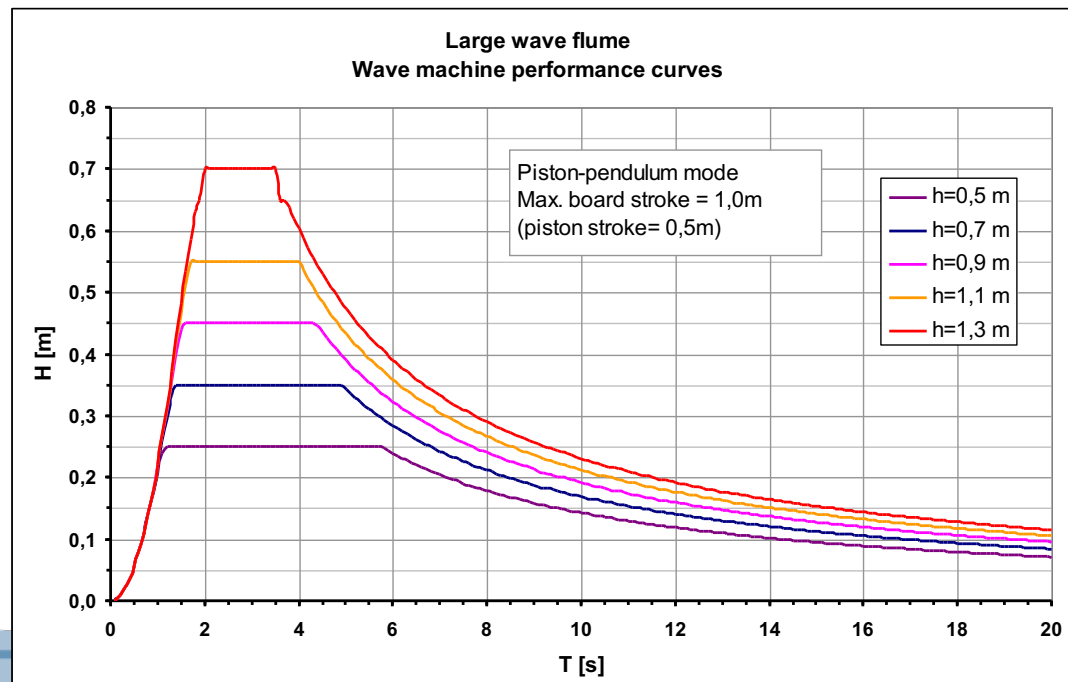
Como la altura del canal es de 2 m de altura y las máximas olas se generan con 1.3 m de profundidad, si se trabaja con esta profundidad, la escala geométrica mínima será:

$$\lambda_h = \frac{15}{1.3} = 11,5$$

Ejemplo 2

Elegimos una escala geométrica $\lambda_h = 12$. Como la altura de ola se escala con la escala geométrica, la altura de ola en el modelo deberá ser:

$$H_{sm} = \frac{5}{12} = 0,42 \text{ m}$$



Ejemplos de aplicación.

$$\lambda_h = \lambda_v^2 = 12; H_{sm} = \frac{5}{12} = 0,42 \text{ m}$$

En un estado de mar con $H_s = 0.42 \text{ m}$ puede haber alturas de ola máximas del orden del doble de la altura significativa, $H_{max} \approx 0,8 \text{ m}$ Como puede verse en la figura anterior, la altura de ola supone una limitación a la generación.

Asumiendo una altura de ola máxima generable conservadora $H_{max} = 0.5 \text{ m}$ (ver gráfico de generación) y una relación habitual $H_{max}/H_s = 1.8$, la altura significativa que deberá generarse es:

$$H_{sm} = \frac{H_{max}}{1,8} = \frac{0,5}{1,8} = 0,28 \text{ m}$$

Ejemplo 2.

Luego es la altura de ola la que impone la escala geométrica:

$$\lambda_{h,H,x,y,z} = \frac{5}{0,28} = 17,86 \cong 18$$

La relación entre la magnitud tiempo, la velocidad y el espacio viene dada por $t = e/v$, por lo que el tiempo tiene la misma escala que la velocidad:

$$\lambda_{Tp} = \sqrt{18} = 4,24$$

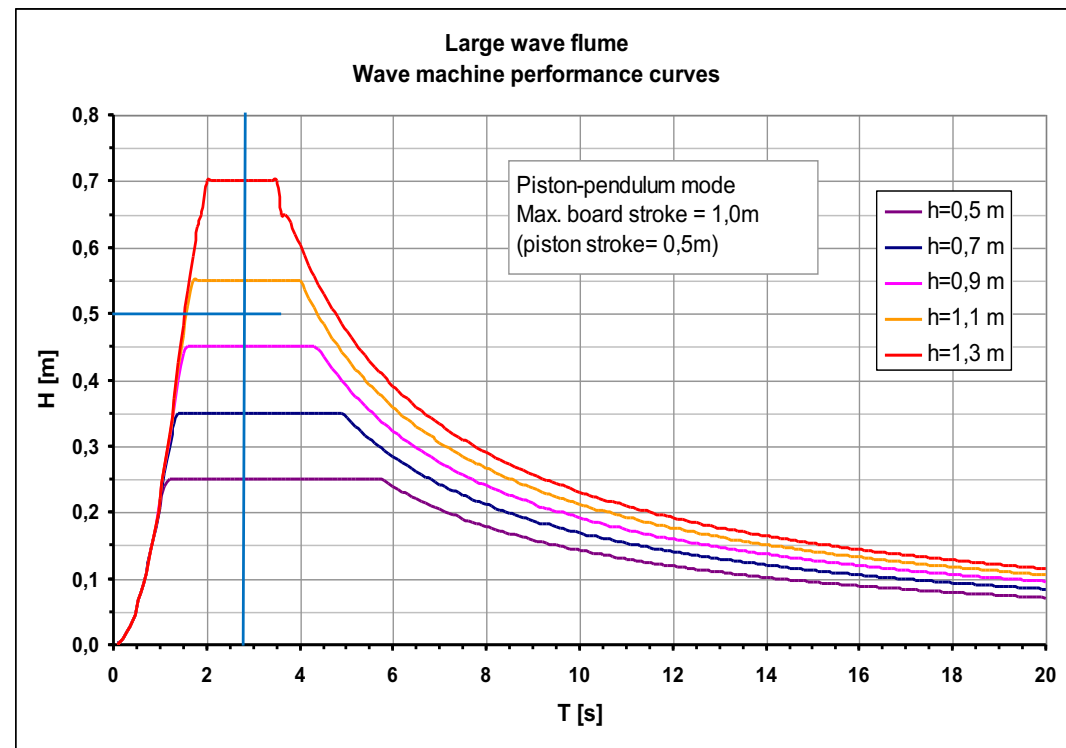
Luego el periodo en el modelo deberá ser:

$$T_{pm} = \frac{10}{\sqrt{18}} = 2,36 \text{ s}$$

Ejemplo 2.

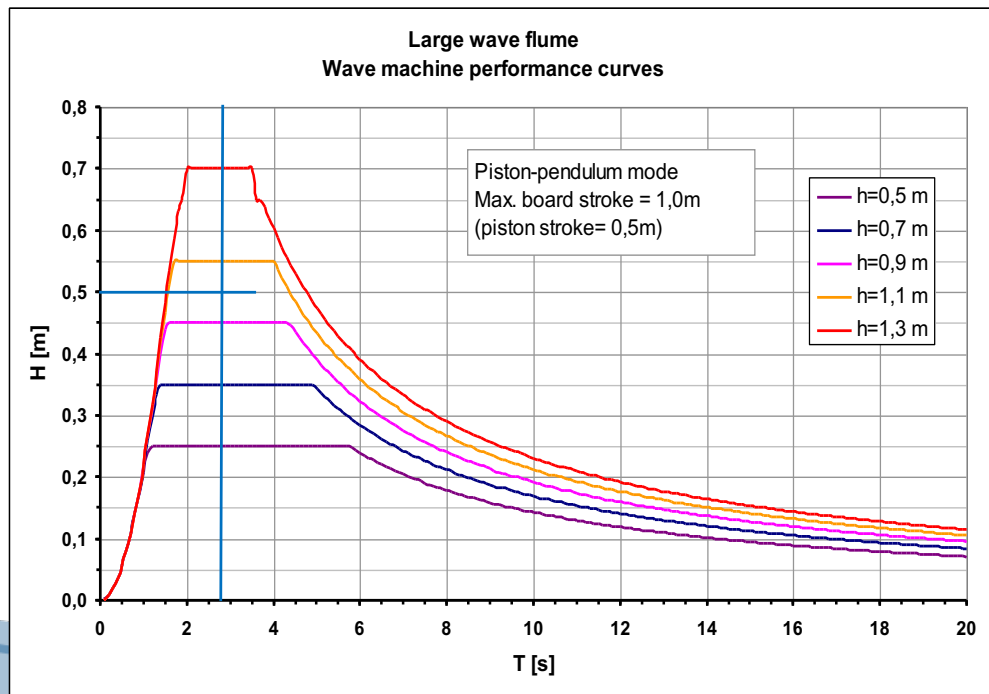
$$\lambda_{h,H,x,y,z} = \lambda_v^2 = 18; \lambda_{T_p,V} = \sqrt{18}; H_{sm} = \frac{5}{18} = 0,28 \text{ m};$$

$$T_{pm} = \frac{10}{\sqrt{18}} = 2,36 \text{ s}; h_m = \frac{15}{18} = 0,83 \text{ m}$$



Ejemplo 2.

Si generamos con $h = 0.83 \text{ m}$ no podremos obtener una $H_{max} = 0.5 \text{ m}$, para ello necesitamos generar con $h = 1.1 \text{ m}$. El problema se resuelve montando el modelo sobre una plataforma dispuesta $1.1 - 0.83 = 0.27 \text{ m}$ sobre el fondo del tanque y realizando una rampa suave de transición (i.e. $\tan \alpha = 1/20$). Entre la coronación de la rampa y el pie del dique se dispondrá una plataforma de al menos una longitud de onda del periodo de pico. $L(2,36, 0,83) = 6,06 \text{ m}$.



$$\lambda_{h,H,x,y,z} = 18$$

$$\lambda_T = \sqrt{18}$$

$$h_m(\text{generación}) = 1,1 \text{ m}$$

$$h_m(\text{pie de dique}) = 0,83 \text{ m}$$

$$H_{sm} = 5/18 = 0,28 \text{ m}$$

$$T_{pm} = 10/\sqrt{18} = 2,36 \text{ s}$$

$$L_{\text{rampa modelo}} = 20 \cdot 0,27 = 5,4 \text{ m}$$

$$L_{\text{plataforma a pie de dique}} = 6 \text{ m}$$

Ejemplo 2.

2. Determinar las dimensiones de los áridos a utilizar en el manto principal y núcleo del modelo.

$$\lambda_{h,H,x,y,z} = 18, \lambda_{T,v} = \sqrt{18}, H_{sm} = 0,28 \text{ m}, T_{pm} = 2,36 \text{ s}$$

El ascenso sobre los diques en talud es $\approx H$ y la velocidad del flujo sobre el talud, $\approx \sqrt{gH}$. Tomando H_s como representativa de H , la velocidad sobre el talud será $\approx \sqrt{(9.81 * 0,28)} = 1,66 \text{ m/s}$. El nº de Reynolds del flujo sobre el talud en el modelo es:

$$R_{em} = \left(\frac{DV}{\nu} \right)_m = \frac{\frac{2}{18} * 1,66}{10^{-6}} = 1,8 * 10^5$$

Suficientemente turbulento para una fricción correctamente escalada.

Luego no es necesario distorsionar el manto principal

Ejemplo 2.

Por lo que respecta al núcleo, Le Méhauté (1965) utilizó consideraciones analíticas y datos medidos para desarrollar un nomograma para distorsionar el tamaño de los áridos del núcleo. El nomograma determina los valores de K en la ecuación:

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = K \frac{D_p}{D_m}$$

En el eje horizontal del ábaco se entra con la expresión:

$$\frac{H_i}{\Delta L} D_p^3 P_p^5, \text{ donde:}$$

Ejemplo 2.

H_i : Altura de ola incidente (da igual modelo que prototipo): $0,28 \text{ m}$

ΔL : Anchura media del núcleo (m o p según H_i), $\Delta L = 35/18 = 1,94 \text{ m}$

D_p : Tamaño efectivo de las piezas del núcleo del prototipo **en cm**. Se toma

$$D_{10} = 10 \text{ cm}$$

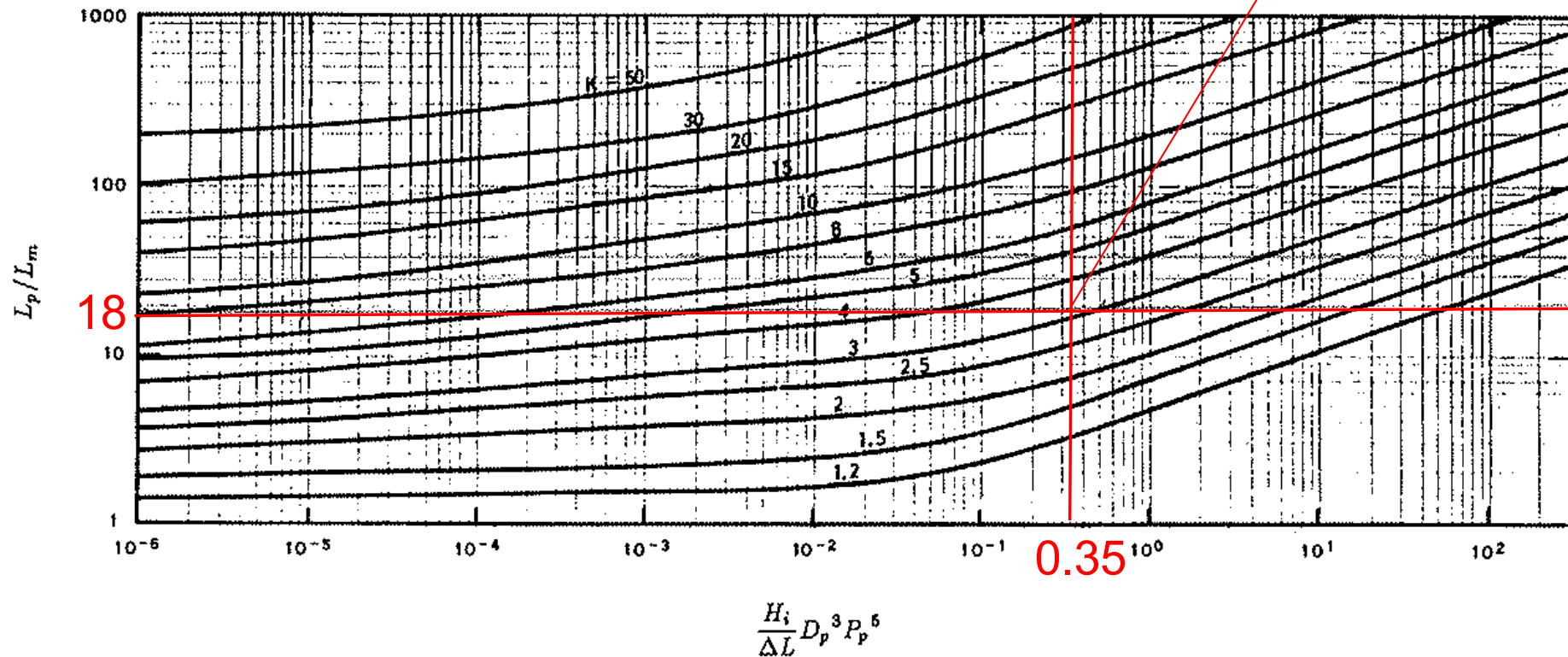
P : Porosidad del núcleo del prototipo: $P = 0,30$

$$\frac{H_i}{\Delta L} D_p^3 P_p^5 = \frac{0,28}{1,94} 10^3 0,3^5 = 0,35$$

Ejemplo 2.

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = K \frac{D_p}{D_m}, \frac{H_i}{\Delta L} D_p^3 P_p^5 = 0,35$$

K=3



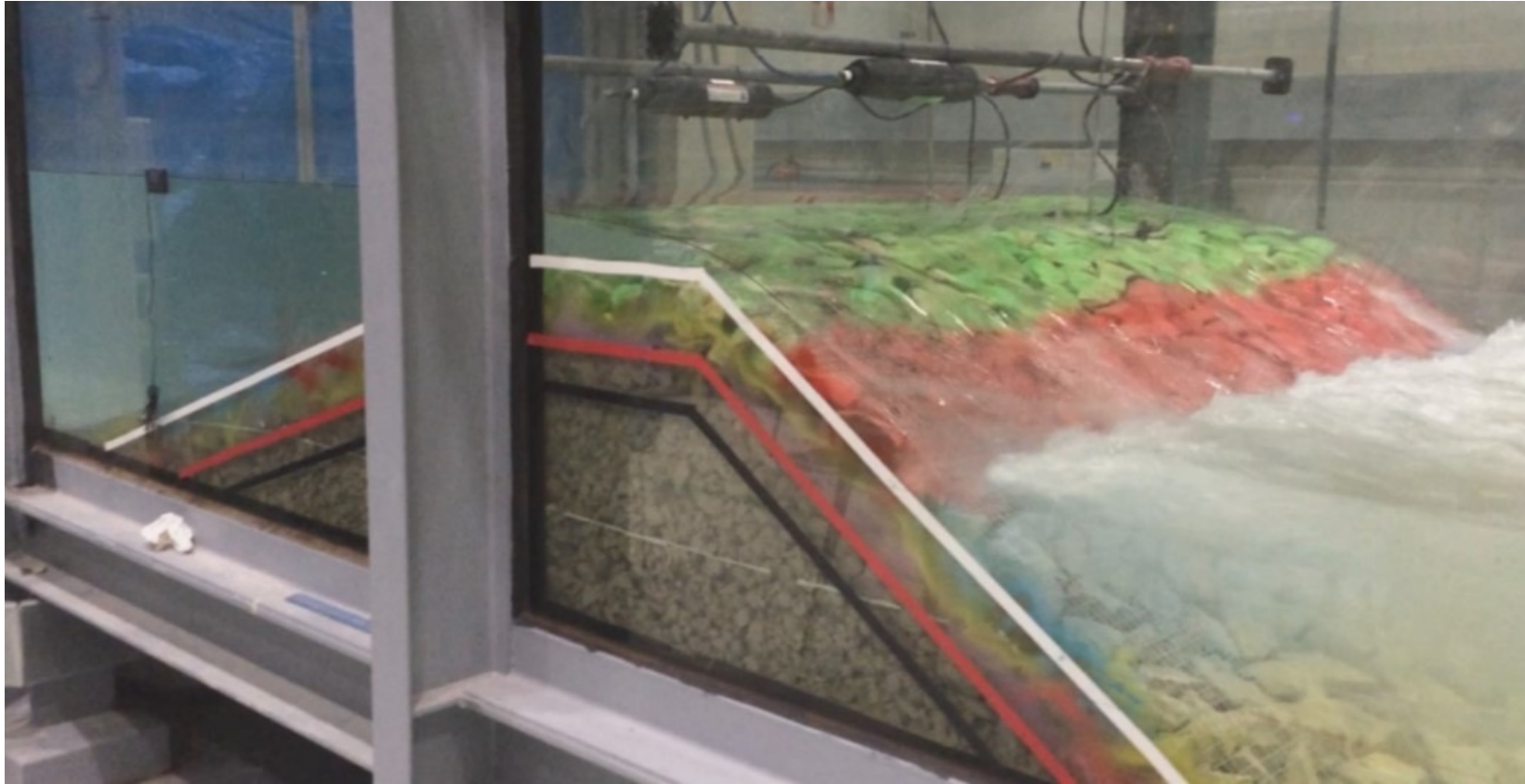
Ejemplo 2.

Entrando en el ábaco se obtiene $K = 3$, luego el tamaño D_{10} del núcleo del modelo deberá ser:

$$\lambda_L = \frac{L_p}{L_m} = K \frac{D_p}{D_m} \rightarrow D_m = \frac{K \cdot D_p}{\lambda_L} = \frac{3 \cdot 0,10}{18} = 0,017 \text{ m}$$

Es decir, el árido del núcleo del modelo debe ser tres veces mayor que lo indicado por la escala geométrica.

Ejemplo 2.



Ensayos de estabilidad de un dique en talud frente al rebase por Tsunamis.
El tamaño de los áridos del núcleo está distorsionado siguiendo la metodología
del ejemplo

Preguntas?

