



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
DE LAS ONDAS GENERADAS POR DESLIZAMIENTO DE
LADERAS EN EMBALSES**

TESIS QUE PARA OBTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JERSAIN GÓMEZ NÚÑEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO

COMITÉ TUTORIAL:
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ
DR. OSCAR FUENTES MARILES
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL

Ciudad Universitaria, México DF, diciembre de 2015

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. ESCALANTE SANDOVAL CARLOS A.

SECRETARIO: DR. DOMÍNGUEZ MORA RAMÓN

1ER VOCAL: DR. BEREZOWSKY VERDUZCO MOISÉS

2DO VOCAL: DR. FUENTES MARILES OSCAR

3ER VOCAL: DR. GRACIA SÁNCHEZ JESÚS

LUGAR O LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS: CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO DF.

TUTOR DE TESIS:

DR. BEREZOWSKY VERDUZCO MOISÉS

FIRMA

ÍNDICE

1. Introducción	ii
2. Descripción del Fenómeno	- 5 -
2.1. <i>Deslizamiento</i>	- 5 -
2.2. <i>Tipos de Movimientos</i>	- 7 -
2.3. <i>Interacción de bloques con agua</i>	- 10 -
3. Eventos Ocurridos	- 15 -
4. Estudios Previos	- 17 -
4.1. <i>Bloques rígidos</i>	- 18 -
4.2. <i>Bloques granulares</i>	- 23 -
4.3. <i>Conclusiones</i>	- 29 -
5. Objetivos	- 33 -
<i>General</i>	- 33 -
<i>Particulares</i>	- 33 -
6. Metodología	- 35 -
6.1. <i>Metodología Experimental</i>	- 35 -
6.2. <i>Diseño de experimentos</i>	- 41 -
6.3. <i>Reproducibilidad de los experimentos</i>	- 43 -
7. Resultados	- 47 -
7.1. <i>Influencia de la profundidad</i>	- 47 -
7.2. <i>Influencia de la dirección de propagación</i>	- 51 -
7.3. <i>Efecto de la porosidad</i>	- 54 -
7.4. <i>Influencia de la posición inicial del bloque</i>	- 57 -
7.5. <i>Resultados subaéreos comparados con estudios previos</i>	- 62 -
8. Propuesta de ecuaciones empíricas	- 67 -
8.1. <i>Aplicación a eventos históricos</i>	- 70 -

9. Conclusiones	- 77 -
Notación	- 81 -
Referencias	- 85 -
Apéndice	- 89 -
<i>A.1 Modelo de similitud</i>	<i>- 89 -</i>
Lista de Figuras	- 91 -
Lista de tablas	- 93 -
Agradecimientos	- 95 -

RESUMEN

Se estudia experimentalmente una ladera que se desliza e impacta con un cuerpo de agua (que puede ser un embalse o una laguna), en la que se forman ondas que viajan hasta las fronteras donde pueden dañar la infraestructura aledaña. En el estudio experimental, la ladera se modela con un bloque y el cuerpo de agua en un tanque que permite una propagación tridimensional de las ondas. Los parámetros considerados son: la porosidad, la masa, la densidad y la posición inicial del bloque, además de la profundidad del agua. Se utiliza un sensor de posición para medir la dinámica del bloque y sondas para medir el desplazamiento de la superficie libre del agua; con una cámara de alta velocidad se observa el proceso de generación de las ondas. Los experimentos realizados son con posiciones iniciales del bloque arriba de la superficie libre, con el bloque semisumergido y sumergido. Los datos experimentales de la altura y amplitud de la cresta y del valle de la primera onda fueron ajustadas a expresiones en función de parámetros adimensionales. Estas expresiones permiten una estimación rápida de las características de las ondas y el daño asociado. Las expresiones obtenidas se aplican a eventos ocurridos, de acuerdo con datos *in situ*.

ABSTRACT

An experimental study of a landslide that moves towards a reservoir or lake is presented. The generated waves travel on the water until they arrive to the boundaries where can damage the infrastructure on the shoreline. In the experimental study, the landslide is represented by a rigid block that moves towards a tank that allows three-dimensional wave propagation. The parameters considered are: the water depth, the block porosity, the mass and initial position of the block. The block dynamics is measured with a position sensor and the waves heights are measured with wave gauges. A high speed camera is used to visualize the wave generation. At the experiments, the block can be initially outside the water, semisubmerged or submerged. Expressions for the wave height and wave amplitude were obtained for dimensionless parameters. These expressions are useful for quick estimations of the wave characteristics and the estimate the associate damage. Those expressions are applied to historical events using *in situ* data.

1. INTRODUCCIÓN

Un Tsunami es un evento con baja probabilidad de ocurrencia, pero con consecuencias catastróficas. Tsunami es una palabra compuesta de origen japonés, “*tsu*”, que significa puerto y “*nami*” que significa ola; sin embargo, la palabra no especifica el mecanismo de generación. Los tsunamis son ondas de agua por gravedad no lineales causadas por el impulso de un volumen de un cuerpo de agua que se mueve a causa de diferentes fenómenos; terremotos, pero también por deslizamiento de laderas, caídas de rocas, explosiones submarinas, erupciones volcánicas, impacto de meteoritos, avalanchas de nieve y otras perturbaciones por encima o por debajo de la superficie libre del agua. Dichas ondas, de gran magnitud, también pueden generarse en lagos, embalses, fiordos, bahías e incluso ríos; y también considerarse como tsunamis.

Los deslizamientos de laderas son los segundos factores desencadenantes más comunes de tsunamis después de los terremotos (Dudley y Lee, 1998); pueden generar ondas de mayor magnitud, pero en la fase de propagación se amortiguan más rápido, como en 1958, en la Bahía Lituya en Alaska, donde el deslizamiento de un bloque de tierra generó una ola con una altura de 162 m en la zona del derrumbe; sin embargo, la amplitud de la onda fue de uno 30 m en zonas alejadas a 6 km del origen (Miller, 1960). Uno de los eventos más destructivos documentados ocurrió en Vajont, al norte de Italia en 1963; donde el deslizamiento de un bloque de tierra hacia el agua generó una onda que sobrepasó la presa de hormigón de más de 70 m y aguas abajo destruyó la aldea de Longarone donde cerca de 2000 personas perecieron (Schnitter, 1964).

El crecimiento de asentamientos urbanos en las vecindades de los embalses y la importancia económica, y sobre todo, de vidas humanas hace urgente un entendimiento preciso de las olas generadas en embalses y su potencial peligro. La combinación de un inadecuado conocimiento de la incierta vulnerabilidad de determinadas zonas de un embalse y predicción de la magnitud de las ondas, plantean un grave y costoso problema de ingeniería que es de especial interés en el análisis de riesgo y seguridad en presas.

La posición inicial relativa del bloque con respecto a la superficie libre del agua permite clasificarlo como externo, semisumergido o sumergido. Cronológicamente el evento puede dividirse en tres etapas principales: generación de las ondas, que consiste en el impacto del bloque con la superficie del agua; la segunda etapa es la propagación de las ondas a través del embalse; y la última etapa es la interacción de las ondas con la presa y fronteras del embalse.

Predecir las características de las ondas como consecuencias del movimiento de un bloque permitirá prever los riesgos y mitigar las consecuencias con la estrategia *ad hoc*, como puede ser la evacuación, la regulación del nivel de agua en el embalse, el anclado del bloque inestable o disminución de volumen por medio de extracción de material.

La caracterización del fenómeno puede ser con diferentes estrategias de modelación: analítica, física o numérica. Los modelos analíticos funcionan idealizando el proceso de generación con el uso de ecuaciones. Los modelos físicos de un sitio en específico son a escala y lo más parecido posible al prototipo de un bloque y embalse; o con un dispositivo experimental general simplificado que tiene el objetivo de construir expresiones generales de las características de las ondas en función de los parámetros del bloque y del embalse. Los resultados pueden ser aplicados a casos específicos de un sitio y evento, o a casos generales. La modelación numérica resuelve computacionalmente las ecuaciones de la hidrodinámica del embalse o lago, las etapas de propagación e interacción con las fronteras se resuelven adecuadamente; sin embargo, en la etapa de generación el uso de simplificaciones puede generar errores que se propagaran a las subsecuentes etapas y se modifica la descripción general del fenómeno.

Los estudios previos con dispositivos experimentales en su mayoría se han realizado en canales donde las ondas se propagan en una única dirección a lo largo del eje del canal con mediciones en dos dimensiones (2D); en cambio, en los estudios realizados en tanques las ondas pueden propagarse radialmente y permitir mediciones en tres dimensiones (3D). El estudio de los parámetros que gobiernan las ondas se ha enfocado en la geometría, la energía y la dinámica de los bloques que se deslizan; y en las condiciones del agua y del tanque, pero las ondas generadas son altamente no lineales propiciando que la identificación de cada uno de los parámetros y la predicción de sus características sea un proceso complicado. La cuestión más difícil es que la mayoría de los bloques reales se deforman al moverse, y no como en el caso del movimiento del fondo del mar que provoca un tsunami y la deformación es uniforme por el movimiento de placas en el fondo. Sin embargo, el principal inconveniente parece ser la simplificación generada por usar modelos 2D.

El presente estudio utiliza un dispositivo experimental 3D con el objetivo de caracterizar las ondas impulsadas por un deslizamiento bajo diferentes parámetros; además, se pretende proponer expresiones empíricas de intención ingenieril con especial interés en la máxima amplitud y el decaimiento de las ondas.

El presente documento está organizado de la siguiente forma: se describe el proceso cronológico del fenómeno estudiado, se muestra una recopilación de eventos históricos documentales y sus características, se elabora el *estado del arte* de los estudios hechos con modelos de generación de ondas por bloques. Se discute la similitud del modelo empleado y sus características, se detalla el montaje experimental y la instrumentación colocada para medir. Se muestra el conjunto de experimentos a realizar y algunos resultados. Se comparan los resultados con los de estudios previos. Se discute la importancia de los parámetros y diferencias de los experimentos con respecto a expresiones empíricas. Finalmente, se resumen los resultados y expectativas.

2. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

2.1. Deslizamiento

Es un término que comúnmente se utiliza para describir una amplia variedad de fenómenos relacionados con el movimiento de una masa que puede estar compuesta de diferentes materiales. Es frecuente que se utilicen otros términos para nombrar este fenómeno, por ejemplo: *deslizamiento de laderas*, *movimiento de masas*, *derrumbe de taludes*, entre otros; no obstante la diferencia radica en el tipo de material y de movimiento, que determinan su comportamiento y el peligro asociado.

La superficie de falla es la frontera sobre la que se mueve el bloque compuesto por una masa homogénea o semi-homogénea, con una trayectoria curva (movimiento de rotación) o plana (movimiento de traslación), fig. 1.

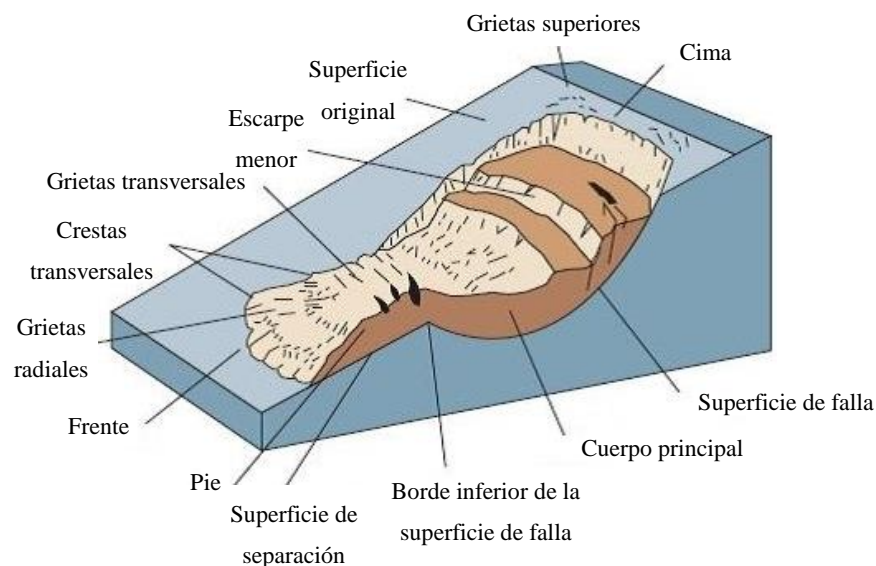


Figura 1. Componentes de un bloque que se desliza, según Highland y Bobrowsky (2008).

Tradicionalmente, el deslizamiento de un bloque se relacionan a pendientes muy pronunciadas; sin embargo, la verdadera naturaleza del problema es otra. El deslizamiento de un bloque puede ocurrir prácticamente en cualquier lugar, porque están asociados a muchos mecanismos de activación: precipitación excesiva, terremotos, volcanes, incendios forestales, algunas actividades humanas, entre otros mecanismos.

Los deslizamientos se pueden producir fuera o dentro del agua, en roca o en suelos, en tierras de cultivo, laderas áridas o bosques naturales, áreas extremadamente secas o muy húmedas. Las fallas pueden ser a causa de las pendientes en laderas empinadas o en zonas con pendientes suaves (entre 1° y 2°). Sin embargo, es posible asociar el tipo de deslizamiento a ciertos patrones de las condiciones de cada sitio.

El origen de activación de los deslizamientos puede agruparse en: geológico, morfológico y artificial. De entre todas, destaca la saturación del suelo o la socavación de su base por la saturación de agua procedente de lluvias intensas o de larga duración, o por el derretimiento de la nieve, por cambios en el nivel de agua subterránea o superficial, ya sea en costas, lagos, embalses, canales o ríos. La fig. 2 muestra la clasificación y descripción del fenómeno con respecto del tipo de material y movimiento.

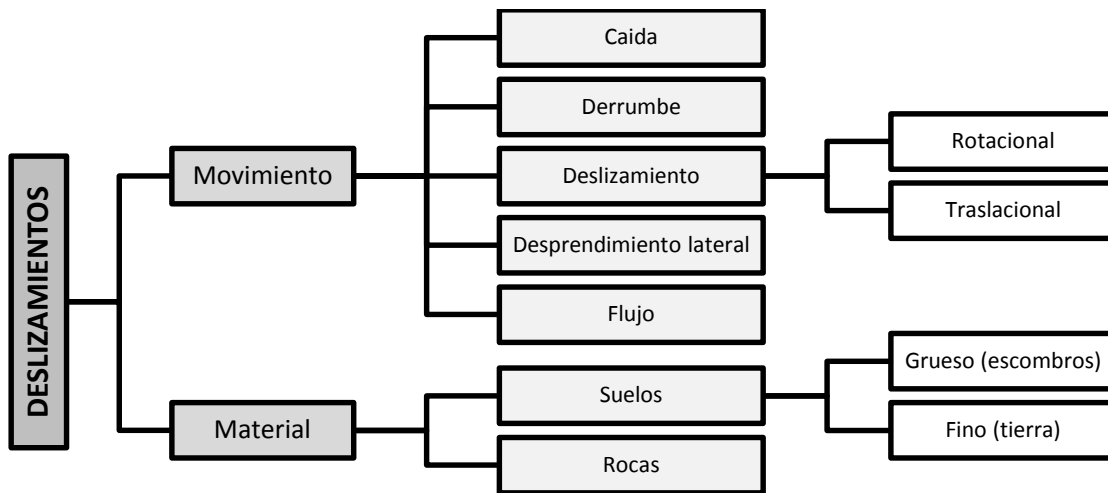


Figura 2. Clasificación del movimiento de laderas, según Cruden y Varnes (1996).

2.2. Tipos de Movimientos

Caída

Son movimientos bruscos que comienzan con el desprendimiento de suelo o roca, o una mezcla de ambos, en una pendiente muy pronunciada o vertical, provocando altas velocidades e incluso caída libre. El material puede descender rebotando o rodando grandes distancias, y llegar a romperse. Se presentan con mayor frecuencia en terreno volcánico, o a lo largo de arroyos y ríos. La velocidad de desplazamiento es muy alta y su volumen puede variar sustancialmente, desde tierra (material de grano fino) hasta escombros o grandes rocas (material grueso), e incluso una mezcla compleja de estos materiales con un volumen de miles de metros cúbicos.



Figura 3. Movimiento de caída de bloques.

Deslizamiento

Su mecanismo detonador más frecuente son las lluvias intensas y de larga duración que saturan los taludes y disminuyen la fricción en la superficie de falla. Otros eventos que pueden detonar el fenómeno son: incremento en los niveles de agua subterránea dentro de la masa, por cambios rápidos en el nivel del arroyo, río, lago o embalse.

Rotacional

Se asocia con pendientes que van desde aproximadamente 20° hasta 40°, y una masa compuesta de materiales homogéneos delimitados con una superficie de falla curvada hacia arriba, que bajo ciertas circunstancias permite a la masa moverse como un bloque relativamente coherente y con poca deformación interna. Su desplazamiento puede ser extremadamente lento (menor a 6 cm/año), moderadamente rápido (1.5 m/mes), o rápido.

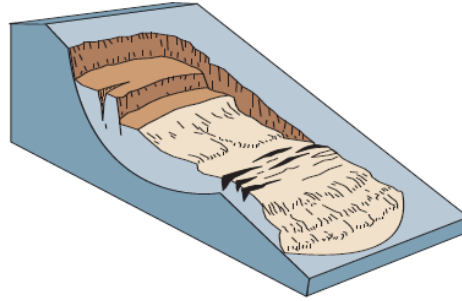


Figura 4. Movimiento de deslizamiento rotacional

Traslacional

Este tipo de deslizamientos es de los más comunes. La masa inicia y evoluciona su movimiento sobre la superficie de falla, comúnmente asociada a discontinuidades geológicas. La composición del material puede variar desde suelos sueltos o no consolidados, hasta extensos bloques de piedra. El volumen puede ir desde algunos metros cúbicos hasta regiones de decenas de millones de metros cúbicos, con movimiento que puede iniciar lento (1.5 m/mes), o moderado (1.5 m/día) y terminar extremadamente rápido.

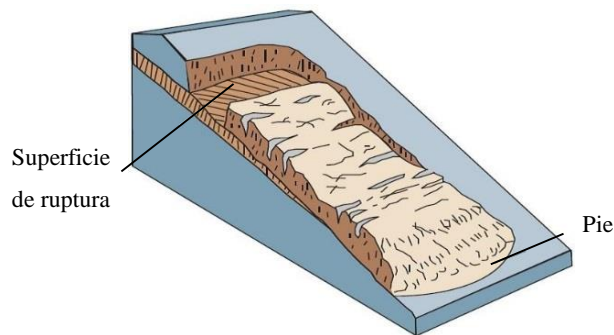


Figura 5. Movimiento de deslizamiento traslacional.

Desprendimiento lateral

Se presenta en pendientes suaves o nulas, por la fractura de la capa superior del suelo a causa del hundimiento del material subyacente más suave. El área afectada inicial puede ser pequeña; sin embargo, una diseminación rápida puede incrementar la zona de falla a cientos de metros.

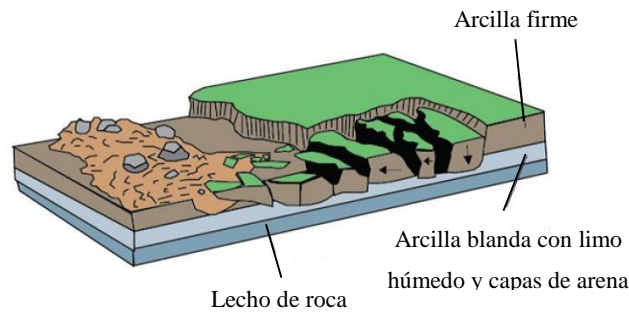


Figura 6. Desprendimiento lateral de bloques.

Flujo

Es un movimiento continuo espacialmente y de corta duración de algún material (líquido viscoso) mezclado con agua, ver fig. 7. Existen varios tipos:

- **De lodos.** Compuesto una gran cantidad de material fino, de tierra suelta, rocas y/u orgánico, mezcladas con agua típicamente proveniente de intensas precipitaciones.
- **Lahar.** Compuesto de lodos volcánicos, con una superficie de cientos de kilómetros cuadrados, que puede incrementar su tamaño y velocidad (más de 50 km/h), especialmente si se mezcla con agua por el súbito derretimiento de nieve y/o hielo circundante debido a alguna erupción volcánica o fuga subterránea de gas caliente.
- **De escombros.** Se producen frecuentemente en terrenos escarpados (barrancos y cañones) con arenas sin cohesión que permiten desplazamientos de decenas de kilómetros y con velocidades de hasta 56 km/h.
- **De tierra.** Compuestos de material de grano fino, normalmente de arcilla o limo, o de roca sobre un fondo de arcilla. La masa fluye como un plástico o flujo viscoso con deformación interna.
- **Lento de tierra.** También llamado fluencia, es un movimiento poco perceptible por su escasa velocidad (menor a 1 m/década), consecuencia del estrés interno apenas suficiente para provocar la deformación, pero insuficiente para provocar un fallo súbito.

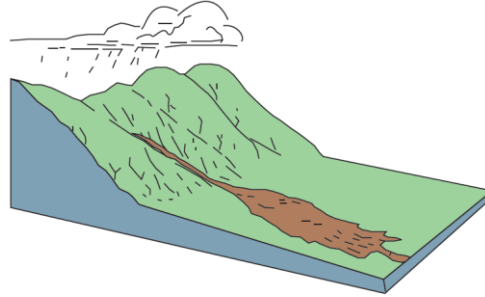


Figura 7. Flujo de material.

2.3. Interacción de bloques con agua

El estudio de un bloque que genera ondas en la superficie libre de un cuerpo de agua puede dividirse en tres etapas principales de acuerdo a su cronología. La primera es la generación, que inicia con el impacto del bloque y culmina en reposo (en la margen o en el fondo del cuerpo de agua); esta etapa es la más importante y crítica porque involucra la interacción de fuerzas e intercambio de energía entre el bloque que se desliza, la pendiente y el agua. La segunda etapa es la propagación y considera el viaje de las ondas en la dirección radial y transversal en el embalse. En la última etapa se estudia la interacción de las ondas con las fronteras del embalse, como el ascenso de las ondas y su posible rompimiento o desbordamiento en la infraestructura.

La primera etapa exige una adecuada representación de los fenómenos hidrodinámicos generados por la entrega de la cantidad de movimiento del material sólido al agua, en un proceso muy complejo y tridimensional de presión-fricción-turbulencia. La importancia de estos fenómenos radica principalmente en la escala de tiempos, porque para una velocidad de entrada del deslizamiento superior a la celeridad de la onda en el agua, son dominantes los efectos de empuje, que se manifiestan como un movimiento en la misma dirección; sin embargo, la mayoría de los casos suceden con velocidades de entrada menores que la celeridad del embalse, y el efecto dominante es el desplazamiento volumétrico del agua. Estas etapas se han investigado de forma independiente, pero en el contexto de realizar el estudio de un evento es necesario trabajarlas acopladas y de forma cronológica, fig. 8. La posición inicial del bloque con respecto a la superficie del agua es uno de los parámetros determinantes en el proceso de generación de las ondas impulsadas y se muestra a continuación.



Figura 8. Etapas del fenómeno de deslizamiento de laderas en cuerpos de agua.

Sub aéreo

La posición inicial del bloque fuera del agua, le permite acelerarse e impactar la superficie libre del agua, para posteriormente sumergirse y finalmente detenerse, fig. 9. En estos casos, el tren de ondas es dominado por el impacto y se caracteriza por una cresta inicial.

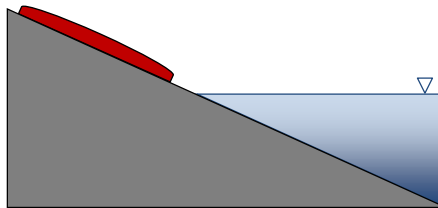


Figura 9. Sub aéreo.

Semisumergido

Parte de la masa del bloque inicia sumergida, fig. 10. Conforme el bloque se adentra, las fuerzas de flotación e hidrodinámica se hacen presentes y modifican la dinámica de movimiento. La magnitud de la primera cresta es menor con respecto a los eventos subaéreos.

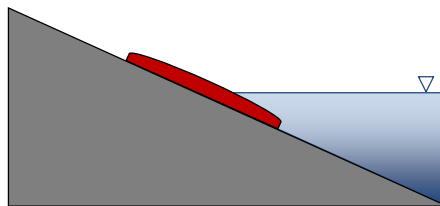


Figura 10. Semisumergido.

Sumergido

Toda la masa del bloque inicia sumergida, fig. 11, con un movimiento que forma un tren de ondas dominado por el primer valle y una segunda cresta puede ser de mayor magnitud que la primera. Este tipo de eventos es análogo a la formación de tsunamis, donde se mueve una placa del fondo del mar.

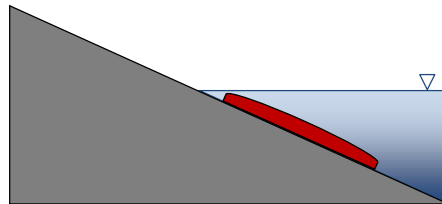


Figura 11. Sumergido.

Parámetros y variables

En el fenómeno de generación de ondas, las variables que se desean conocer son la amplitud de la cresta a y la altura H . La fig. 12 y las tablas 1 y 2 muestran los parámetros más importantes del fenómeno, de acuerdo con Heller *et al* (2009) y que son utilizados en el presente trabajo.

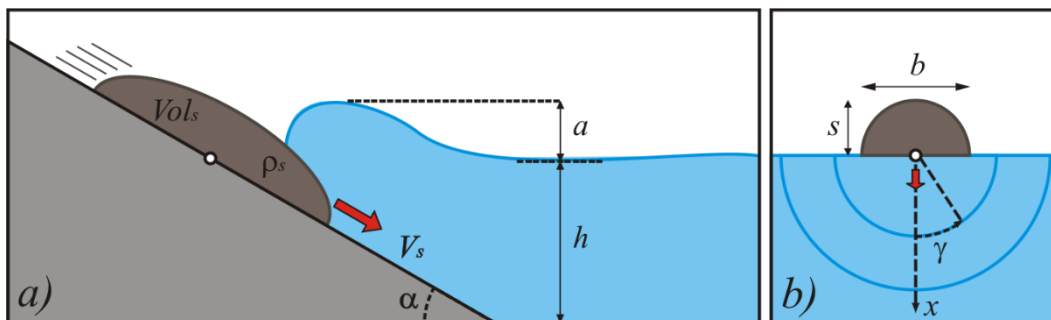


Figura 12. Parámetros más importantes en la generación de ondas, a) vista lateral, b) vista frontal.

Tabla 1. Parámetros independientes gobernantes.

Símbolo	Unidades	Descripción
V_s	m/s	Velocidad de impacto del bloque
Vol_s	m^3	Volumen del bloque
s	m	Altura del bloque
b	m	Ancho del bloque
ρ_s	kg/m^3	Densidad del bloque
h	m	Profundidad del agua
α	$^\circ$	Ángulo inclinación de la rampa o ladera
x	m	Distancia de propagación de la onda
γ	$^\circ$	Ángulo de propagación de la onda
t	s	Tiempo
t_s	s	Tiempo de movimiento sumergido del bloque

V_s corresponde al instante en que el bloque toca la superficie libre del agua y solo es válido en eventos sub aéreos (y se relaciona con la posición inicial z_i medida sobre la rampa, con origen en la superficie libre del agua); s es la altura máxima del bloque, medida perpendicularmente a la pendiente en la que se desliza y en el momento del impacto; b y l son el ancho y longitud máximos del bloque, aunque algunos autores consideran valores promedio; el ángulo α se refiere a la pendiente en la zona donde se realiza el impacto, medido desde la horizontal; h es la profundidad media del agua en la zona de impacto del bloque. x es la distancia y γ el ángulo de propagación, medidos a partir del punto de impacto con la superficie del agua. Además, se supone la densidad del agua ρ_w y la aceleración de la gravedad g .

Considerar a los bloques con porosidad ($n > 0$) implica que fuera del agua existen espacios que serán ocupados por agua cuando el bloque ingrese a ella, esta propiedad implica considerar parámetros adicionales mostrados en la tabla 2. La deformación de los bloques es otra propiedad que puede ser considerada e implica que su geometría puede cambiar.

Tabla 2. Parámetros relacionados con la porosidad del bloque.

Nombre	Unidades	Propiedad granular	Propiedad del bloque
Densidad	kg/m^3	$\rho_g = \rho_s/(1 - n)$	$\rho_s = (1 - n)\rho_g$
Volumen	m^3	$Vol_g = (1 - n)Vol_s$	$Vol_s = Vol_g/(1 - n)$

3. EVENTOS OCURRIDOS

Existe numerosa evidencia de deslizamientos de laderas ocurridos desde hace millones de años, Schuster y Costa (1986); Bonnard (2011); Schuster (1987), Fawu y Tonglu (2009), entre otros. El número de eventos documentados de bloques que culminan dentro de cuerpos de agua no es numeroso; en eventos antiguos la dificultad radica en encontrar evidencia de los niveles de agua alcanzados por las ondas generadas.

En los eventos ocurridos las marcas de agua sobre las laderas han permitido conocer la magnitud del ascenso de las ondas R_u y con ayuda de expresiones empíricas o pruebas de laboratorio estimar la α y H de estas ondas. La tabla 3 muestra una recopilación de eventos, donde destaca uno de los más estudiados, por la magnitud de sus ondas corresponde al ocurrido el 9 de julio de 1958 en la bahía de Lituya que tiene forma de “T” (Miller, 1960). Otro evento bien documentado ocurrió el 9 de octubre de 1963 durante el tercer llenado del embalse de Vajont en Italia, cuando la margen izquierda, con un volumen de 273 Mm³ se deslizó traslacionalmente impulsando una onda que superó la cortina, que posteriormente llegó al valle y arrasó con las poblaciones situadas aguas abajo, Panizzo *et al* (2005b). Este evento constituye un punto de partida en el estudio del tema, porque hasta esa época la comunidad científica y técnica desconocía que se pudieran presentar fenómenos de esta magnitud. El evento de Vajont necesita ser reaprendido por otras generaciones, Semenza (2002). En México en noviembre de 2007, sobre la margen derecha del río Grijalva se deslizó una ladera y la onda generada arrasó el poblado de San Juan Grijalva (Gómez y Berezowsky, 2013). Estos tres eventos son mostrados con mayor detalle en la sección 8.

Tabla 3. Principales eventos de generación de ondas por deslizamiento de laderas.

Fecha	Ubicación	Bloque			Parámetros			Muertos	Ref.
		Material	Vol _s (Mm ³)	Dimensiones s, b, l (m)	α (°)	h (m)	R _u , a, H (m)		
8 Ene 1731	Rammerfjell, Noruega	Roca gneis	0.324	---, 120, 270	---	---	68	17	Jørstad (1968)
22 Feb 1756	Tjelle, Noruega	Granito, gneis	15	100, 250, 600	>25	>200	34	32	Slingerland y Voight (1979)
21 May 1792	Shimabara, Japon	Escombros volcánico	500	---, 4000, ---	10	64	10	>15000	Slingerland y Voight (1979)
27 Ago 1883	Krakatau, Italia	Basalto piroxeno	---	---	---	---	35	36000	Fritz (2002)
13 Mar 1888	Isla Ritter, Papua Nueva Ginea	Basalto andesita	5000	---	10 a 15	1000	20	>100	Ward y Day (2003)
15 Ene 1905	Lago Loen, Noruega	Roca gneis	0.35	10, 50, 100	65 a 90	---	41	61	Jørstad (1968)
4 Jul 1905	Bahía Disenchantment, Alaska	Hielo glaciar	29	34, 808, 1067	28	80	35	0	Slingerland y Voight (1979)
7 May 1934	Tafjord, Noruega	Roca gneis	2	---, 230, ---	60	---	62	41	Jørstad (1968)
13 Sep 1936	Lago Loen, Noruega	Roca gneis	1	10, 250, 400	65 a 90	---	74	73	Jørstad (1968)
10 Jul 1958	Bahía Lituya, Alaska	Roca	30.6	38, 823, 970	40	122	524	0	Fritz <i>et al</i> (2009)
22 Mar 1959	Embalse Pontesei, Italia	Limo y arcilla	5	400, 47, ---	5	47	20	1	Panizzo <i>et al</i> (2005b)
9 Oct 1963	Embalse Vajont, Italia	Roca	240	140, 2000, 750	0 a 40	50	235.5	2000	Panizzo <i>et al</i> (2005b)
18 Mar 1971	Lago Yanahuin, Peru	Caliza	0.1	---	45	38	30	400 a 600	Slingerland y Voight (1979)
18 May 1980	Monte St. Helens, USA	Roca	430	---	---	---	200	---	Fritz (2002)
12 Jun 1985	Xintan, China	---	20	86, 300 a 1100, 2000	50 a 60	---	49	0	Wang y Li (2009)
4 Nov 2007	Río Grijalva, México	Roca, arena, limo, etc.	50	70, 610, 120	22.4	52	50	25	Gomez y Berezowsky (2013)

4. ESTUDIOS PREVIOS

Existen diferentes estrategias para estudiar la relación entre las ondas generadas y los parámetros del bloque y del cuerpo de agua. Cada estrategia posee ventajas y desventajas; según Heller *et al* (2009) la elección de alguna depende de la calidad de los resultados deseados, el tiempo y costo de los experimentos, el nivel de conocimientos que debe tener el usuario, y la dificultad para determinar los parámetros que rigen el fenómeno.

La modelación numérica consiste en resolver computacionalmente las ecuaciones de la hidrodinámica del cuerpo de agua para las condiciones iniciales y de frontera correspondientes (por ejemplo: Rzadkiewicz *et al*, 1997; Gabl *et al*, 2009; Yim *et al*, 2008). Esta modelación resuelve satisfactoriamente la fase de propagación e interacción con las fronteras, pero en la generación hay simplificaciones de un proceso complejo que pueden llevar a errores que se propagan a las subsecuentes etapas, y pueden modificar la descripción general del fenómeno; la calidad de los resultados y el tiempo depende principalmente de las ecuaciones aplicadas y de las simplificaciones hechas.

La modelación física se enfoca en el estudio de casos en específico, con un bloque y un cuerpo de agua a escala y contruidos lo más parecido posible al prototipo (por ejemplo: Davidson y McCartney, 1975; Echávez, 1982; Townson y Kaya, 1988; Huang *et al*, 2013 y 2014). Realizar experimentos con un dispositivo simplificado del bloque y del cuerpo de agua, permite representar el fenómeno y el estudio de los resultados produce expresiones generales, que en algún futuro pueden ser utilizadas para hacer estimaciones rápidas. Este tipo de estudios experimentales se rigen con las leyes de similitud de Froude y son empleadas en el presente trabajo (detalladas en el apéndice A1), algunos otros estudios se muestran en la fig. 13.

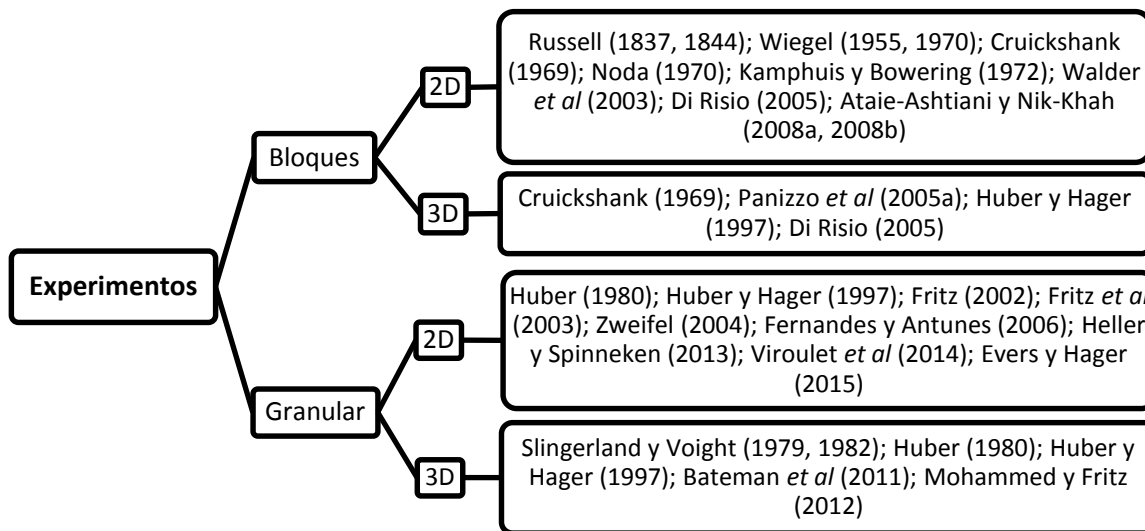


Figura 13. Clasificación de los experimentos previos.

Efectos de escala

Los experimentos en un modelo físico pueden distorsionar lo que ocurre en el prototipo cuando se ven afectados por los efectos de escala, debido a un desequilibrio entre las fuerzas involucradas. Fritz *et al* (2008) encontraron que en la zona de generación se presentan efectos de escala debido a la formación del cráter de impacto y el atrapamiento de aire, que dependen de la inercia del bloque, de la viscosidad y de la tensión superficial del agua. Para evitar estos efectos, Heller *et al* (2008) encontraron un límite de las fuerzas viscosas con un número de Reynolds $Re = 3 \times 10^5$ y de una tensión superficial con el número de Weber $We = 5 \times 10^3$, que implica utilizar $h \geq 0.2$ m en la zona de impacto del bloque. Los efectos de escala en la zona de propagación se deben a la viscosidad que atenúa la altura de las ondas, para evitarlo Hughes (1993) recomienda ondas con periodos mayores a 0.35 s.

4.1. Bloques rígidos

2D

El primer modelo documentado y el más simple es el de Russell (1837, 1844); consiste en un bloque rígido sin porosidad que se coloca justo en la superficie del agua y cae verticalmente hasta hundirse, mientras las ondas generadas viajan hacia el otro extremo del canal 2D. Russell encontró que el volumen de agua desplazada era el volumen de agua en la onda y que esta se mueve con celeridad en función de la profundidad h y su amplitud α .

Wiegel (1955) experimentó en un canal con cuerpos rígidos 2D de diferentes ρ_s que inician sumergidos y que caen verticalmente o que se deslizan en una rampa. Él identificó que los bloques con mayor ρ_s generan a mayores.

Cruickshank (1969) realizó experimentos en un canal de 8.0 m de longitud, 0.4 de ancho y 0.8 m de alto, con bloques rígidos de diferentes geometrías y con materiales granulares que se movían libremente. Con los primeros, encontró que la altura de la onda depende del volumen de agua desplazada, del tiempo de caída y de la profundidad inicial; las ondas producidas en tiempos cortos y por volúmenes relativamente pequeños, tienen mayor frecuencia que las producidas en tiempos largos y volúmenes grandes. Al usar material granular encontró que es menor la transferencia de energía.

Noda (1970) realizó experimentos en el mismo canal que Wiegel (1970), con bloques de concreto que caen verticalmente en un extremo del canal y que por ser de mayor altura que h no permiten que el agua fluya por detrás de ellos. Determinó que la amortiguación de la amplitud máxima de la onda a_M siempre se presenta en la primera onda y que es únicamente función del número de Froude del bloque $F = V_s/(gh)^{1/2}$, ec. 1. Él logró generar cuatro tipos de ondas: oscilatoria (lineal), en transición no lineal, solitaria, y de perfil irregular; que se generan en función del F y de la altura relativa del bloque $S = s/h$ (ver, fig. 14).

$$\frac{a_M}{h} = 1.32F \quad (1)$$

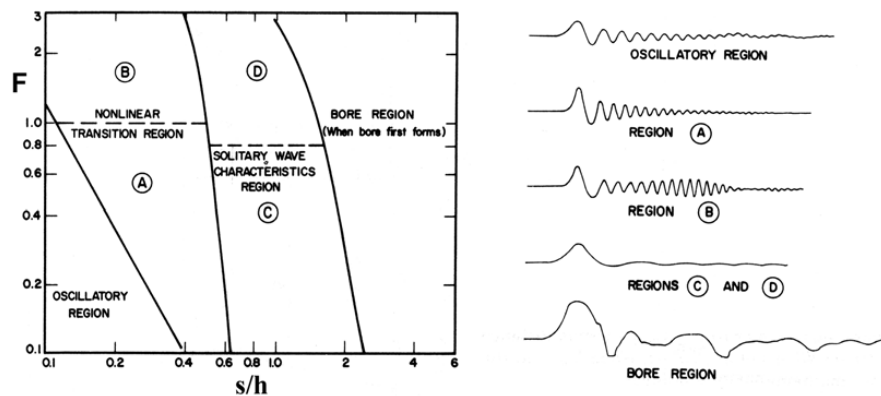


Figura 14. Clasificación de las ondas, según Noda (1970) en inglés.

Kamphuis y Bowering (1972) realizaron experimentos subaéreos en un canal de 45 m de largo por 1 m de ancho, con profundidades de $h = 0.23$ a 0.46 m, los perfiles de onda se midieron en $x = 3.35$ m, 9.45 m y 17.1 m. Los bloques tuvieron diferentes ángulos del frente de ataque ϕ , no porosos pero con diferentes densidades y se deslizaron sobre una rampa con diferentes α y desde diferentes alturas, ver tabla 4. En el análisis de los parámetros adimensionales en la generación de ondas propusieron:

$$\frac{a}{h} = f(F, L, S, \alpha, \phi, \rho_s, X, T) \quad (2)$$

Los parámetros adimensionales fueron obtenidos de un análisis dimensional similar al mostrado en el apéndice A1, donde $L = l/h$ es la longitud relativa del bloque, $X = x/h$ es la distancia relativa y $T = t(g/h)^{1/2}$ el tiempo relativo. Kamphuis y Bowering (1972) determinaron que los parámetros de mayor importancia en la generación son el impulso del bloque expresado con F y el volumen equivalente en 2D expresado con $L \cdot S$, mientras que α tuvo un efecto secundario, expresado en

$$\frac{H_M}{h} = F^{0.7}(0.31 + 0.2 \log(LS)) \quad (3)$$

La amplitud de la onda decae exponencialmente, única y exclusivamente con la distancia de la forma

$$\frac{H(x)}{h} = F^{0.7}(0.31 + 0.2 \log(LS)) + 0.35 \exp^{-0.08 X} \quad (4)$$

Walder *et al* (2003) experimentaron con profundidades pequeñas $h = 0.051$ m, 0.09 m y 0.130 m, pero solo centraron su interés en la generación de la onda. Variaron el ángulo de la rampa y usaron una única ρ_s . Su expresión empírica considera el volumen relativo del bloque $Vol_s^* = Vol_s/(bh^2)$ y el tiempo relativo de movimiento del bloque sumergido $T_s = t_s(g/h)^{1/2}$, y proponen

$$\frac{a_M}{h} = 1.32 \left(\frac{T_s}{Vol_s^*} \right)^{-0.68} \quad \text{para} \quad \frac{a_M}{h} < 0.85 \quad (5)$$

T_s en función exclusivamente de la longitud relativa del bloque $T_s = 4.8 L^{0.4}$.

Di Risio (2005) realizó experimentos subaéreos en el Laboratorio de Hidráulica Marítima y Medio Ambiente (LIAM) de la Universidad de L'Aquila, y utilizó en sus datos las formulaciones empíricas y el análisis dimensional de Kamphuis y Bowering (1972). Utilizó un bloque rectangular de altura menor a la profundidad del agua (llamado del tipo pseudo generador de Scott Russell) $s < h$. Mantuvo constantes $n = 0$, $\phi = 90^\circ$, $G = 1.36$ y $\alpha = 90^\circ$ (caída libre). Se concluyó que la a y la H dependen de F y S , y decaen con X .

$$\frac{a_M}{h} = 0.572S^{0.832}F^{0.398}X^{-0.215} \quad (6)$$

$$\frac{H_M}{h} = 0.897S^{0.642}F^{0.531}X^{-0.273} \quad (7)$$

Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a) realizaron 120 experimentos subaéreos; con 8 diferentes geometrías rígidas sin porosidad y granulares deformables; $\alpha = 30^\circ$, 45° y 60° , $h = 0.1$, 0.3 y 0.5 m; y diferentes posiciones iniciales z_i . La segunda cresta fue de mayor magnitud, seguida por un tren de ondas más pequeñas. La geometría de los bloques influye poco en la amplitud de las ondas; cuando los bloques son granulares deformables generan amplitudes de onda hasta 35% menores con respecto a los rígidos. Las ecuaciones empíricas obtenidas además de F consideran T_s como parámetro dinámico, y S tiene un efecto despreciable (contradictorio a las ecs. anteriores) que se justifica porque se considera Vol_s^* también como término geométrico.

$$\frac{a_M}{h} = (0.405 + 0.078 Vol_s^{*1.28} F^{2.54}) \left(\frac{Vol_s^*}{T_s}\right)^{0.278} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.12} X^{-0.48} \quad (8)$$

$$\frac{a(x)}{h} = (0.398 + 0.076 Vol_s^{*1.27} F^{2.54}) \left(\frac{Vol_s^*}{T_s}\right)^{0.26} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.125} X^{-0.48} \quad (9)$$

Heller y Spinneken (2013) realizaron 144 experimentos subaéreos con bloques rígidos y granular deformable en un canal. Los parámetros trascendentes son F , S y la masa relativa del bloque $M = m/(\rho_w b h^2)$ donde m es la masa del bloque. Además estudiaron la influencia de colocar una transición al final de la rampa que le permite al bloque continuar su movimiento sobre el fondo del tanque. Encontraron que a y H son mayores hasta por un factor de dos cuando el bloque es rígido en comparación con el de material granular. La transición de la rampa hacia el fondo también resulta ser importante, porque gran parte de la energía del movimiento del bloque se absorbe cuando se detiene al final de la rampa al chocar contra el fondo porque no existirá una transición suave. Las expresiones obtenidas incluyen los términos de la relación de b y del ancho del canal, y T_s que es afectado por la existencia o no de la transición.

3D

En los experimentos en tanques, la propagación de las ondas es radial y depende del ángulo γ medido con respecto a la dirección de movimiento del bloque y su ancho b adquiere importancia. Los experimentos de Cruickshank (1969) se realizaron en un tanque de 8 m de longitud, 12 m de ancho y 0.8 m de altura, con bloques de diferente ancho b , con movimiento controlado por un pistón y ángulos de la pendiente α de 15 y 90° (caída vertical); encontrando que para bloques anchos las amplitudes de las ondas, en la dirección de movimiento del bloque $\gamma = 0^\circ$, son de magnitud similar a la de los experimentos bidimensionales; en contraparte, para los bloques estrechos la magnitud de la amplitud alcanza tan solo la mitad del valor, esto porque hay efectos de dispersión o transmisión lateral de la energía por ser un modelo 3D.

Panizzo *et al* (2005a) realizaron experimentos subaéreos en un tanque rectangular, en una esquina fue colocada la rampa donde el bloque desliza e impacta la superficie del agua, y suponiendo simetría simula la otra mitad del total del cuerpo de agua y del bloque (condición de simetría también utilizada en el presente trabajo). Los bloques fueron rígidos con geometrías rectangulares y sin porosidad, con $s = 0.09$ y 0.18 m, $b = 0.3$ y 0.6 m, $\rho_s = 2200$ kg/m³, $h = 0.40$ m y 0.80 m, y tres valores de α . La dirección de propagación en la que se midieron las ondas fue $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ y 90° . Las expresiones de las características de las ondas contienen el término dinámico T_s calculado si es que se conoce el t_s o puede ser estimado con $T_s = 0.43A^{-0.27}F^{-2/3}(\sin \alpha)^{-1.32}$, donde $A = bs/h^2$ es el área relativa del bloque y perpendicular al movimiento, $\sin \alpha$ es la pendiente de la rampa. Además, las ecs. contienen un decaimiento radial y longitudinal de forma exponencial.

$$\frac{a(x,\gamma)}{h} = 0.02 A T_s^{-0.27} (\sin\alpha)^{-0.9} \exp^{1.6 \cos \gamma} X^{-0.8} \quad (10)$$

$$\frac{H_M}{h} = 0.07 \left(\frac{T_s}{A}\right)^{-0.45} (\sin\alpha)^{-0.88} \exp^{0.6 \cos \gamma} X^{-0.44} \quad (11)$$

$$\frac{H(x,\gamma)}{h} = 0.07 A^{0.88} T_s^{-0.3} (\sin\alpha)^{-0.8} \exp^{1.37 \cos \gamma} X^{-0.81} \quad (12)$$

Di Risio (2005) aprovechó que sus experimentos en 2D se realizaron con bloques en caída libre ($\alpha = 90^\circ$) para suponer simetría axial y obtener formulaciones empíricas en 3D con datos de las ondas medidos en $\gamma = 90^\circ$.

$$\frac{H_M}{h} = 0.264 S^{1.535} F^{0.527} X^{-0.828} \quad (13)$$

$$\frac{H(x)}{h} = 0.268 S^{1.711} F^{0.553} X^{-0.934} \quad (14)$$

4.2. Bloques granulares

2D

Huber (1980) realizó alrededor de 1000 experimentos subaéreos en 2D con bloques de material granular libre con $\rho_g = 2700 \text{ kg/m}^3$, diámetros granulares d_g de 8 a 30 mm, diferentes volúmenes relativos granulares $Vol_g^* = Vol_g / (bh^2)$, m , α y h . El Vol_g^* fue el parámetro adimensional dominante y observó ondas generadas del tipo senosoidal, cnoidal y solitarias, incluyendo tipos intermedios.

Huber y Hager (1997) analizaron los datos de Huber (1980) e incluyeron datos de ondas generadas por avalanchas de nieve y glaciares para obtener la ec. 15.

$$\frac{H(x)}{h} = 0.88 \left(\frac{G_g}{X}\right)^{1/4} Vol_g^{*1/2} \sin \alpha \quad (15)$$

donde $G_g = \rho_g / \rho_w$ es la densidad relativa granular.

Fritz (2002) diseñó un dispositivo neumático que permite variar de forma independiente los parámetros más importantes en la generación de las ondas, impulsar o simplemente liberar el material granular, logrando que la V_s sea independientemente del α o de la z_i . Fritz (2002) identificó siete parámetros para describir el proceso de generación de ondas: h , s , d_g , V_s , Vol_s , ρ_s y α ; pero en sus experimentos se mantuvo constante la $\rho_s = 1720 \text{ kg/m}^3$, $\alpha = 45^\circ$ y $d_g = 4 \text{ mm}$, mientras que los otros cuatro parámetros fueron sistemáticamente variados. F fue identificado como el parámetro adimensional dominante en el fenómeno. La aplicación del método de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) permitió a Fritz *et al* (2003) determinar los campos de velocidad e identificar cuatro regímenes de flujo en la zona de impacto.

Posteriormente, Fritz *et al* (2004) hacen una clasificación de las ondas de acuerdo a su celeridad, longitud de onda, linealidad y con la cantidad de energía transferencia del bloque hacia la onda. Además, proponen la ec. 16 para calcular la máxima altura

$$\frac{a_M}{h} = \frac{1}{4} F^{7/5} S^{4/5} \quad (16)$$

El estudio de Zweifel (2004) es una continuación del de Fritz (2002) realizado en el mismo dispositivo experimental, pero con $\rho_s = 955$ a 2640 kg/m^3 . Zweifel (2004) ajusta las amplitudes de onda en función de F, S, M en la ec. 17 el decaimiento con X en la ec. 18.

$$\frac{a_M}{h} = \frac{1}{3} F S^{1/2} M^{1/4} \quad (17)$$

$$\frac{a(x)}{h} = 2S^{1/2} \tanh\left(\frac{1}{4} F^{3/2} \left(\frac{M}{X}\right)^{1/2}\right) \quad (18)$$

Además, Zweifel (2004) con 11 experimentos con un bloque rígido ($\rho_s = 1340 \text{ kg/m}^3$) en el mismo canal ($h = 0.15 \text{ m}$ a 0.60 m) y con los parámetros adimensionales de la tabla 4, encontró que la amplitud máxima a_{Mbox}/h generada por un bloque rígido ($n = 0$) es hasta 2 veces mayor que la a_M/h generada por un bloque granular libre para valores de F pequeños, pero muy parecidas cuando $F > 3.0$. Estos resultados fueron utilizados para ajustar la ec. 19.

$$\frac{a_{Mbox}/h - a_M/h}{a_{Mbox}/h} = 1 - 0.26F \quad \text{para} \quad 0.5 \leq F \leq 2.8 \quad (19)$$

Fernandes y Antunes (2006) realizaron 18 experimentos en un canal de 12 m de longitud, 1 m de ancho y 1.5 m de altura. Con bloques compuestos de material calcáreo con $\rho_g = 2.38$, $n \approx 0.4$, $Vol_s = 0.081$ y 0.169 m³, $m = 193.3$ y 400.9 kg, diferentes z_i , $\alpha = 30.7^\circ$ y 39.5° , con $0.3 \text{ m} \leq h \leq 0.55 \text{ m}$. Generaron diferentes tipos de ondas en función de los parámetros experimentales; sin embargo, no obtuvieron alguna ecuación.

Heller *et al* (2009), Heller y Hager (2010) realizaron experimentos en el dispositivo de Fritz (2002) pero con materiales granulares de diferentes propiedades y diferentes geometrías iniciales. Ellos concluyeron que las características de las ondas están asociadas con el parámetro de impulso $P = FS^{1/2}M^{1/4}(\cos 6\alpha/7)^{1/2}$, con un rango experimental: $0.17 \leq P \leq 8.13$

$$\frac{a_M}{h} = \frac{4}{9}P^{4/5} \quad (20)$$

$$\frac{H_M}{h} = \frac{5}{9}P^{4/5} \quad (21)$$

$$\frac{a(x)}{h} = \frac{3}{5}P^{4/5}X^{-4/15} \quad (22)$$

$$\frac{H(x)}{h} = \frac{3}{4}P^{4/5}X^{-4/15} \quad (23)$$

Viroulet *et al* (2014) con ayuda de una cámara de alta velocidad CAV verificaron cualitativamente que un bloque de mayor n genera una primera onda de menor H en impactos ocurridos a baja velocidad. También observaron una sensible disminución de H cuando α se reduce.

Evers y Hager (2015) utilizaron bloques construidos con sacos rellenos de material granular y comparan sus resultados con los de materiales granulares libres. Las ondas generadas por este tipo de bloques son bien descritas por el parámetro P , pero no obtuvieron expresiones al respecto. Las H generadas con materiales granulares libres llegan a ser 30% menores con respecto a las obtenidas con materiales granulares en los sacos.

3D

Slingerland y Voight (1979, 1982) ajustaron una ecuación para la a_M , a partir de los términos de la energía cinética de los bloques $E_K = \frac{1}{2} \frac{Vol_s}{h^3} G_s F^2$ de los experimentos del WCHL (1970) y de Davidson y Whalin (1974), donde observan que la a_M se presenta en $X \approx 4$ y proponen

$$\log(a_M/h) = -1.25 + 0.71 \log\left(\frac{1}{2} \frac{Vol_s}{h^3} G_s F^2\right) \quad (24)$$

donde $G_s = \rho_s/\rho_w$ es la densidad relativa del bloque.

Huber (1980) llevó a cabo experimentos en un tanque rectangular, con los mismos parámetros de las pruebas hechas en un canal 2D que el mismo había realizado. Posteriormente, Huber y Hager (1997) analizaron estos datos y reajustaron la ec. 15 para obtener la ec. 25 que denota un mayor decaimiento H en 3D, ver fig. 15.

$$\frac{H(x,\gamma)}{h} = 1.76 Vol_g^{*1/2} G_g^{1/4} \sin \alpha \cos^2\left(\frac{2}{3}\gamma\right) X^{-2/3} \quad (25)$$

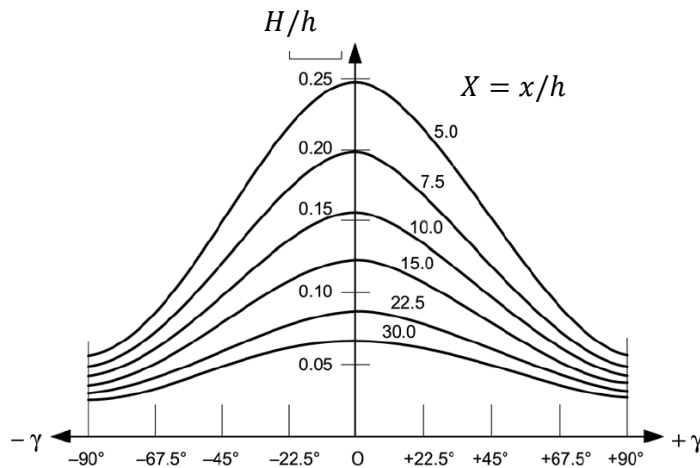


Figura 15. Amortiguación de la onda 3D, según Huber y Hager (1997).

Bateman *et al* (2011) realizaron experimentos en el laboratorio de Fluvial-Morfodinámica en la Universidad Politécnica de Cataluña. La rampa donde viaja el bloque tiene una longitud de 6.2 m y puede colocarse con un ángulo máximo de $\alpha = 27.5^\circ$, que le permite al bloque alcanzar una velocidad de impacto de $V_s = 6$ m/s; con una $m = 150$ kg y $d_g = 19.5$ mm. La zona de generación y propagación es un tanque de 4.1 m de longitud, 2.45 de ancho y 0.6 de altura. Los autores ponen énfasis en analizar la forma 3D en que se deposita el material al final de su movimiento; además comparan sus resultados con los obtenidos en el laboratorio VAW por Fritz (2002), Zweifel (2004) y de Heller y Hager (2010), donde la a_M , H_M y su decaimiento obtenidos son de menor magnitud.

Mohammed y Fritz (2012) realizaron experimentos con bloques de material granular libre que inician su movimiento fuera del agua y que generan ondas que se propagan de forma tridimensional en un tanque. a , H y su respectivo decaimiento radial y longitudinal son descritos con las ecs. 26 y 17, desafortunadamente no realizaron mediciones en $\gamma = 90^\circ$, y sus ecs. cometen el error de generar un valor nulo en esta dirección.

$$\frac{a(x,\gamma)}{h} = 0.31F^{2.1}S^{0.6} \cos \gamma X^{-1.2}F^{0.25}S^{-0.02}B^{-0.33} \quad (26)$$

$$\frac{H(x,\gamma)}{h} = Ec. 26 + 0.7F^{0.96}S^{0.43}L^{-0.5} \cos \gamma X^{-1.6}F^{-0.41}B^{-0.02}L^{-0.14} \quad (27)$$

Tabla 4. Rango experimental de las formulaciones empíricas.

Bloque		Referencia	ec.	F	Vol_g^*	G_g	A_b	X	S	α (°)	γ (°)
Rígido	2D	Kamphuis y Bowering (1972)	3, 4	0.9 - 3.1	0.04 - 0.79	2.7	--	7.2 - 74.3	--	20 - 90	0
		Walder <i>et al</i> (2003)	5	1 - 4.1	0.14 - 3.24	2.9	0.28 - 2.94	8 - 20	0.24 - 1	11.2 - 19.5	0
		Di Risio (2005)	6, 7	0.29 - 2.58	0.09 - 4.17	1.36	0.28 - 12.50	1.7 - 89.2	0.22 - 2.50	90	0
		Ataie-Ashtiani Nik-Khah (2008a)	8, 9	--	0.0007 - 0.0035	1.8 - 2	0.02 - 0.18	0 - 7.2	0.1 - 0.4	15 - 60	0
	3D	Panizzo (2005)	10, 11, 12	1.0 - 2.2	--	2.2	0.04 - 0.68	1.3 - 15.1	0.11 - 0.45	16 - 36	0 - 90
		Di Risio (2005)	13, 14	0.29 - 2.64	0.03 - 0.90	1.36	0.30 - 8.96	1.7 - 52.6	0.87 - 4.78	90	90
Granular	2D	Huber (1980), Huber y Hager (1997)	15	0.53 - 3.69	0.03 - 2.60	1.33	--	5 - 100	--	28 - 50	0
		Fritz (2002), Fritz <i>et al</i> (2004)	16	1.08 - 4.66	0.07 - 6.19	1.62	--	0 - 25	0.07 - 0.6	45	0
Granular y Rígido	2D	Zweifel (2004), Zweifel <i>et al</i> (2006)	17, 18, 19	1.08 - 4.89	0.04 - 1.36	0.95 - 2.64	--	0 - 49	0.08 - 1.13	45	0
Granular	2D	Heller <i>et al</i> (2009), Heller y Hager (2010)	20, 21, 22, 23	0.86 - 6.83	0.05 - 2.98	0.59 - 1.72	--	0 - 59	0.09 - 1.64	30 - 90	0
		Huber y Hager (1997)	25	0.53 - 3.69	0.03 - 2.60	1.33	--	5 - 30	--	28 - 50	0 - 90
	3D	Mohammed y Fritz (2012)	26, 27	1 - 4	0.173 - 20.1	2.6	--	0 - 80	0.1 - 0.9	27.1	60 - 90

4.3. Conclusiones

Observaciones en estudios experimentales previos

- No existe algún estudio con la variación sistemática de todos los parámetros más importantes que rigen el fenómeno.
- Los tipos de ondas observadas fueron: Stokes, oscilatorias, cnoidales, solitarias, de marea e intermedias.
- Noda (1970) y otros observaron que la primera onda es la de mayor magnitud; sin embargo, Kamphuis y Bowering (1972), Echavez (1982), Fritz (2002), Zweifel (2004), etc. encontraron que bajo ciertas circunstancias la segunda onda es de mayor magnitud.
- Todos los estudios se han realizado en canales o tanques prismáticos con fondo horizontal y ancho constante.
- El movimiento de los bloques rígidos es afectado en la transición de la rampa al piso, provocando que el bloque choque con este último y que una gran cantidad de energía cinética ahí se pierda y que se tengan coeficientes de conversión de energía bajos. Heller y Spinneken (2013) colocaron una transición suave y obtuvieron amplitudes de onda mayores.
- En la naturaleza los bloques a lo largo de su desplazamiento e incluso en el impacto con la superficie libre del agua sufren deformación; sin embargo, los bloques rígidos de los estudios no representan dicha deformación, así mismo tampoco la porosidad, rugosidad, entre otras propiedades. El uso de bloques rígidos permite realizar un gran número de experimentos y una alta repetitividad entre ellos.
- a y H dependen de diferentes parámetros relativos que se pueden agrupar y relacionar de la siguiente forma:
 - Generación
 - Energía cinética o inercia del bloque que cierta parte será transmitida al cuerpo de agua. a y H son proporcionales a F y decaen con T_s .
 - Geométrica del bloque, relacionada con la forma en que el bloque impacta el agua y se mueve dentro de ella (geometría y frente de ataque del bloque, superficie hidrodinámica). a y H incrementan con S, B, A y decaen con L .
 - Masa M o volumen del bloque Vol_s^* o Vol_g^* (granular), relacionados con la densidad G_s o G_g (granular). a y H incrementan con estos parámetros.
 - Porosidad es significativa para $F < 3$, donde a y H disminuyen con la n .

- Inclinación de la rampa: $\sin \alpha$
- Decaimiento
 - Longitudinal, con X .
 - Radial, con $\cos \gamma$, $\cos^2(2\gamma/3)$ o $(\cos 6\alpha/7)^{1/2}$.
- Los modelos con bloques rígidos (Huber y Hager, 1997; Walder *et al*, 2003; Panizzo, 2005a; Heller y Spinneken, 2013) generan amplitudes de onda mayores, en comparación con los modelos de bloques granulares (Huber y Hager, 1997; Fritz, 2002; Zweifel, 2004; Mohammed y Fritz, 2012).
- En general las ecs. para eventos subaéreos emplean F o P como parámetros principales en la generación de las ondas; mientras que en los eventos con bloques sumergidos consideran T_s .
- Los modelos 2D sobrestiman la altura de la onda en la zona de propagación, en comparación con modelos 3D (Slingerland y Voight, 1979; Huber y Hager, 1997; Panizzo *et al*, 2005a); mientras que las diferencias son pequeñas en la zona de generación (Huber y Hager 1997).
- El efecto del ángulo de la pendiente de la rampa sobre la altura de la onda se muestra relativamente débil. Solo hay una pequeña disminución de la altura de las ondas con el aumento del ángulo para la misma energía de impacto, por el contrario Huber (1980) y Viroulet *et al* (2014) encontraron un ligero aumento de a y H al incrementar el ángulo de la rampa.
- Los datos y las expresiones obtenidas en las pruebas con bloques que inician su movimiento sumergido no son aplicables para bloques que inician su movimiento subaéreo y viceversa.
- En los modelos 3D la mayor a y H se presentan sobre la dirección de movimiento del bloque $\gamma = 0^\circ$ y decae hacia $\gamma \rightarrow \pm 90^\circ$. Las expresiones obtenidas por Panizzo *et al* (2005a), Mohammed y Fritz (2012) proyectan alturas de onda nulas en $\gamma = 90^\circ$; por el contrario, las expresiones de Huber y Hager (1997) proyectan onda 75% menores (pero no nulas) en la misma dirección.
- La modelación física no reproduce acertadamente algunos fenómenos relacionados con la interacción del bloque y el agua, con respecto a lo que ocurre en el prototipo (por ejemplo la turbulencia, el flujo en medio poroso, el atrapamiento de aire).
- Los experimentos consideran las leyes de similitud de Froude y son limitados por los números de Reynolds $R_e = 3 \times 10^5$ y Weber $W_e = 5000$, que implica $h = 0.2$ m y un periodo de 0.35 s

(según, Fritz *et al*, 2008; Hughes, 1993); sin embargo, Zweifel (2004), Heller y Hager (2010), Viroulet *et al* (2014) realizaron experimentos en el rango de presencia de efectos de escala.

Oportunidades de investigación

- La mayor parte de los trabajos de investigación se han hecho en 2D; sin embargo, es necesario realizar más trabajos en condiciones 3D, porque representan una situación más frecuente y real del fenómeno estudiado.
- Conocer el efecto de la porosidad en las características de las ondas generadas por bloques de material granular libre, con números de Froude menores a tres.
- Conocer el efecto de la deformación y no deformación de bloques granulares sobre las características de las ondas.
- Conocer mejor el efecto de la forma o frente de ataque sobre las características de las ondas.
- Estudiar los resultados contradictorios del efecto del ángulo de inclinación de la rampa, que probablemente obedecen a otro factor.
- La mayor parte de las investigaciones se han hecho con bloques subaéreos y sumergidos; sin embargo, una gran parte de los eventos reales en embalses ocurren con bloques semisumergidos.

5. OBJETIVOS

General

Estudiar las ondas en 3D generadas con bloques rígidos de material granular y no granular, que inician su movimiento subaéreo, semisumergido o sumergido.

Particulares

- Investigar la generación y propagación de ondas en 3D.
- Investigar el efecto entre un bloque poroso y no poroso no deformable, con número de Froude menor a 3.
- Investigar el efecto de diferentes posiciones iniciales del bloque.
- Determinar la importancia de los parámetros adimensionales usados en estudios previos.
- Estudiar la formación de las ondas en la zona de impacto con la ayuda de una cámara de alta velocidad.
- Obtener expresiones empíricas predictivas generalizadas de la altura y amplitud de onda en 3D.
- Aplicar dichas expresiones a eventos ocurridos y evaluar el desempeño de las mismas.

6. METODOLOGÍA

El fenómeno de interés será estudiado físicamente con un dispositivo experimental, con parámetros gobernantes y su respectivo análisis dimensional detallado en el Apéndice A.1. En la siguiente sección se describe el equipo experimental empleado y el sistema de medición.

6.1. Metodología Experimental

Dispositivo experimental

La construcción del dispositivo experimental fue en el Edificio 3 "Raúl Sandoval Landázuri" del Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El dispositivo experimental se compone de un tanque, una rampa, bloques y material granular con geometría cilíndrica. Desde una perspectiva en planta se considera un eje de simetría y se desprecia su efecto de fricción del bloque con la pared, de manera que el tanque y el bloque representan únicamente la mitad fenómeno, como se muestra en la fig. 16.

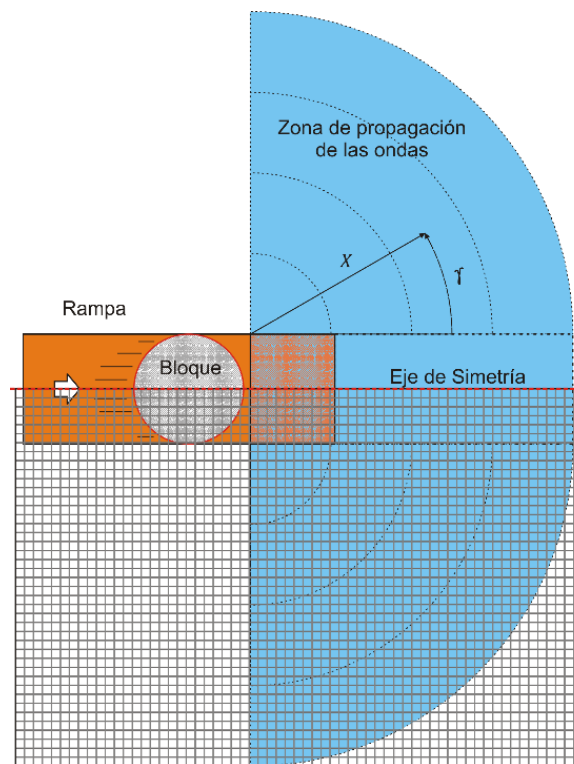


Figura 16. Propiedades simétricas del fenómeno.

Tanque

Fue construido para realizar el presente estudio, los muros son de ladrillo con aplanado fino. El muro sur funciona como el eje de simetría (mostrado en la fig. 16) y cuenta con un par de ventanas contiguas de 2.45 m de largo por 0.87 m alto, con el objetivo de tener acceso visual a la zona de generación de las ondas. El tanque es de geometría rectangular prismática de 9.8 m de longitud, 6.3 m de ancho y 1.07 m de profundidad, en la parte oeste se ubican tres cajones donde se puede colocar la rampa (en el presente estudio se utiliza el cajón ubicado en el eje de simetría), fig. 17.

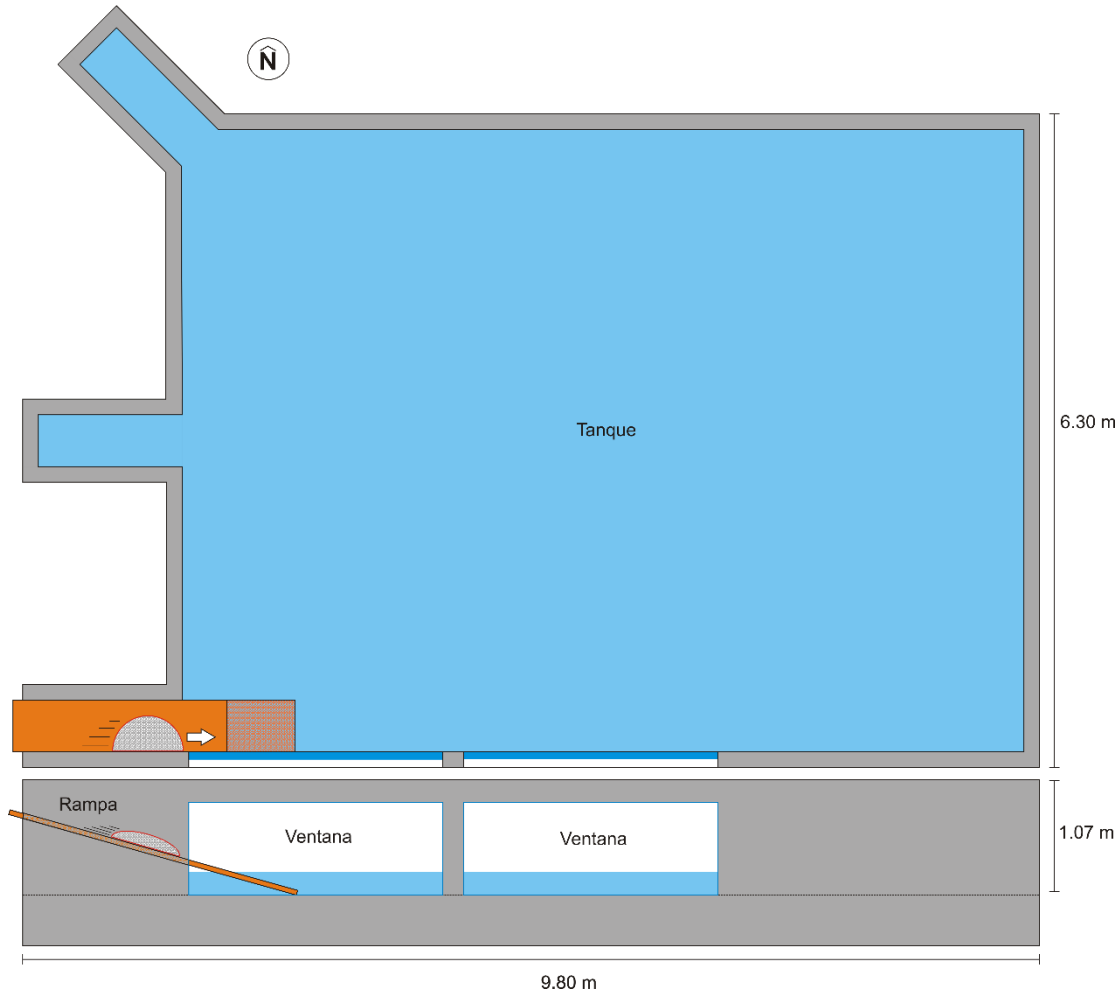


Figura 17. Tanque y rampa del dispositivo experimental.

Rampa

Construida con un marco de acero y lamina de aluminio de 2 mm, longitud de 3.2 m y 0.50 m de ancho. La rampa se apoya sobre bisagras y rieles en la parte alta, y ruedas en la parte baja que le permiten desplazarse en dirección horizontal y lograr un ángulo de inclinación $\alpha = 16^\circ$ a 90° .

Bloque

Los bloques a deslizar tienen una geometría *Gaussiana* suavizada, definida por François *et al* (2007), porque es una idealización de la geometría común de un bloque o ladera. La superficie de la geometría se define con dos funciones secantes hiperbólicas truncadas en direcciones ortogonales, x_b y y_l :

$$Z = \frac{s}{1-\varepsilon} \{ \text{sech}(k_b x_b) \text{sech}(k_l y_l) - \varepsilon \} \quad (28)$$

donde $k_b = 2C/b$; $k_l = 2C/l$; $C = \text{acosh}(1/\varepsilon)$ y $\varepsilon \in [0,1]$ como parámetros de forma.

Las proporciones del bloque fueron ajustadas para cumplir la relación del Vol_s con el área del piso A_p , de acuerdo con la relación de la ec. 29 obtenida por Guzzetti *et al* (2009) con el ajuste de 667 bloques deslizados de diferentes tipos.

$$Vol_s = 0.074A_p^{1.45} \quad (29)$$

La geometría de los bloques A y B completas cumplen los parámetros mostrados en la tabla 5, donde A_b es el área frontal del bloque. La fig. 18 muestra la mitad del bloque, que corresponde a la pieza construida.

Tabla 5. Proporciones de los bloques experimentales.

ε	s (m)	b (m)	l (m)	A_b (m ²)	A_p (m ²)	Vol_s (m)
0.717	0.126	0.68	0.68	0.053	0.363	0.0174

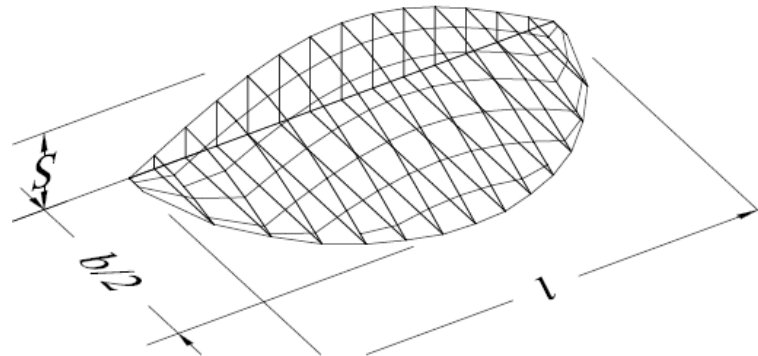


Figura 18. Dimensiones de los bloques experimentales.

El bloque A es rígido, no poroso con paredes de acrílico de 6 mm de grosor (fig. 19a) y hueco que permite variar su densidad ρ_s al colocar en su interior cilindros de diferentes materiales y tamaños, mostrados en la tabla 6 y fig. 20. El bloque B también es rígido pero poroso, construido con una estructura de alambazón de acero, forrado con lámina y malla (fig. 19b), también es su interior se pueden colocar cilindros que permiten variar su n y su ρ_g . Los bloques tienen instaladas ruedas de baja fricción, tres en la parte inferior y dos en la parte lateral, que le permiten deslizarse a una distancia de 1 mm de la rampa y de la pared o del vidrio.

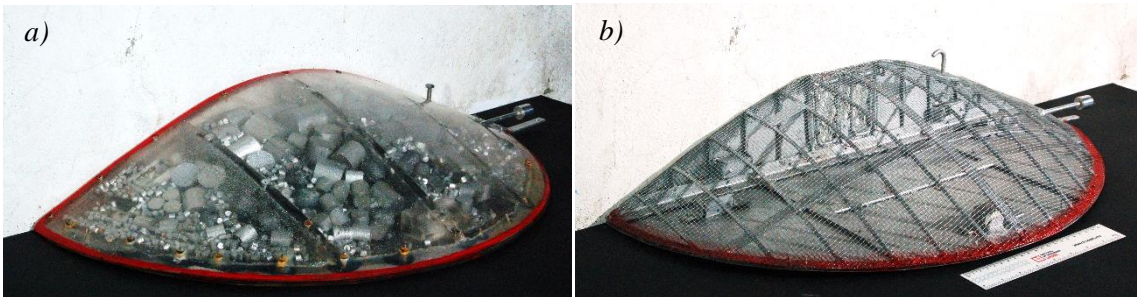


Figura 19. Bloques experimentales, a) A rígido no poroso, b) B rígido poroso

Tabla 6. Propiedades del material granular (cilindros).

Nombre	Material	Densidad ρ_g (kg/m ³)	Altura y diámetro del cilindro d_g (mm)	Volumen Vol_g (m ³)	Masa (g)
Al 1/4	Aleación Aluminio 6061-T6	2700	6.4	2.01×10^{-7}	0.54
Al 3/4			19.1	5.43×10^{-6}	14.66
Al 1-1/4			31.8	2.51×10^{-5}	67.87
Al 1-3/4			44.5	6.90×10^{-5}	186.24
Co 3/4	Concreto	2300	19.1	5.43×10^{-6}	12.49
Co 1-1/4			31.8	2.51×10^{-5}	57.82
Co 1-3/4			44.5	6.90×10^{-5}	158.65
Ny 1/4	Nylamid 6/6	1150	6.4	2.01×10^{-7}	0.23
Ny 3/4			19.1	5.43×10^{-6}	6.24
Ny 1-1/4			31.8	2.51×10^{-5}	28.91
Ny 1-3/4			44.5	6.90×10^{-5}	79.32

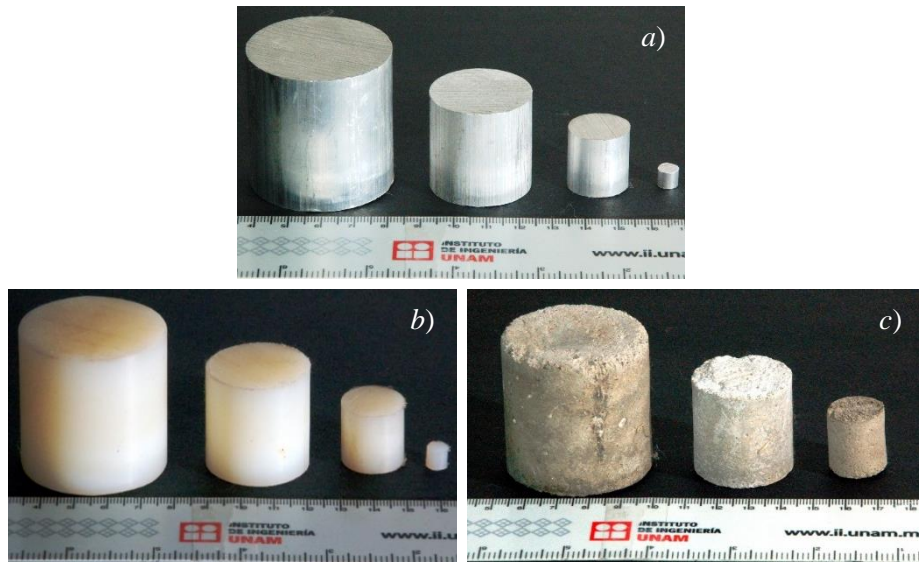


Figura 20. Material de los cilindros, a) aleación aluminio 6061-T6, b) nylamid 6/6, c) concreto.

Instrumentación

El equipo de medición fue adaptado por la Coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería. Los dispositivos de medición se centran en las variables de interés; para la z se emplea el sensor de posición (SP) y para H se usan siete sondas medidoras del nivel de agua (SMNA). Ambos equipos funcionan con un generador de señales de ocho canales (uno para el SP y siete para las SMNA) que a través de una tarjeta de adquisición de datos (TAD) de la marca Texas Instrument convierte la información analógica a digital proveniente del generador de señales (GS) de la marca HR Wallingford, fig. 21.



Figura 21. Generador de señales.

El SP es un transductor de la marca Celesco, modelo PT5A-80-V62-FR-1K-C25 (fig. 22), que se fija con unos tornillos en la parte alta de la rampa, el cable extensor se almacena enrollado dentro de su carcasa, en el lado extremo se fija al boque deslizante por medio de un juego de imanes que protege al SP en caso de ser extendido más de su capacidad. El SP tiene una frecuencia de medición ajustable, de 1 a 500 Hz y un rango de hasta 3.05 m con una precisión de ± 0.5 mm. La frecuencia de respuesta y un bajo par motor permiten medir aceleración de hasta 5 g. El cable de datos del SP va conectado al GS y a su vez manda la información a la TAD donde un programa en LabVIEW guarda los datos de la posición en el tiempo $z(t)$, que posteriormente sirven para calcular las velocidades instantáneas $V(t) = \{z(t + \Delta t) - z(t)\}/\Delta t$.

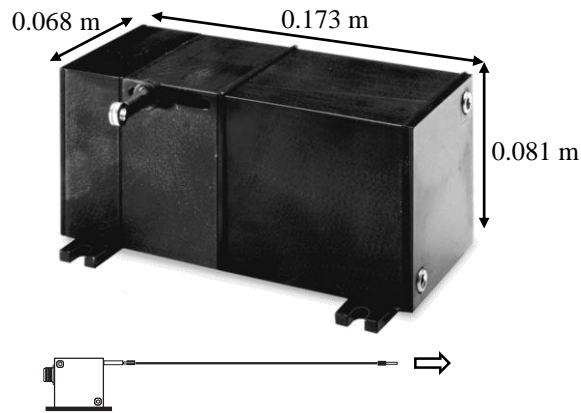


Figura 22. Sensor de posición.

Las SMNA se componen por dos varillas paralelas de acero inoxidable con un pie y cabeza de plástico; esta última, también sirve para fijarse mediante un vástago en cualquier posición vertical, transversal o longitudinal del tanque. Las SMNA tienen un rango de hasta 0.3 m con una precisión de ± 1 mm, una frecuencia de muestreo de hasta 100 Hz. Los SMNA van conectados al GS que a su vez manda la información a la TAD donde el software en LabVIEW genera los valores de $h(t)$ con referencia a una calibración, fig. 23.



Figura 23. Sondas medidoras del nivel de agua.

6.2. Diseño de experimentos

Definiciones

Variables de respuesta. Aquellas que muestran el efecto o resultado de cada prueba experimental; $a(X, \gamma)/h$ y $H(X, \gamma)/h$, que corresponden a la amplitud y altura de la onda relativa, a una distancia relativa X y dirección γ .

Parámetros controlables. Son las variables del fenómeno o características que en los experimentos se fijan a un valor, porque de ellas dependen las variables de respuesta: F , Vol_s^* , Vol_g^* , G_s , G_g , α y n . F depende de z_i , donde esta última toma valor negativo cuando el frente del bloque inicia fuera del agua, cero en la superficie libre del agua y positivo dentro del agua.

Experimento. Evento con una combinación única de parámetros del bloque y/o con condiciones únicas del agua, con el objetivo de medir su efecto de cambio sobre las propiedades de las ondas.

Parámetros no controlables. Son las variables del fenómeno o características que no se controlan durante el experimento: ρ_w y g .

Parámetros estudiados. Son las variables que se modifican en los experimentos para conocer cómo influyen o afectan a las variable de respuesta: z_i , n y h .

Nivel. Es cada uno de los valores que toman las variables en un experimento. Se realizaron: de 4 y hasta 8 niveles con z_i , que generan igual número de valores de V_s y F ; 2 niveles de n y 3 de h . La longitud del cable del medidor de posición limitó los valores de z_i y algunos son diferentes para cada h . Cada nivel y sus implicaciones en otros parámetros se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores experimentales de los parámetros.

Parámetro	h (m)			z _i (m)									n	
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2
Valor	0.2	0.3	0.4	0.68	0.34	0.0	-0.28	-0.34	-0.62	-0.68	-0.98	-1.02	0	0.25

Tratamientos. Es el número de combinaciones únicas estudiadas en un diseño experimental. Se realizaron 34 tratamientos, mostrados en la tabla 8. El nombre que distingue un tratamiento de otro refiere a los parámetros mostrados a continuación:

A	00	32	20	+68
Bloque	Porosidad	Masa	Nivel del agua	Posición inicial
	(%)	(kg)	(mm)	(cm)

Tabla 8. Tratamientos del diseño experimental.

Tratamiento	Nombre	Nivel			Tratamiento	Clave	Nivel		
		n	h	z _i			n	h	z _i
1	A003220+34	1	1	2	18	A003240-98	1	3	8
2	A003220+00	1	1	3	19	B253220+34	2	1	2
3	A003220-34	1	1	5	20	B253220+00	2	1	3
4	A003220-68	1	1	7	21	B253220-34	2	1	5
5	A003220-102	1	1	9	22	B253220-68	2	1	7
6	A003230+34	1	2	2	23	B253220-102	2	1	9
7	A003230+00	1	2	3	24	B253230+34	2	2	2
8	A003230-34	1	2	5	25	B253230+00	2	2	3
9	A003230-62	1	2	6	26	B253230-34	2	2	5
10	A003230-68	1	2	7	27	B253230-62	2	2	6
11	A003230-102	1	2	9	28	B253230-68	2	2	7
12	A003240+68	1	3	1	29	B253230-102	2	2	9
13	A003240+34	1	3	2	30	B253240+34	2	3	1
14	A003240+00	1	3	3	31	B253240+00	2	3	2
15	A003240-28	1	3	4	32	B253240-34	2	3	5
16	A003240-34	1	3	5	33	B253240-68	2	3	7
17	A003240-68	1	3	7	34	B253240-102	2	3	9

6.3. Reproducibilidad de los experimentos

La prueba de reproducibilidad se realizó 3 veces (a, b y c) con el tratamiento A003220-34, mostrado en fig. 24. Los datos de la dinámica del bloque y la variación de los niveles de la superficie se tomaron con una frecuencia de muestreo de 20 Hz ($\Delta t = 0.05$ s), mientras que la ubicación de los SMNA se muestra en la fig. 25 y tabla 9. Los resultados se muestran en la fig. 26 en términos de las variables originales: velocidad del bloque V (m/s) y desplazamiento de la superficie libre del agua H (m).

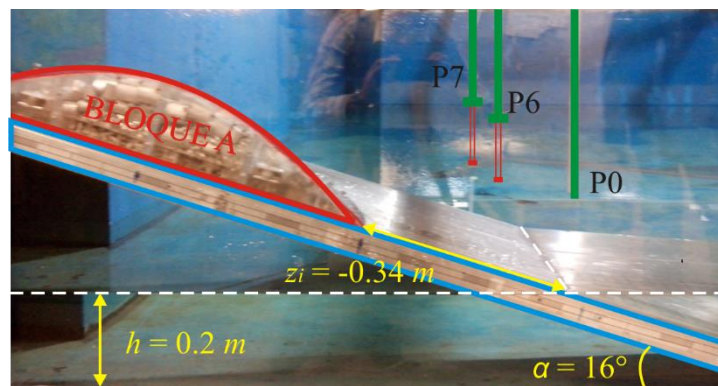


Figura 24. Esquema de las condiciones iniciales de la prueba A003220-34.

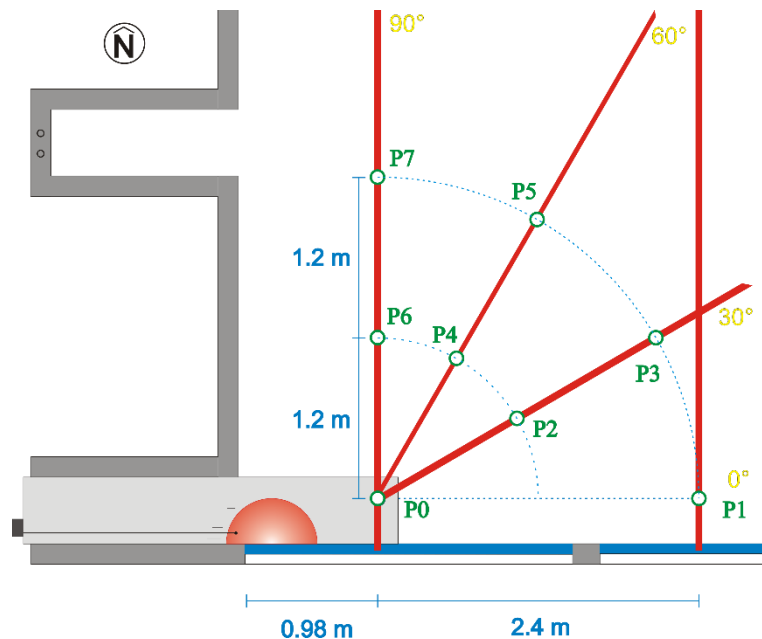


Figura 25. Ubicación de los SMNA en la prueba de reproducibilidad.

Tabla 9. Ubicación de los SMNA en la prueba de reproducibilidad.

Nodo	γ (°)	x (m)	X
P1	0	2.4	12
P2	30	1.2	6
P3		2.4	12
P4	60	1.2	6
P5		2.4	12
P6	90	1.2	6
P7		2.4	12

El impacto del bloque con la superficie libre del agua ocurre en $t \approx 0.6$ s, con $V_s = 1.31, 1.16$ y 1.13 m/s, en las respectivas pruebas *a*, *b* y *c* (fig. 26a). Las velocidades máximas se presentan con el bloque ya semisumergido, en $t \approx 1$ s con $V_M = 1.82, 1.80$ y 1.78 m/s (fig. 26a). Lo anterior indica que la dinámica del bloque es la misma y es reproducible en los tres experimentos, con una variación máxima de 2.2% de todas las H generadas.

En las pruebas de repetitividad, al final de la rampa se colocaron esponjas de diferentes tamaños con el objetivo de frenar de diferente forma el bloque; en la prueba *a* (línea roja) la esponja fue de mayores dimensiones con respecto de las pruebas *b* y *c* (línea azul y verde), en la primera el bloque tiene una desaceleración suave, mientras que en las otras pruebas hay un rebote brusco del bloque. Sin embargo, los métodos de frenado no afectan las características de las primeras ondas, ver figs. 26a a 26h.

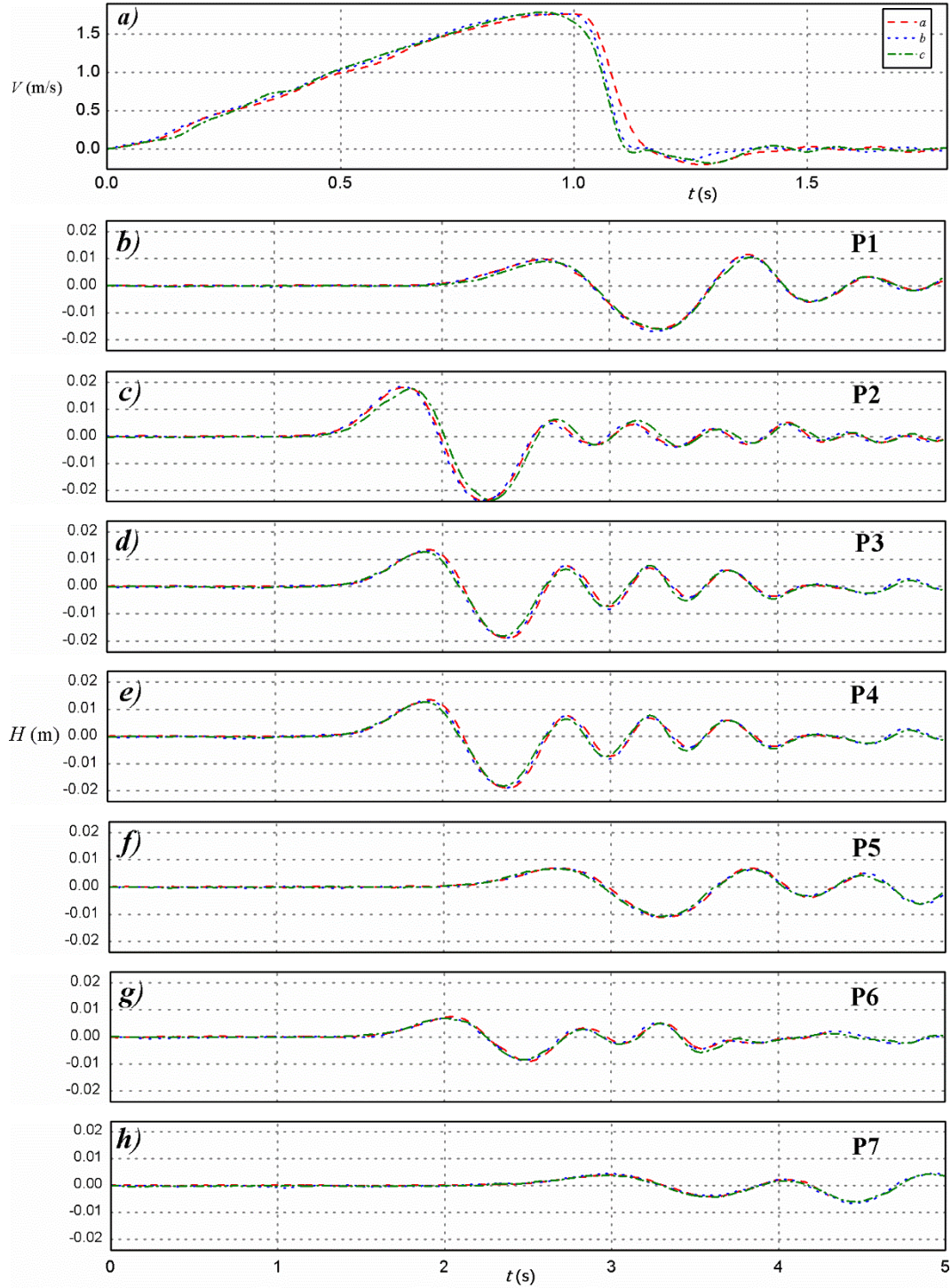


Figura 26. Resultados de la prueba de reproducibilidad, a) velocidad del bloque V (m/s), desplazamiento de la superficie H (m) en: b) P1, c) P2, d) P3, e) P4, f) P5, g) P6, h) P7.

La prueba de repetitividad además muestra que la variación de niveles de la superficie libre del agua no es significativamente diferente en cada punto de medición (P1 a P7) ubicados en la zona de estudio ($6 \leq X \leq 12$ y $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$), esto permite medir en diferentes puntos en experimentos con las mismas condiciones y tener la certeza que se realiza el mismo tratamiento. Por lo anterior, se repite cada tratamiento con 6 SMNA colocados en cada una de las direcciones de propagación γ ; P1, P7, P13 y P19 de referencia, de la forma mostrada en la tabla 10 y fig. 27 (donde para cada valor de h se desplaza todo el arreglo de modo que P0 coincida con en el punto de impacto del bloque con la superficie libre).

Tabla 10. Ubicación general de los SMNA

Nodo				x (m)	X		
$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 60^\circ$	$\gamma = 90^\circ$		$h = 0.2$ m	$h = 0.3$ m	$h = 0.4$ m
P1	P7	P13	P19	0.9	4.5	3	2.25
P2	P8	P14	P20	1.2	6	4	3
P3	P9	P15	P21	1.8	9	6	4.5
P4	P10	P16	P22	2.4	12	8	6
P5	P11	P17	P23	3.0	15	10	7.5
P6	P12	P18	P24	3.6	18	12	9

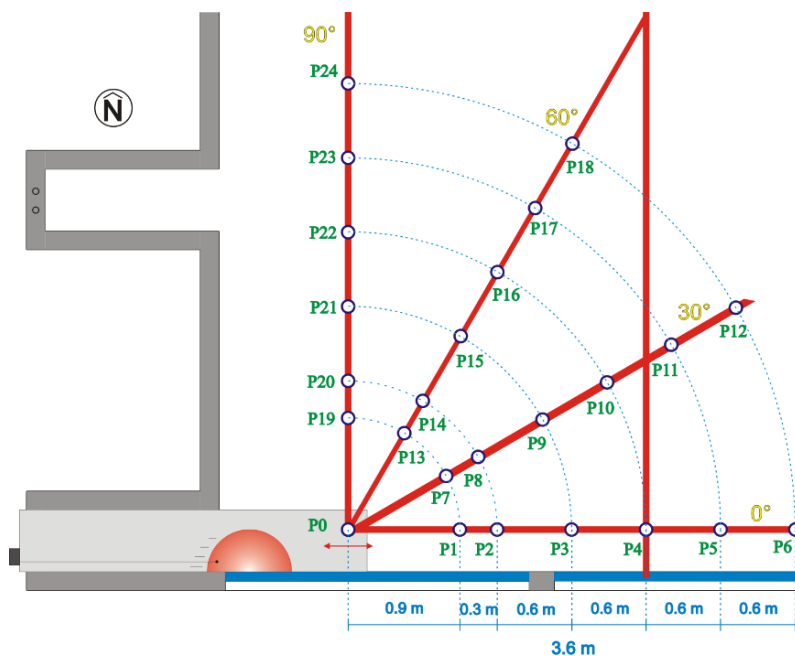


Figura 27. Ubicación general de los SMNA

7. RESULTADOS

En las secciones 7.1, 7.2 y 7.3 se estudia la influencia de: la profundidad, la dirección de propagación y la porosidad en los eventos sub aéreos. En la sección 7.4 se ensaya con la posición inicial del bloque, con pruebas sub aéreas, semi sumergidas y una sumergida. En la sección 7.5 se comparan los resultados de otros estudios y se ajustan expresiones para determinar las características de la primera onda, que son aplicadas a tres eventos históricos en la última sección.

7.1. Influencia de la profundidad

En este estudio se utilizan los tratamientos con $h = 0.2$ m (A003220-68), $h = 0.3$ m (A003230-68) y con $h = 0.4$ m (A003240-68), primero se muestra la comparación del desplazamiento y velocidad del bloque en la fig. 28; después la interacción del bloque con el agua en la fig. 29 con una secuencia de imágenes obtenida con la CAV y finalmente como se perturba la superficie libre del agua en la fig. 30. Los tratamientos utilizados tienen los mismos otros parámetros $n = 0.0$, $G_s = 1.84$, $Vol_s = 0.017$ m³, $z_i = -0.68$ m, y despreciablemente diferente $V_s = 1.55$ m/s en $t = 0.84$ s (con $h = 0.2$ m), $V_s = 1.73$ m/s en $t = 0.84$ s (con $h = 0.3$ m), $V_s = 1.78$ m/s en $t = 0.83$ s (con $h = 0.4$ m), fig. 28b.

La fig. 28 muestra la dinámica del bloque (con t medido a partir del instante en que este se libera este), donde en los tres diferentes tratamientos, las posiciones z y velocidades V del boque son muy similares hasta el instante en que el bloque llega al final de la rampa y se detiene, esto ocurre primero con $h = 0.2$ m, después con $h = 0.3$ m y finalmente con $h = 0.4$ m.

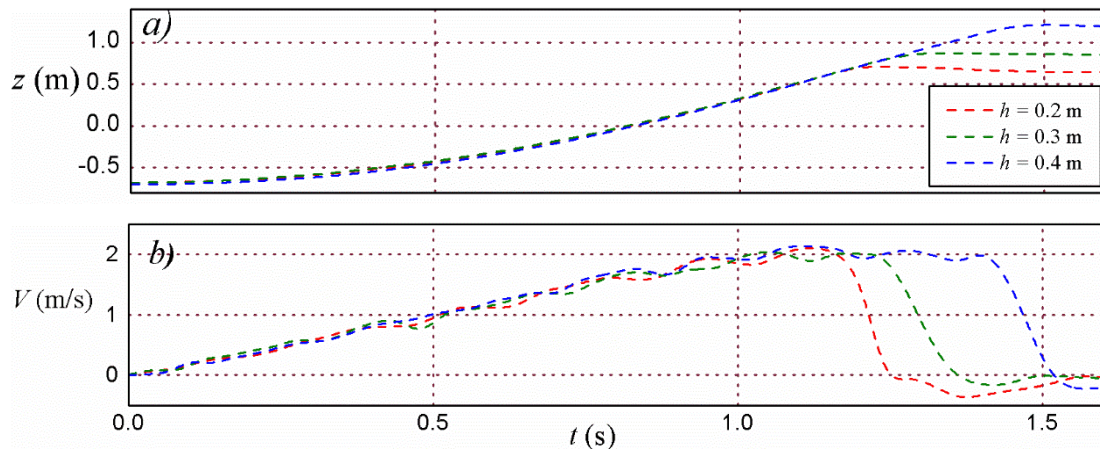


Figura 28. Influencia de la profundidad en la dinámica del bloque, pruebas A003220-68, A003230-68 y A003240-68, a) desplazamiento $z(t)$, b) velocidad $V(t)$.

La interacción del bloque en movimiento con el agua se estudia con ayuda de las imágenes obtenidas con la CAV y que se resumen en una cronología de imágenes a cada 0.1 s, en las figs. 29a a 29f ($h = 0.3$ m) y 29g a 29l ($h = 0.4$ m), con $t = 0$ s cuando el bloque impacta la superficie libre. Las figs. 29b y 29h son muy similares, donde solo una parte del bloque está sumergida y en la superficie libre comienza a formarse la cresta de la primera onda. En las imágenes posteriores (29c y 29i) el bloque continúa en movimiento y sobre él se forma un cráter que contiene en su interior una bolsa de aire, y en su frontera una mezcla violenta de aire-agua.

En la siguiente secuencia, con $h = 0.3$ m el bloque al llegar al final de su movimiento (fig. 29d) y el cráter colapsa detrás del bloque para definir lo que será el valle de la onda; mientras que con $h = 0.4$ m el bloque aún continúa en movimiento y el cráter ha disminuido su tamaño (fig. 29j). En la fig. 29e con $h = 0.3$ m el agua ya ha ocupado el espacio previamente desplazado por el bloque aunque aún hay presencia burbujas y turbulencia, con $h = 0.4$ m el bloque llega al final de su movimiento y el cráter colapsa (fig. 29k). En la última secuencia, en $h = 0.3$ m una parte del bloque queda fuera del agua y se ha definido el valle de la onda; con $h = 0.4$ m se observa turbulencia y burbujas en el primer valle con un bloque completamente sumergido.

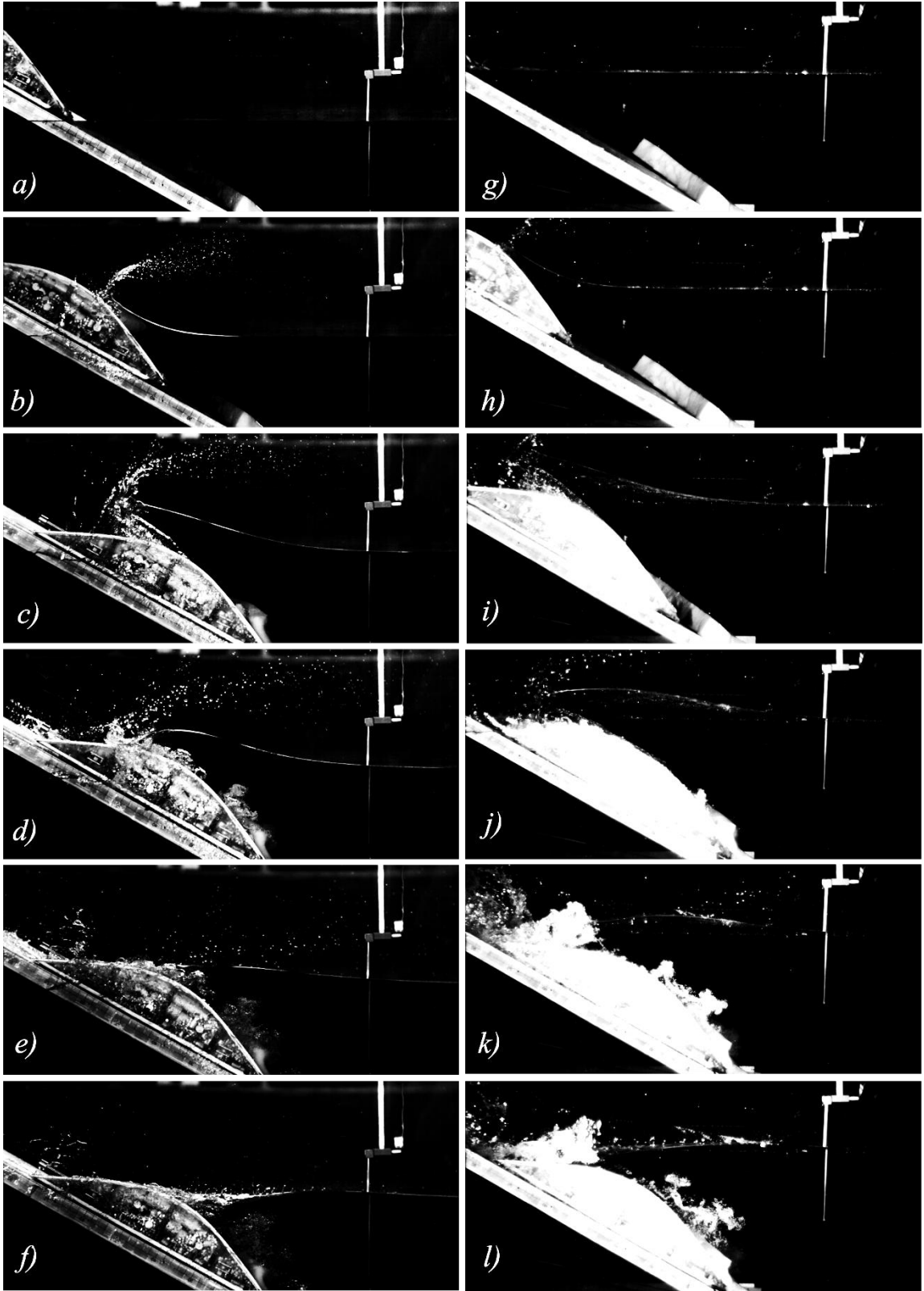


Figura 29. Serie de imágenes con un incremento de tiempo 0.1 s que muestran la influencia de la profundidad, a-f) tratamiento A003230-68 ($h = 0.3$ m), g-l) tratamiento A003240-68 ($h = 0.4$ m).

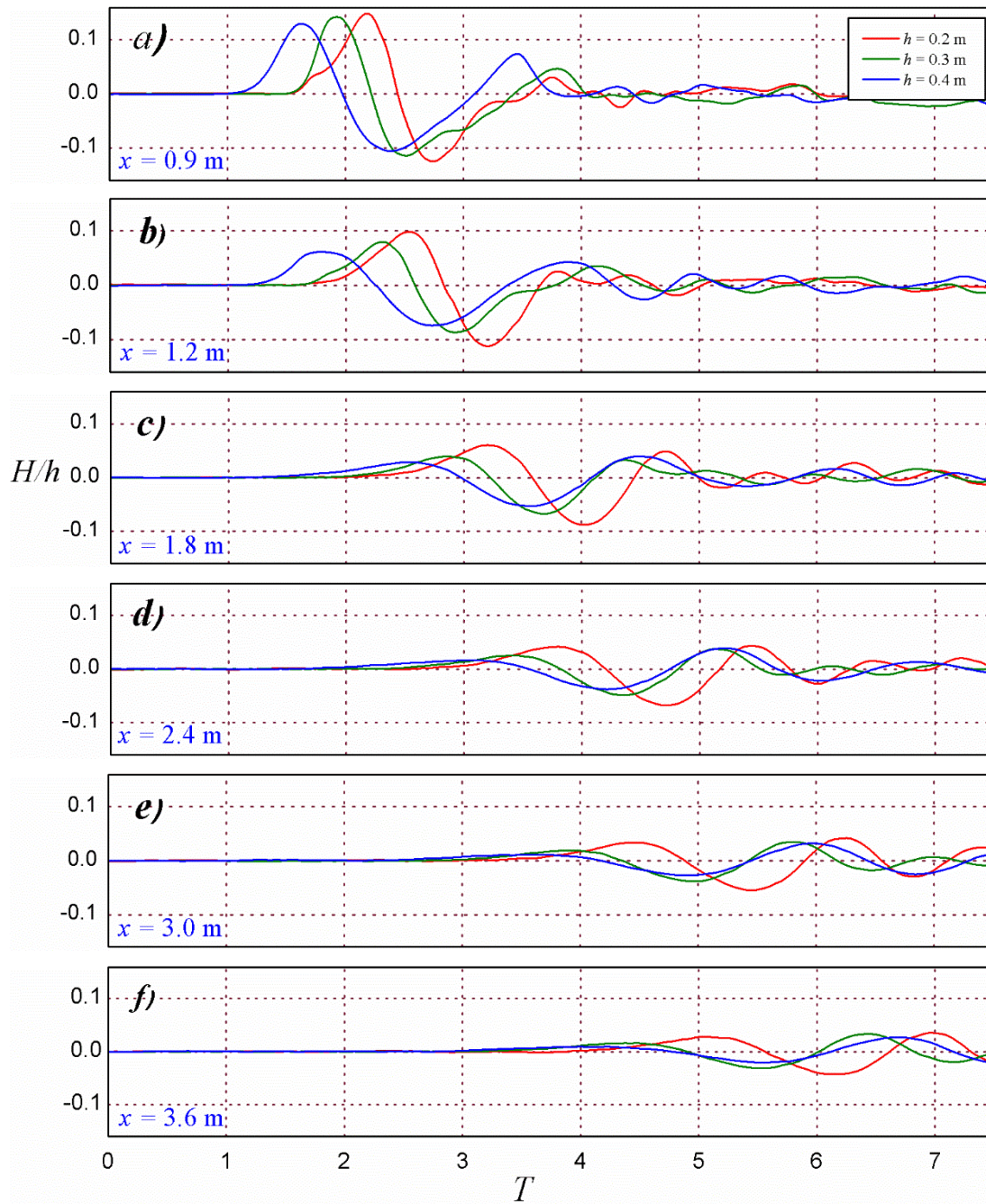


Figura 30. Influencia de la profundidad en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs el tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en $\gamma = 0^\circ$, a) $x = 0.9$ m, b) $x = 1.2$ m, c) $x = 1.8$ m, d) $x = 2.4$ m, e) $x = 3.0$ m, f) $x = 3.6$ m.

7.2. Influencia de la dirección de propagación

Desde una vista superior se muestra como el movimiento del bloque forma las ondas, con la secuencia de imágenes de la fig. 31 del tratamiento A003230-68. Posteriormente, con la fig. 32 se compara el desplazamiento relativo de la superficie H/h para las diferentes direcciones y distancias relativas en la fig. 32.

La cresta de la primera onda aparece como consecuencia directa del empuje del bloque en la figs. 31*b* a 31*d*, posteriormente el primer valle aparece en la fig. 31*e* cuando el bloque ya ha concluido su movimiento y el agua se desplaza para ocupar el espacio detrás del bloque, siendo de mayor magnitud en $\gamma = 0^\circ$ y disminuyendo hacia $\gamma = 90^\circ$, también puede verse en la fig. 32*a*. La segunda onda y el tren de ondas posteriores es consecuencia de la fuerza gravitacional que intenta restaurar la superficie del agua perturbada previamente por el bloque, y esta agua ocupa el espacio vacío detrás del bloque (figs. 31*e* a 31*i* y 32*a*).

En el punto más cercano de la zona de generación en $X = x/h = 3$, en cualquiera de las direcciones $\gamma = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ o 90° (fig. 32*a*), la primera cresta es la mayor, pero al propagarse sufre una mayor amortiguación (figs. 32*b* a 32*f*), mientras que la segunda cresta se mantiene casi constante. La diferencia de las H/h por el decaimiento de las ondas entre el primer y el último punto ($X = 3$ a $X = 12$) es de 75% en $\gamma = 0^\circ$, 67% en $\gamma = 30^\circ$, 70% en $\gamma = 60^\circ$ y 30% en $\gamma = 90^\circ$. La H/h siempre es mayor en la dirección del movimiento del bloque $\gamma = 0^\circ$, en $X = 3$ es 37% mayor que en $\gamma = 30^\circ$, 58% mayor que en $\gamma = 60^\circ$, y 81% mayor que en $\gamma = 90^\circ$.

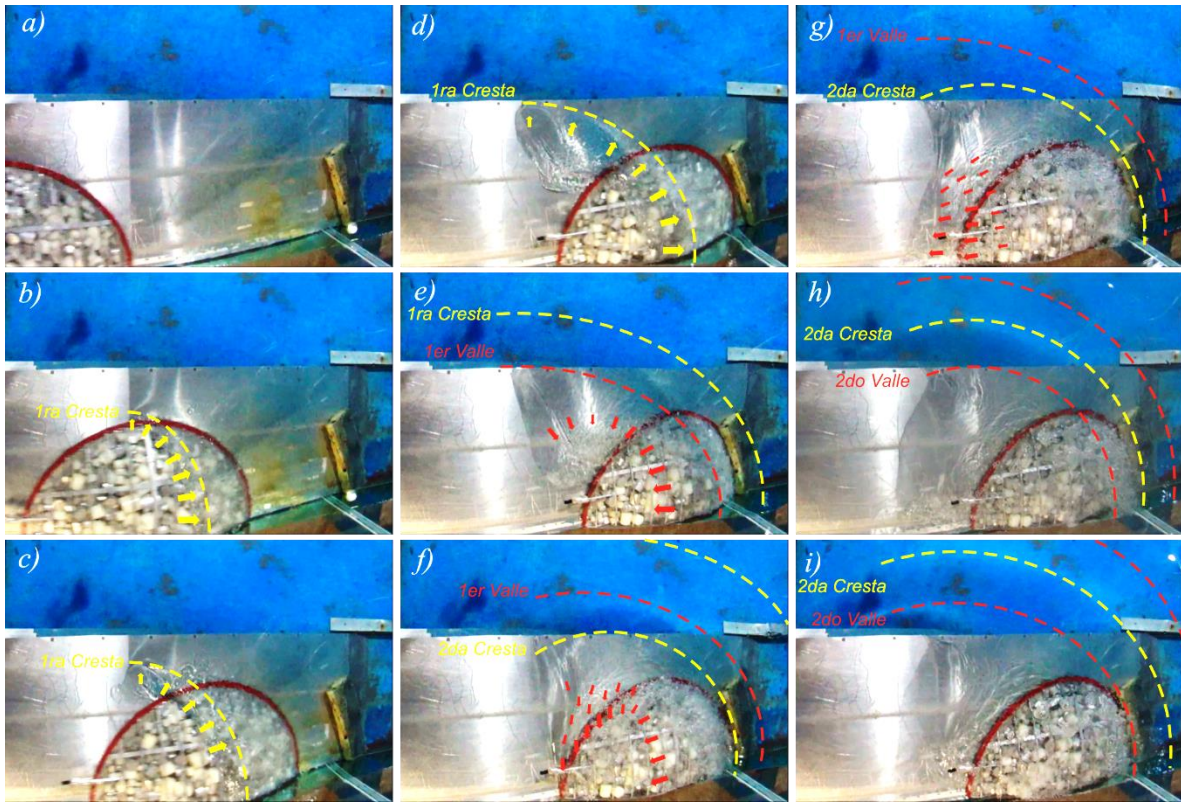


Figura 31. Secuencia de imágenes con un incremento de tiempo de 0.06 s de la vista superior de la formación de las ondas en el tratamiento A003230-68, a) impacto del bloque con la superficie del agua, b) c) d) desplazamiento del agua por el bloque, e) final del movimiento del bloque e inicio del movimiento del agua para restaurar la superficie libre, f) propagación de las ondas y continuación de la restauración de la superficie libre, g) colapso del hueco generado detrás del bloque, h) i) formación del segundo valle y subsecuente tren de ondas.

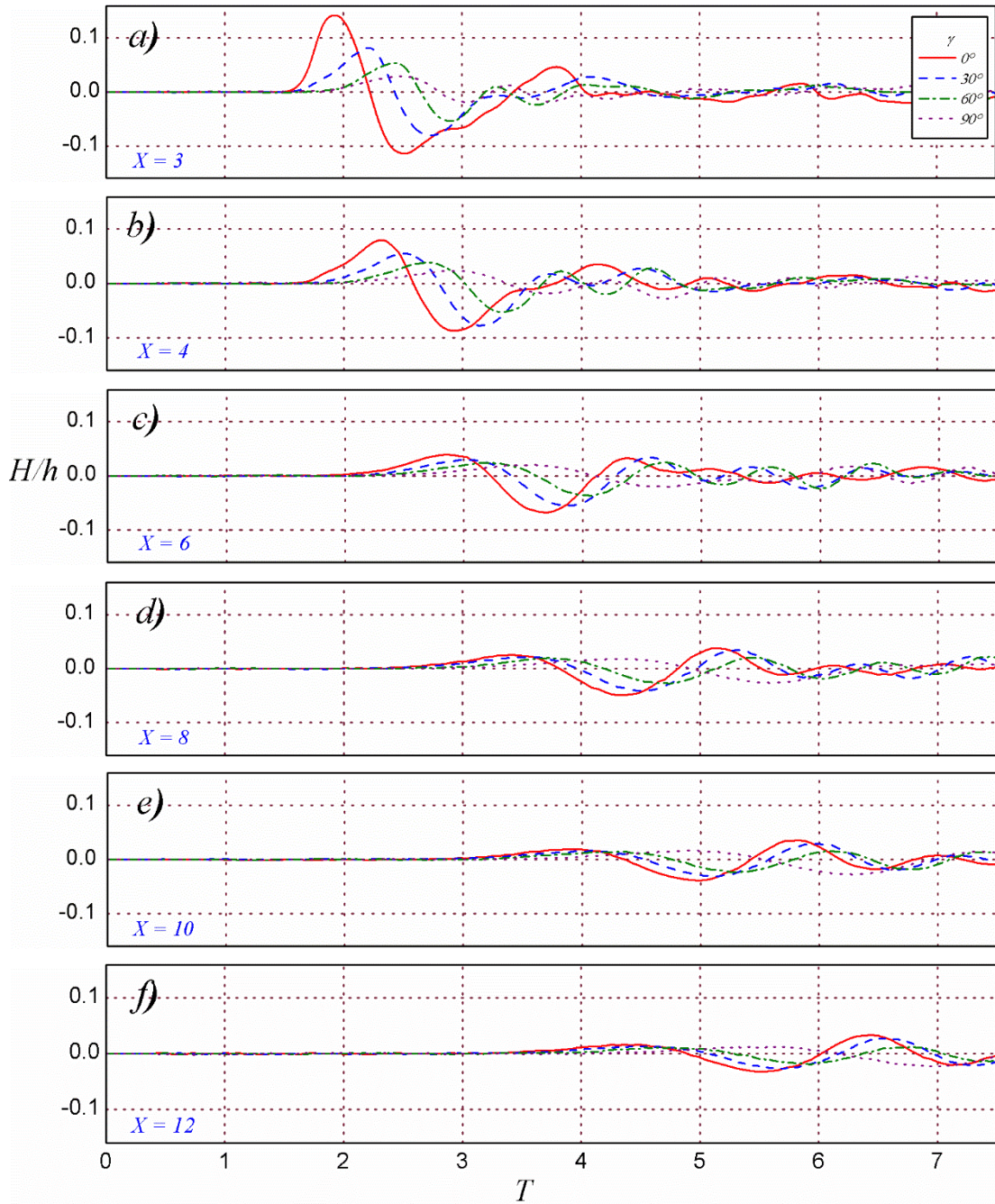


Figura 32. Influencia de la dirección de propagación γ (0° , 30° , 60° y 90°) en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs el tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$, a) $X = 3$, b) $X = 4$, c) $X = 6$, d) $X = 8$, e) $X = 10$, f) $X = 12$.

7.3. Efecto de la porosidad

El tratamiento con el bloque sin porosidad $n = 0$ fue la A003230-68 y con porosidad $n = 0.25$ fue la B253230-38. Primero se muestra en la fig. 33 como la porosidad modifica la dinámica del bloque, posteriormente en la secuencia de imágenes de la fig. 34 se ilustra como el bloque penetra en el agua e impulsa la formación de las ondas, finalmente en la fig. 35 se compara dichas ondas formadas por el bloque no poroso.

El desplazamiento y velocidad de los bloques es muy similar fuera del agua ($0.68 \text{ m} < z_i \leq 0 \text{ m}$), pero a partir de impacto con la superficie libre (en $t = 0.84 \text{ s}$ con $V_s = 1.73 \text{ m/s}$ y $V_s = 1.53 \text{ m/s}$ respectivamente) son diferentes; donde el bloque poroso tiene una mayor desaceleración, implicando alcanzar una menor velocidad máxima $V_M = 1.86 \text{ m/s}$ y un mayor T_s , mientras que el otro bloque alcanza una $V_M = 2.05 \text{ m/s}$, ver fig. 33.

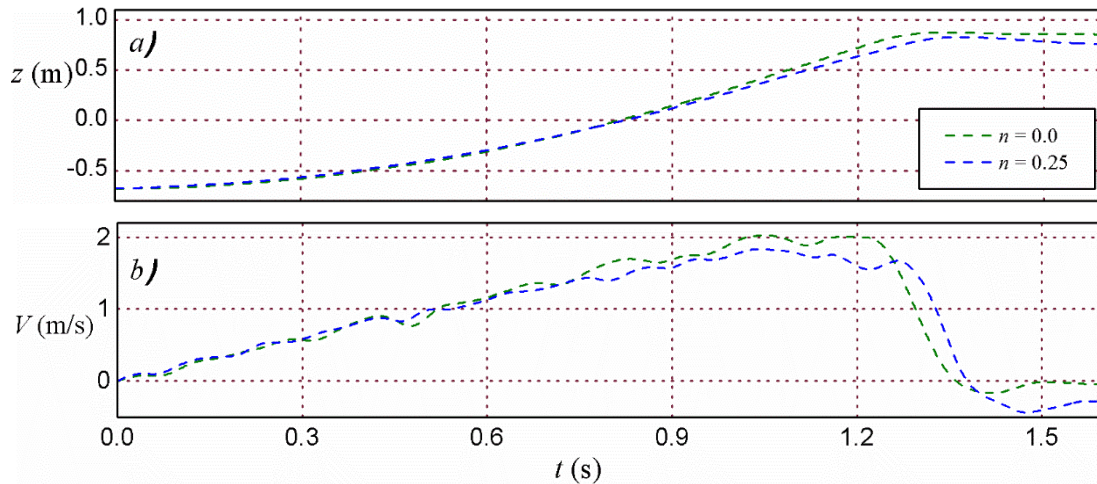


Figura 33. Efecto de la porosidad en la dinámica del bloque, tratamiento A003230-68 y B253230-68, a) desplazamiento $z(t)$, b) velocidad $V(t)$.

Las figs. 34a y 34g exponen el instante en que los bloques tocan la superficie libre del agua. Al instante, el agua penetra en los poros del bloque, (fig. 34h), lo que produce un fenómeno complejo que disipa más energía cinética con respecto al no poroso (fig. 34b); por lo anterior, el bloque poroso se desacelera más rápido (fig. 33) y penetra menos en el agua. En las secuencias posteriores (figs. 34i y 34j) el bloque poroso genera un cráter muy pequeño y apenas perceptible dentro del agua, en comparación con el cráter de mayor magnitud formado por el bloque no poroso (figs. 34c y 34d). El agua ubicada por arriba del cráter colapsa de forma menos brusca con el bloque poroso (figs. 34j y 34k), porque ocurre desde una menor altura y esto define de una forma más regular el valle de la primera onda (figs. 34a y 34b).

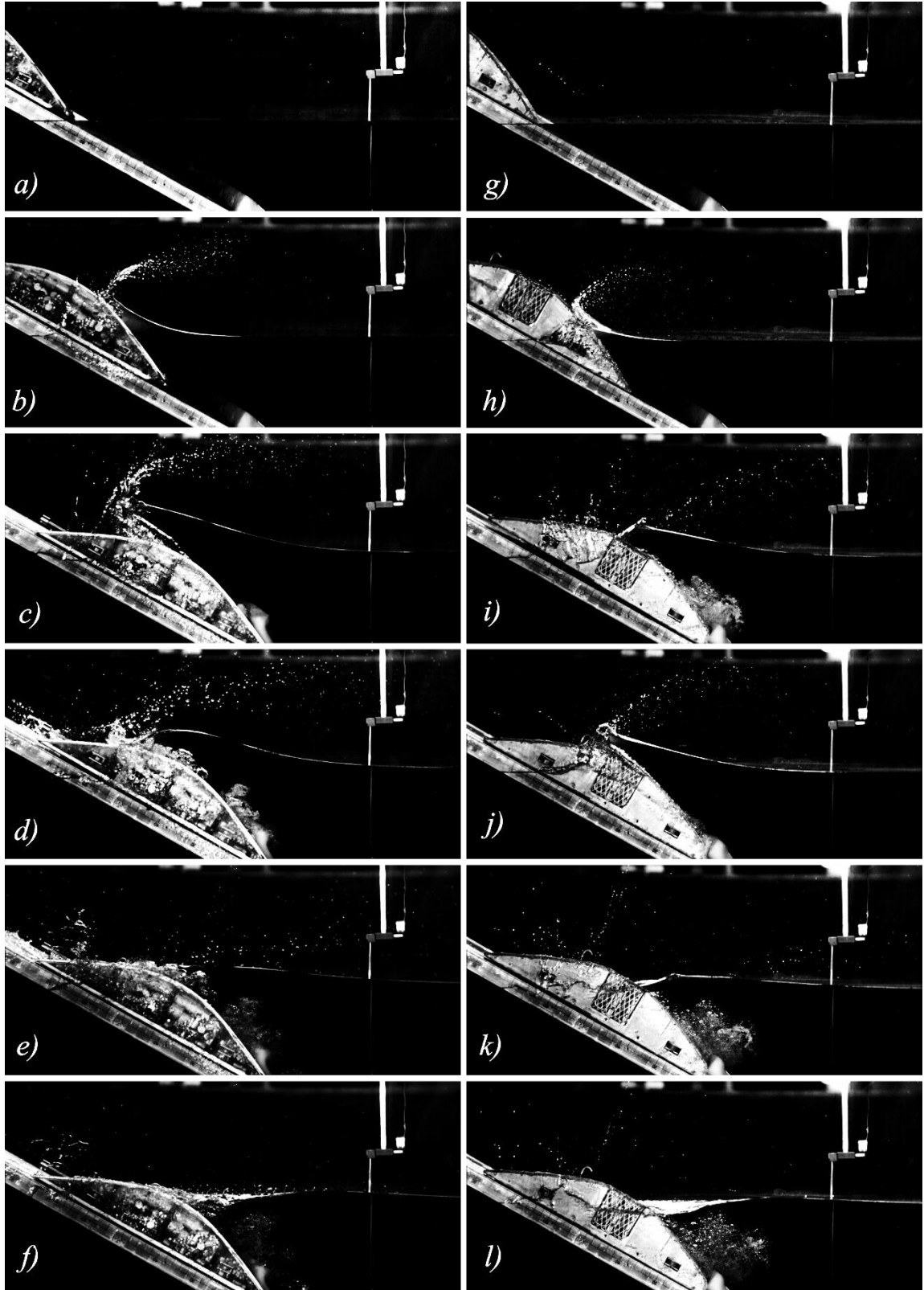


Figura 34. Serie de imágenes con un incremento de tiempo 0.1 s que muestran la influencia de la porosidad, a-f) tratamiento A003230-68, g-l) tratamiento B253230-68.

La fig. 35 muestra H/h donde se distingue que en $\gamma = 0^\circ$ y 30° la cresta de mayor magnitud (12% y 26%) es provocada por el bloque no poroso, pero el valle de mayor magnitud (13% y 8%) es provocado por el bloque poroso. En las direcciones $\gamma = 60^\circ$ y 90° las diferencias en la amplitud del valle y la cresta es menor. Lo antes mencionado se relaciona con que en $\gamma = 0^\circ$ se presenta un mayor flujo del agua hacia adentro del bloque en el medio poroso, y esto disminuye cuando $\gamma \rightarrow 90^\circ$.

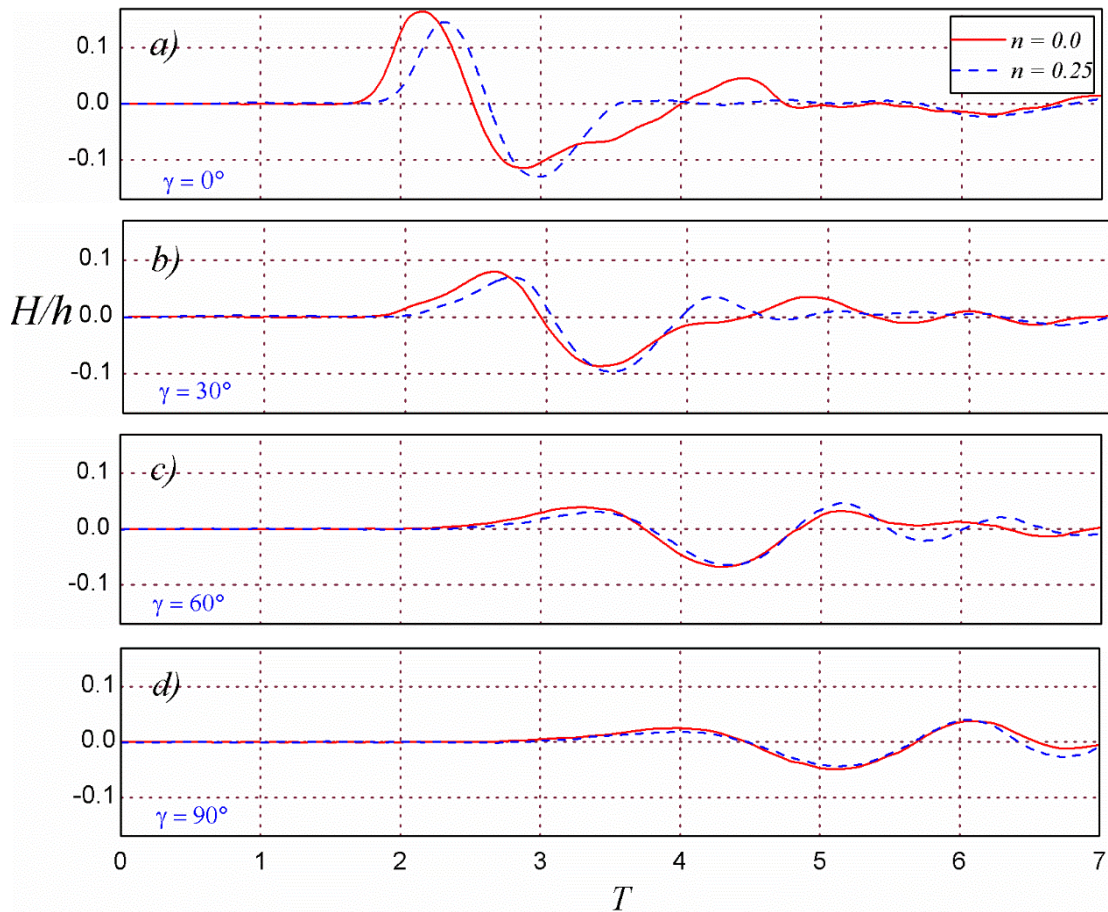


Figura 35. Influencia de la porosidad n en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en las pruebas A003230-68 y B253230-68, a) P1, b) P7, c) P13, d) P19.

7.4. Influencia de la posición inicial del bloque

En esta comparación son utilizados los tratamientos subaéreos A003240-98 ($z_i = -0.98$ m), A003240-68 ($z_i = -0.68$ m), A003240-34 ($z_i = -0.34$ m), A003240-28 ($z_i = -0.28$ m), A003240+00 ($z_i = 0.0$ m), los semisumergidos A003240+34 ($z_i = +0.34$ m) y A003240+68 ($z_i = +0.68$ m). Primero se muestran las diferencias en el desplazamiento z y la velocidad del bloque V , en la fig. 36; donde se observa que en los tratamientos subaéreos, cuanto más arriba inicia su movimiento el bloque, mayor es la V_S y la V_M (que se presenta con el bloque ya sumergido). Inmediatamente después del impacto, el bloque disminuye su velocidad pero después nuevamente la incrementa. Lo anterior es más notorio cuanto mayor es la V_S y se observa como una caída de la velocidad posterior al instante del impacto indicado con estrellas en la fig. 36b.

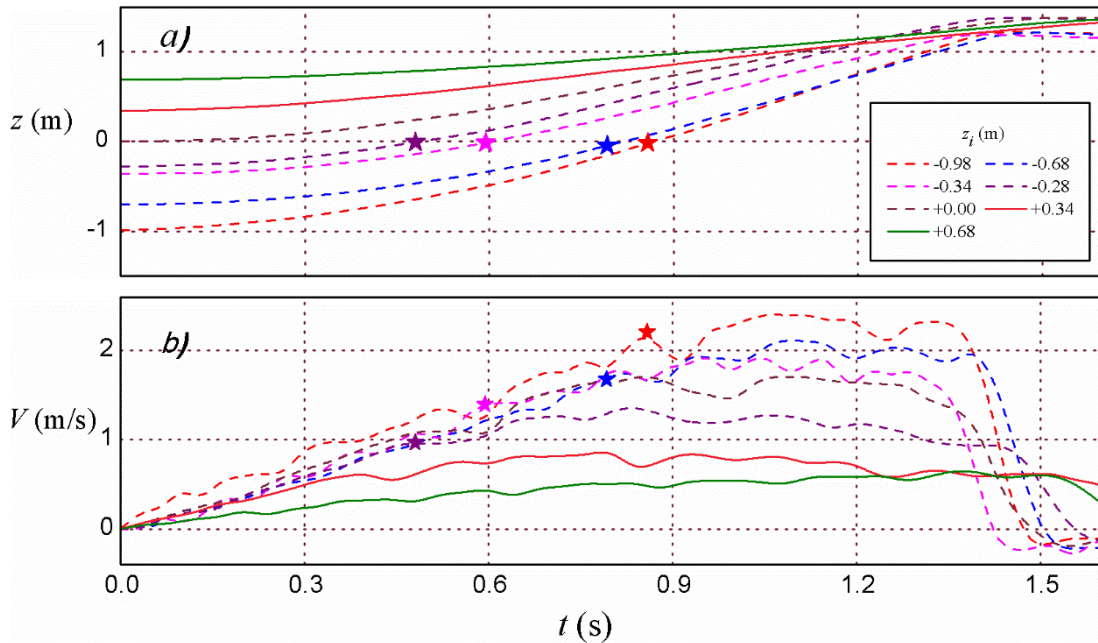


Figura 36. Dinámica del bloque con diferentes posiciones iniciales z_i , a) desplazamiento $z(t)$, b) velocidad $V(t)$. Los instantes en que ocurre el impacto se muestran con estrellas, cuando el bloque inicia subaéreo en líneas discontinua y semisumergido en línea continua.

La interacción del bloque con el agua se observó con la CAV y en la fig. 37 se muestra una secuencia de imágenes de las pruebas de interés. La primera imagen de las pruebas sub aéreas (fig. 37a_{i-d}) corresponde al instante en que el bloque toca la superficie libre del agua y ocurre la V_s , mientras que en las pruebas semisumergidas (fig. 37e_i y 37f_i) corresponden con el instante en que inicia el movimiento del bloque. Finalmente en la fig. 39 se muestra el desplazamiento relativo de la superficie H/h en las distancias relativas $X = 2.25, 3, 4.5, 6, 7.5$ y 9 , en la dirección $\gamma = 0^\circ$.

En las pruebas con las mayores V_s , se genera un cráter donde se separa el agua de la trayectoria del bloque (porque este desplaza el agua más rápido de lo que está es capaz de ocupar nuevamente el hueco generado); esta situación no se presenta cuando el bloque impacta a una menor V_s o inicia semisumergido. El cráter de mayor magnitud (fig. 37a_{iii-iv}) es del tratamiento A003240-98 con la mayor $V_s = 2.20$ m/s y $F = 1.11$ (la $V_M = 2.42$ m/s en $t = 0.80$ s), que colapsa en la fig. 37a_{v-vii} y que forma amplitud relativa de la primera cresta $a/h = 0.125$ (fig. 39a).

El cráter de la prueba A003240-68 es menor que en el tratamiento A003240-98 (fig. 37b_{iii-iv}) y colapsa más rápido (fig. 37a_{v-vii}), consecuencia de una menor $V_s = 1.68$ m/s, $F = 0.85$ ($V_M = 2.12$ m/s); sin embargo, genera una mayor $a/h = 0.130$ (fig. 39a). En las otras pruebas sub aéreas el agua se desplaza con una menor V_s y no se forma el cráter, porque el agua es capaz de moverse más rápido que el bloque y no permite generar huecos (figs. 37c_{i-vii} a 37e_{i-vii}). Con A003240-34 la $V_s = 1.40$ m/s, $F = 0.71$, $V_M = 1.99$ y la amplitud relativa de la primera cresta resulta mayor que en los casos anteriores $H/h = 0.139$. Con A003240-28 la $V_s = 1.10$ m/s, $F = 0.56$, $V_M = 1.72$ y la $H/h = 0.187$ también es mayor que las anteriores. En el tratamiento A003240+00 donde el bloque inicia frente a la superficie libre resulta la $V_s = 0$ m/s, $F = 0.0$, $V_M = 1.37$; y es la posición inicial del bloque en la que se genera el valor máximo de la $a/h = 0.210$ (fig. 39a).

En los tratamientos semisumergidos A003240+34 (fig. 37d_{i-vii}) y A003240+68 (fig. 37e_{i-vii}) el $H/h = 0.094$ y 0.069 disminuyen con una z_i más sumergida (fig. 38a), pero por el contrario la amplitud de la segunda cresta incrementa, fenómeno previamente observado por Di Risio *et al* (2009) en bloques semisumergidos. Entre las diferentes pruebas también se observa que las ondas generadas tienen diferente geometría; con A003240-98 y A003240-0.68 solo la forma de la primera cresta está bien definida (fig. 37a_{vi} y fig. 37b_{vi}); pero el primer valle no, porque su formación se ve interrumpida con el colapso del cráter de impacto. Con A003240-34 la primera cresta es la más robusta (contiene un mayor volumen de agua) con una mayor longitud. Con A003240+00 la primera cresta es la más esbelta, con forma de pico, pero con un valle más largo y de mayor magnitud (figs. 37d y 39a).

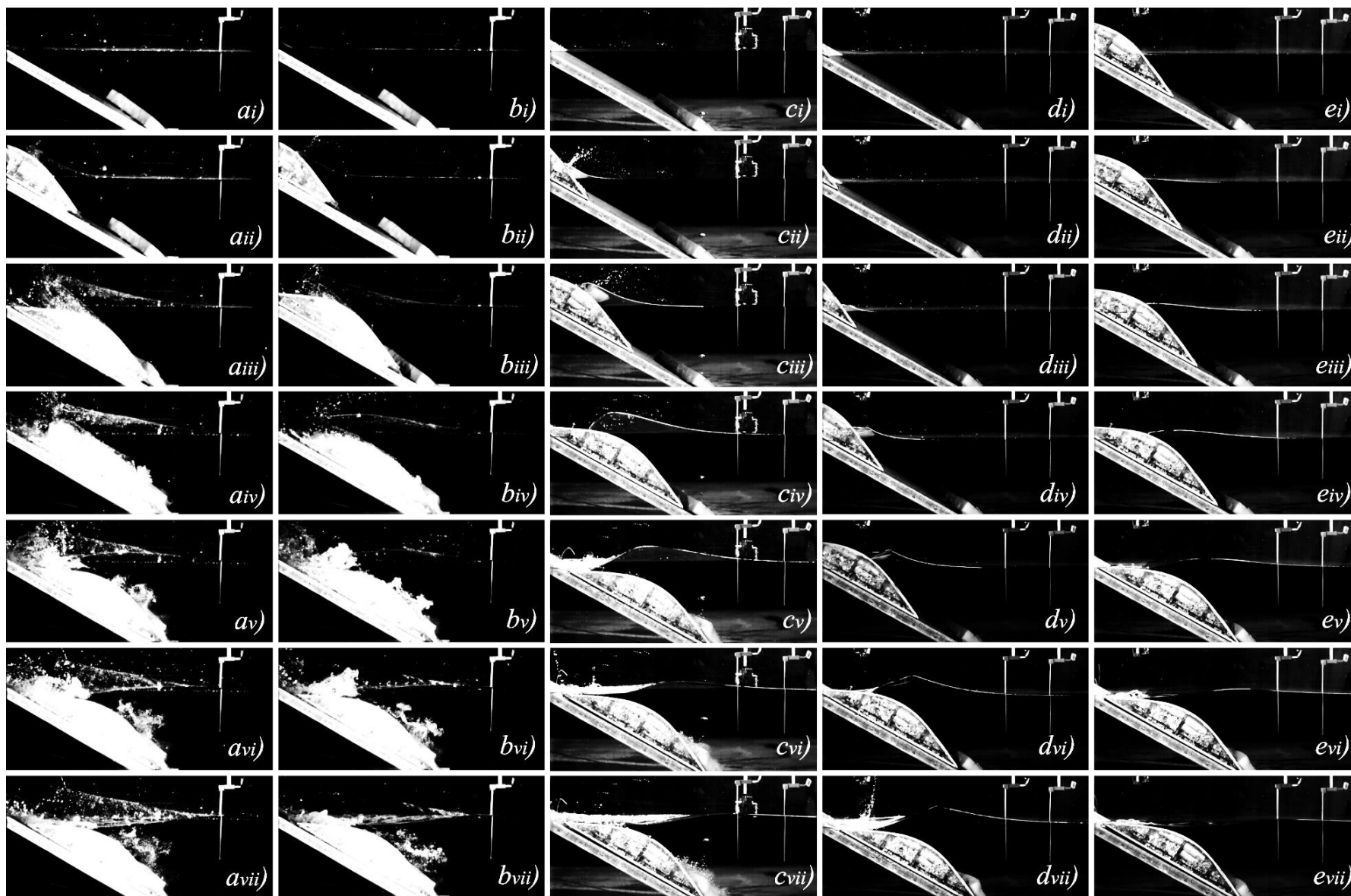


Figura 37. Serie de imágenes con un $\Delta t = 0.1$ s que muestran la influencia de la posición inicial del bloque z_i , a_i-a_{vii}) A003240-102, b_i-b_{vii}) A003240-68, c_i-c_{vii}) A003240-34, d_i-d_{vii}) A003240+00, e_i-e_{vii}) A003240+34.

Las figs. 39a y 38b muestran que en la zona de generación en los experimentos subaéreos, la disminución de z_i implica un incremento del H/h , hasta alcanzar un máximo en $z_i = 0.0$ m, donde la primera cresta y el primer valle son los de mayor magnitud. Cuando el bloque inicia más y más sumergido, las primeras crestas disminuyen de magnitud y las segundas aumentan, pero con ondas de mayor longitud. Al avanzar las ondas (de $X = 2.25$ a $X = 9$) las primeras crestas decaen más que las segundas, en especial aquellas de mayor magnitud, ver figs. 39a a 39f.

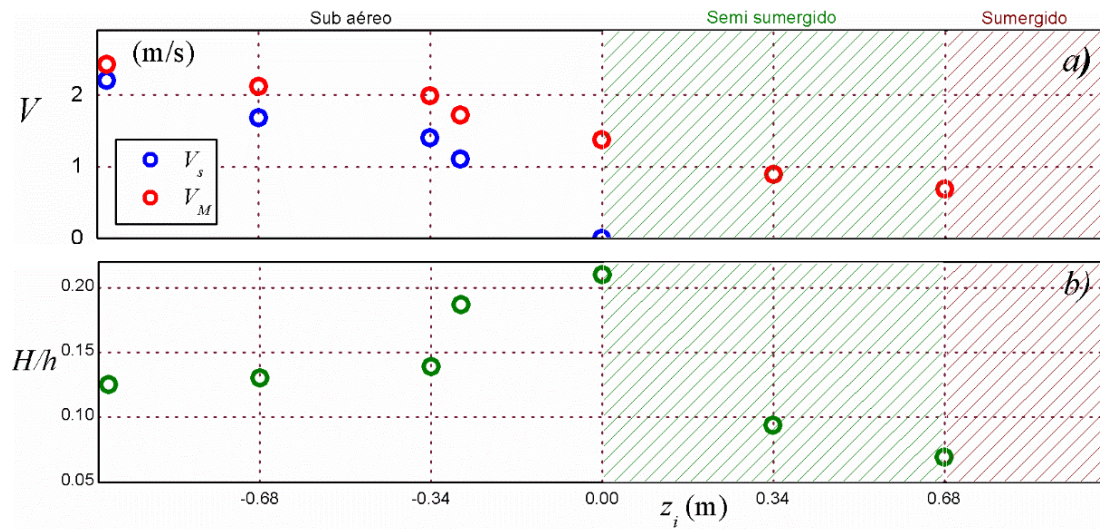


Figura 38. Influencia de la posición inicial del bloque z_i , a) la velocidad de impacto V_s y máxima V_M , b) el desplazamiento relativo de la superficie H/h .

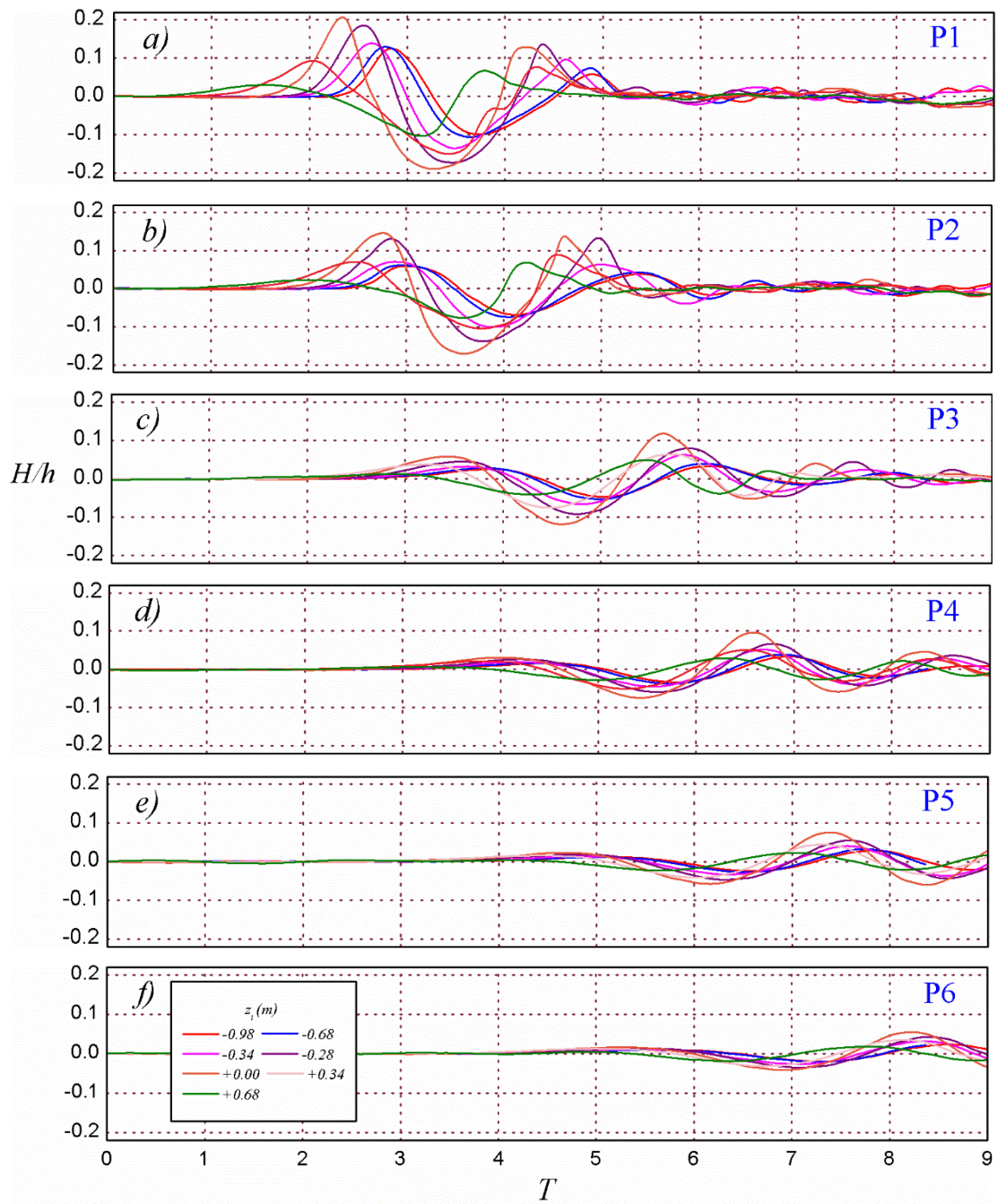


Figura 39. Influencia de la posición inicial z_i en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en: a) P1, b) P2, c) P3, d) P4, e) P5, f) P6.

7.5. Resultados subaéreos comparados con estudios previos

Amplitudes de onda

La fig. 40 compara los datos experimentales del desplazamiento relativo de la superficie H/h (medido sobre $\gamma = 0^\circ$) vs las ecs. 2D, la 4 (Kamphuis y Bowering, 1972), 14 (Di Rasio, 2005), 15 (Huber y Hager, 1997) y 23 (Heller *et al*, 2009). La ec. 4 sobrestima todos los valores, por el contrario la ec. 14 los subestima. La ec. 15 sobrestima los datos de la zona lejana a la generación, pero subestima los de la zona de generación. La ec. 23 tiene la mayor dispersión ($R = 0.158$) y sobrestima en mayor medida los valores correspondientes a la menor profundidad ($h = 0.2$ m) y en menor medida los de mayor profundidad ($h = 0.4$ m).

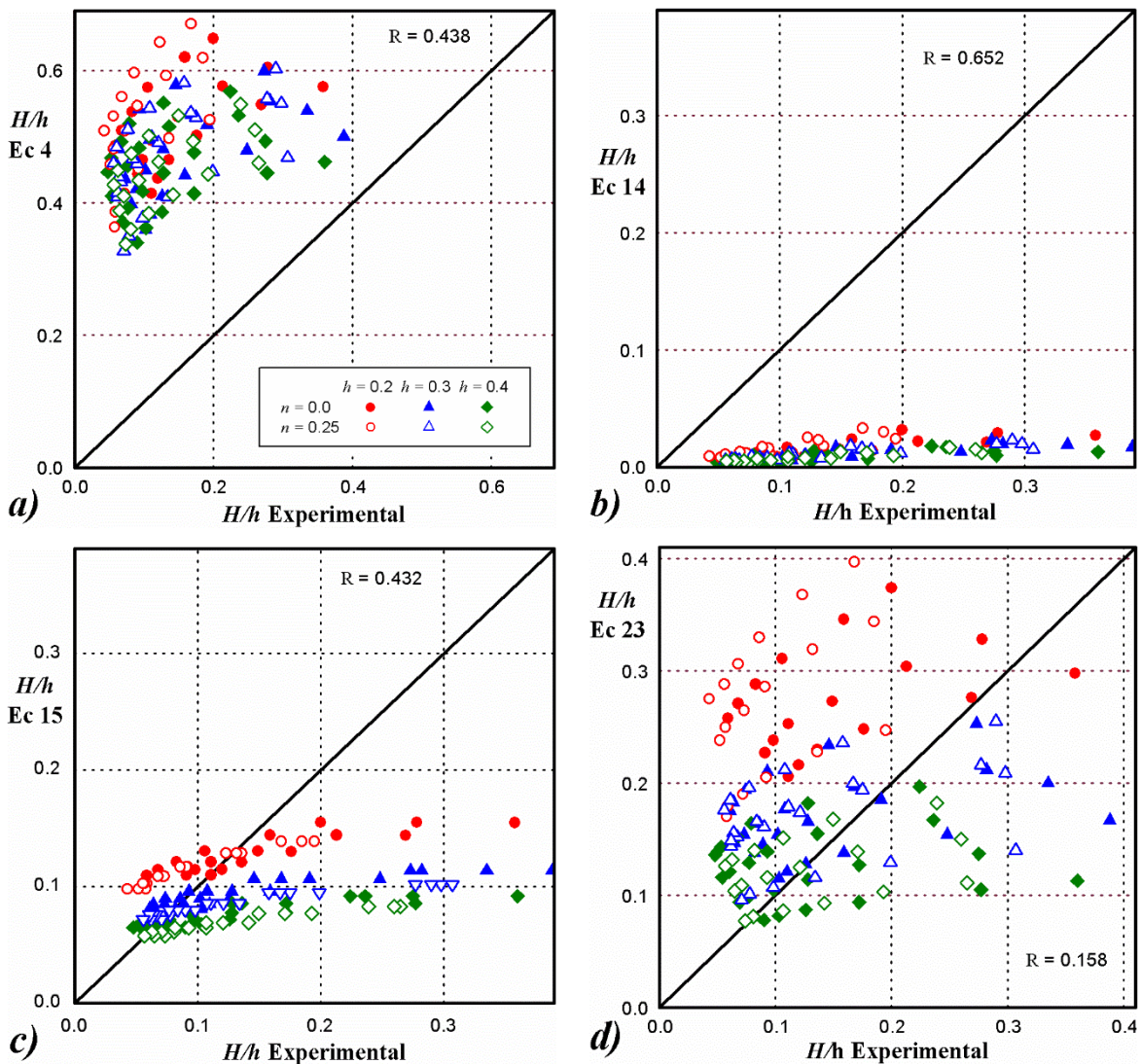


Figura 40. Comparación del desplazamiento relativo de la superficie experimental vs ecs. 2D, a) Kamphuis y Bowering (1972), b) Di Rasio (2005), c) Huber y Hager (1997); d) Heller (2007).

Las expresiones 3D reportadas en la literatura, son la 12 (Panizzo *et al*, 2005a), 25 (Huber y Hager, 1997) y 27 (Mohammed y Fritz, 2012) y se comparan con los resultados experimentales en la fig. 41. La ec. 12 es afectada por la profundidad: sobrestima a menor profundidad y viceversa, ver fig. 41a. La ec. 25 tiene la mejor correlación ($R = 0.870$), pero subestima los valores de mayor magnitud correspondientes a la zona de generación, ver fig. 41b. La ec. 27 sobrestima la mayoría de los valores, pero en la dirección ortogonal al movimiento del bloque ($\gamma = 90^\circ$) son cero y esto contradice los valores medidos.

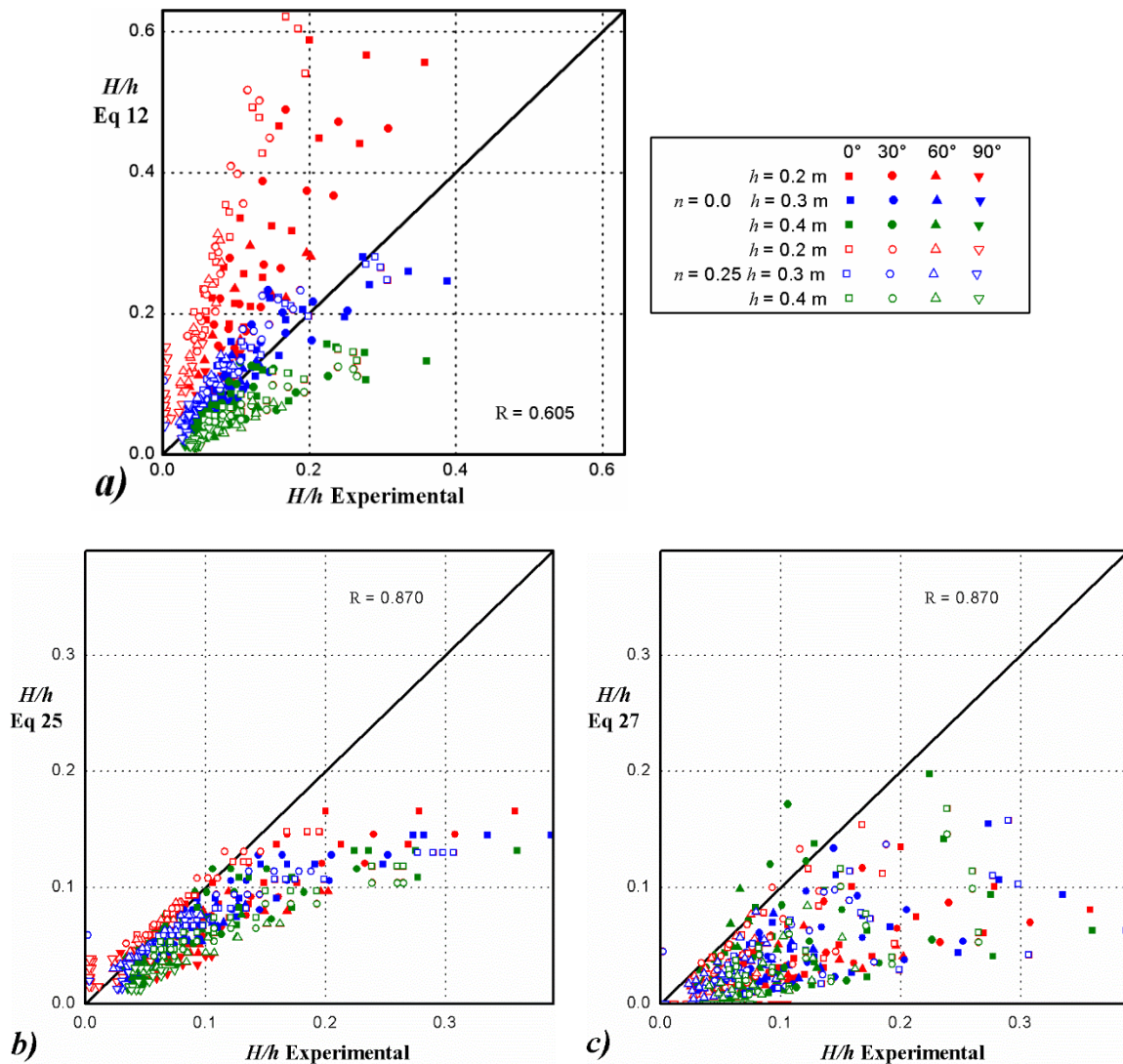


Figura 41. Desplazamiento relativo de la superficie H/h en 3D, experimental vs ecs, a) Panizzo *et al* (2005a), b) Huber y Hager (1997), c) Mohammed y Fritz (2012).

Alturas de onda

Las ecs. obtenidas en 2D para estimar las alturas de onda de la primera cresta son la 9, 18 y 22. En este caso la la ec. 9 presume la menor dispersión de los datos ($R = 0.652$). La otras dos expresiones manifiestan gran dispersión general de los datos, aunque se agrupan en función de la profundidad h .

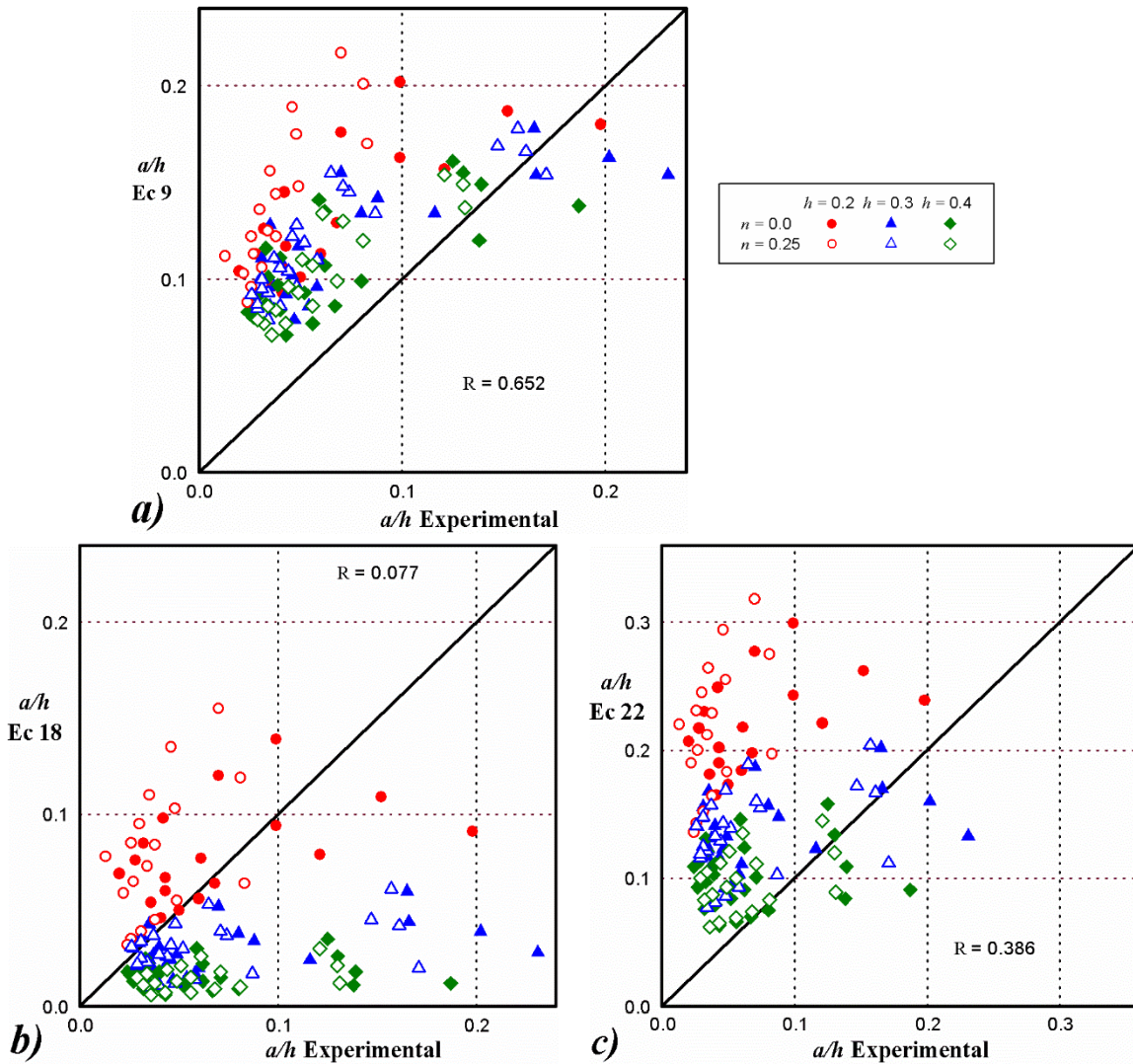


Figura 42. Alturas de onda a/h en 2D, experimentales vs ecs, a) Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a), b) Zweifel (2004), c) Heller et al (2009).

En 3D se tienen las ecs. 10 y 26; la primera sobrestima los valores de menor profundidad, con $h = 0.3$ m y 0.2 m. La ec. 26 subestima los valores, sobre todo los de mayor magnitud medidos en la zona de generación, ver fig. 43b.

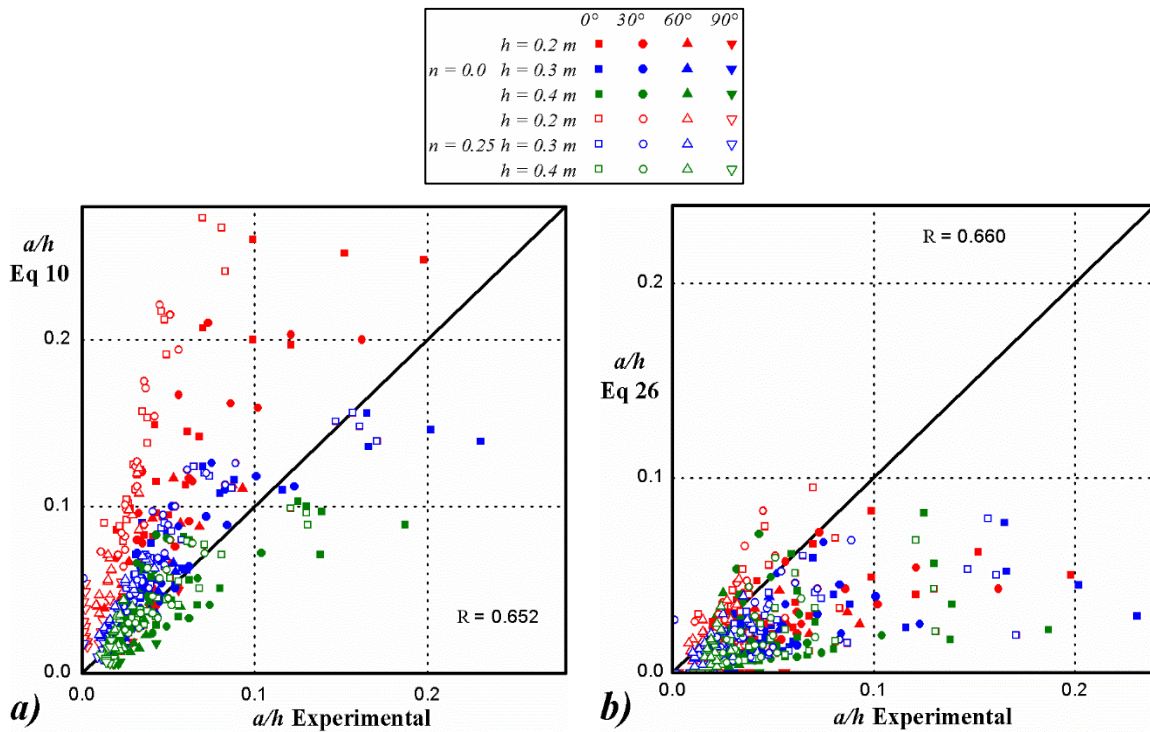


Figura 43. Alturas de onda a/h en 3D, experimentales vs ecs, a) Panizzo et al (2005a), b) Mohammed y Fritz (2012).

En general, los datos experimentales resultaron tener alturas de onda mayores a los de la expresión 2D de Kamphuis y Bowering (1972), lo mismo ocurre para las expresiones de 2D y 3D de Huber y Hager (1997); todas estas obtenidas en experimentos con bloques deformables granulares (ver sección 4.3). Los valores de la expresión 3D de Panizzo et al (2005a) son los de menor error, pero ligeramente mayores; esto puede deberse a que la geometría utilizada fue rígida y rectangular. Las amplitudes de onda con la expresión 2D de Zweifel (2004) se dispersan y sin mostrar alguna tendencia. Con la expresión de Panizzo et al (2005a) los valores en general son subestimados y de igual forma con las alturas de las ondas; esta diferencia puede deberse a que los experimentos de Panizzo et al (2005a) fueron con bloques deformables de material granular.

8. PROPUESTA DE ECUACIONES EMPÍRICAS

Las expresiones que describen los resultados experimentales fueron obtenidas con tres criterios: 1) análisis de los parámetros estudiados y usados en expresiones de otros autores; 2) medir la correlación de cada parámetro con respecto a la variable a describir; 3) optimizar los coeficientes de cada parámetro. Los parámetros utilizados por otros autores se agrupan en:

Geométricos

L , S , B y A_b influyen en cómo el bloque desplaza el agua. Estos parámetros se relacionan entre sí y basta con considerar alguno o un par de ellos en las ecuaciones. En el presente trabajo no se estudian estos parámetros, pero se consideran los resultados de Di Risio (2005), Zweifel (2004), Fritz *et al* (2004), Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a y 2008b), Heller *et al* (2009) y Mohammed y Fritz (2012), que determinaron que la S es el parámetro geométrico más importante.

Masa y Volumen

El Vol_s^* , la M y la G_s se relacionan entre sí e influyen en la cantidad de inercia que posee el bloque, porque contiene la cantidad de materia que impulsa el agua y forma las ondas. La n del bloque implica la aparición del Vol_g^* y de la G_g que afectan la formación de las ondas, ver sección 7.3; por tanto es importante considerarla, como lo hacen Huber (1980) y Huber y Hager (1997).

Decaimiento

Panizzo *et al* (2005a) utilizan $exp^{cte \cos \gamma}$ como término de decaimiento radial, Huber (1980) utiliza $\cos^2(cte \gamma)$, Mohammed y Fritz (2012) emplea únicamente $\cos \gamma$ (que genera valores nulos en $\gamma = 90^\circ$). El decaimiento con la distancia, de la forma X^{-cte} , es utilizado por Di Risio (2005), Panizzo *et al* (2005a), Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a y 2008b), Heller *et al* (2009) y Huber (1980).

El ajuste de los coeficientes de la expresión propuesta a los datos subaéreos experimentales se realizó con las herramientas de optimización de MatLab®, donde la función objetivo fue minimizar el error estándar de ajuste EE , ver ec. 30. El resolutor utilizado fue el *fmincon* acompañado del algoritmo *true region reflective*.

$$EE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Nd} (y_i - \hat{y}_i)^2}{Nd - Np}} \quad (30)$$

donde y_i es el valor del dato, \hat{y}_i es el valor estimado, Nd es el número de datos y Np es el número de parámetros de la ecuación que se ajusta. A continuación se muestran las ecs. ajustadas para H/h , a/h y para la amplitud del primer valle a_v/h con sus respectivos residuos (figs. 44 a 46).

$$\frac{H}{h} = 1.27S^{0.18}Vol_g^{*0.44}G_g^{2.09}F^{-0.34}\sin\alpha\cos^2(0.68\gamma)X^{-0.86} \quad (31)$$

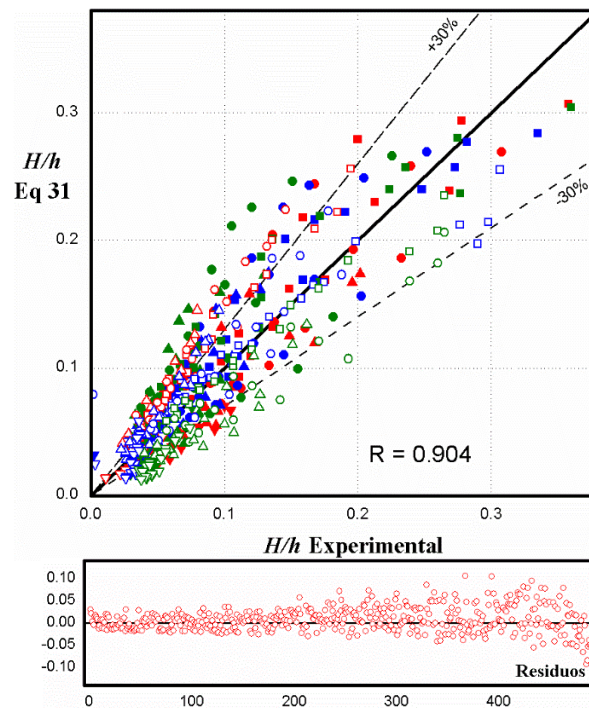


Figura 44. Ajuste de los desplazamientos relativos de la superficie H/h experimentales con la ec. 31.

$$\frac{a}{h} = 1.45Vol_g^{0.57} G_g^{0.82} F^{-2/5} \sin \alpha \cos^2(0.72\gamma) X^{-0.97} \quad (32)$$

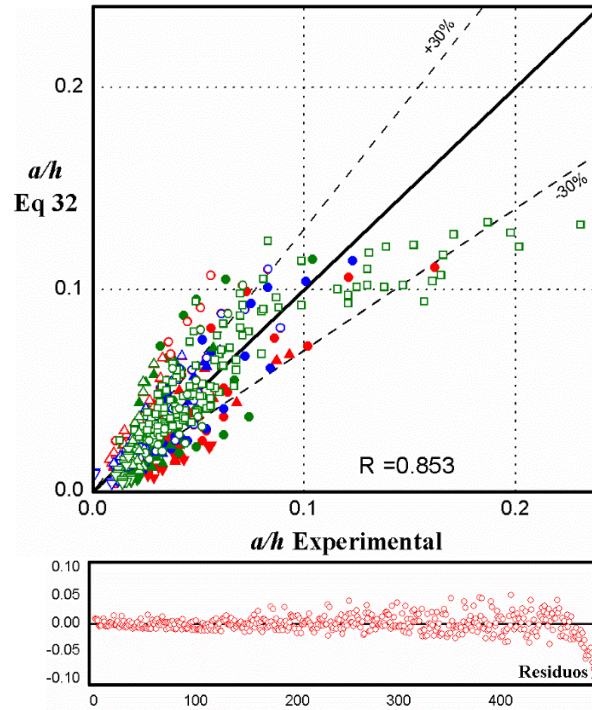


Figura 45. Ajuste de las amplitudes de onda relativas a/h experimentales con la ec. 32.

$$\frac{a_v}{h} = 1.29Vol_g^{0.61} G_g^{0.9} F^{-0.52} \sin \alpha \cos^2\left(\frac{2}{3}\gamma\right) X^{-0.86} \quad (33)$$

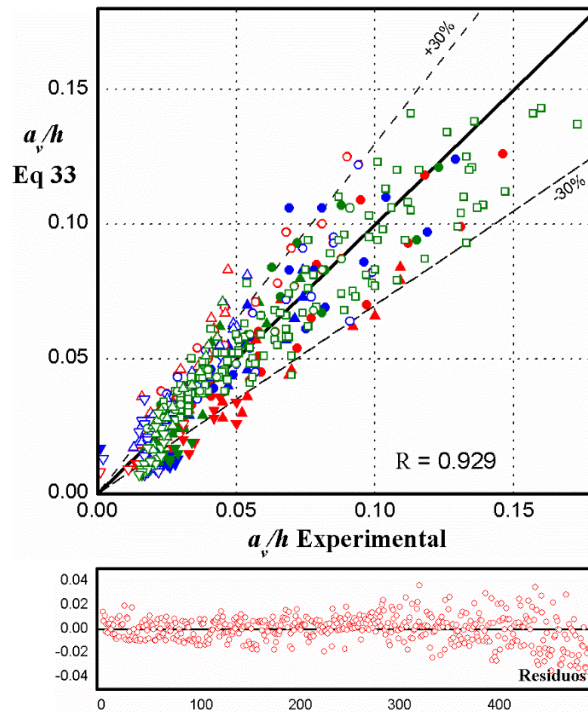


Figura 46. Ajuste de las amplitudes relativas del primer valle a_v/h experimentales con la ec. 33.

Limitaciones

El rango experimental de las ecs. es: $0.52 \leq F \leq 1.19$, $0.12 \leq Vol_g^* \leq 0.64$, $1.73 \leq G_g \leq 1.84$, $0.54 \leq A_b \leq 2.14$, $0.16 \leq S \leq 0.63$, $\alpha = 16^\circ$, $2.25 \leq X \leq 18$, $0^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$; aplicables a eventos subaéreos. Aunque en el fenómeno hay más parámetros involucrados, las ecs. no consideran aquellos que dentro del rango experimental afectan de forma poco significativa las características de las ondas, pero fuera de ellos pueden implicar mayores desviaciones de las características de ondas mostradas en las figs. 44 a 46. Se estudió la influencia de la porosidad, pero no la afectación del diámetro de grano y aunque Heller (2007) demostró que el d_g dentro del intervalo de 3 a 40 mm tiene un efecto despreciable, aquí los cilindros más grandes utilizados fueron los de 44.5 mm (descritos en la tabla 6). Dentro del rango experimental de F , las H/h , a/h y a_v/h son indirectamente proporcionales a F y a n (esta última implícita en el Vol_g^* y la G_g). Con $F \geq 3$ la inercia del bloque incrementa su importancia en la generación de las ondas y la dependencia es proporcional (como en las ecs. 1 a 4, 6 a 9, 13 y 14, 16 a 24); demás, la influencia de la n desaparece (Zweifel, 2004).

8.1. Aplicación a eventos históricos

Bahía Lituya Alaska

Ocurrió el 10 de julio de 1958, donde un sismo desencadenó el deslizamiento de un bloque de roca con $Vol_g = 30.6 \text{ Mm}^3$, $\rho_g = 2700 \text{ kg/m}^3$ y $n = 0.4$ sobre una ladera con una pendiente $\alpha = 40^\circ$ y profundidad media de la bahía $h = 122 \text{ m}$ (Fritz *et al*, 2009). El bloque tuvo un ancho medio $b = 823 \text{ m}$, altura máxima $s = 92 \text{ m}$ y una longitud $l = 970 \text{ m}$.

La vegetación devastada en la ladera opuesta al ascenso de las ondas $R_u = 524 \text{ m}$ de alto, es la evidencia de la altura hasta donde ascendieron a una distancia de 1350 m de la zona de generación (Fritz *et al*, 2001). No existe evidencia de las magnitudes de la H , H_M , a o a_M ; sin embargo, han sido reportadas en la literatura algunas estimaciones en $X = 1220 \text{ m}/122 \text{ m} = 10$ con $Vol_g^* = 2.50$, $G_g = 2.70$ y $F = 2.66$. En general, las expresiones 2D sobrestiman la magnitud de las ondas: Noda (1970) con la ec. 1 obtiene una $a_M = 428 \text{ m}$, Walder *et al* (2003) con la ec. 5 $a_M = 83 \text{ m}$, Di Risio (2005) con las ecs. 6 y 7 obtiene $a_M = 50 \text{ m}$ y $H_M = 82 \text{ m}$, Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a) con la ec. 8 $a_M = 145 \text{ m}$. Los trabajos con bloques granulares estiman valores de menor magnitud: Panizzo *et al* (2005a) con la ec. 11 $H_M = 32 \text{ m}$; mientras que Fritz *et al* (2001) reprodujo el evento con los

mismos parámetros relativos en su dispositivo experimental y obtuvo $H_M = 162$ m y $a_M = 152$ en $X = 7.25$. Posteriormente Fritz *et al* (2004) con la ec. 16 estimaron una $a_M = 96$ m y Zweifel (2004) con la ec. 17 una $a_M = 151$ m, Heller *et al* (2009) con las ecs. 20 y 21: $a_M = 144$ y $H_M = 180$ m. Slingerland y Voight (1979) con la ec. 24 en 3D ($X = 10$ y $\gamma = 0^\circ$) estiman una $a_M = 176$ m.

La aplicación de las ecs. 31 y 32 en $X = 10$, $\gamma = 0^\circ$ y $V_s = 92$ m/s (calculada por Slingerland y Voight, 1979) resultan: $H = 112$ m y $a = 31$ m. La tabla 11 y figs. 47 y 48 comparan estos resultados, donde las ecs. 4 y 23, obtenidas en 2D, sobrestiman con el menor error (+18%) la H , las ecs. 15 y 25 subestiman el valor, estas ecs. provienen de experimentos con materiales granulares y no consideran el F . Las ecs. 12 y 27 subestiman en mayor magnitud la H , pero estas fueron obtenidas en 3D. Las ecs. 18, 22 y 26 sobrestiman el valor de a , esta última es la de menor error (+20%); por el contrario, la ec. 10 (-33%) subestima el valor.

Tabla 11. Resultados del evento de la Bahía de Lituya, Alaska en 1958.

Ec.	$H(x), H(x, \gamma)$ (m)	$a(x), a(x, \gamma)$ (m)
31	112	
32		31
4	132	
10		21
12	46	
18		151
22		105
23	131	
25	62	
26		38
27	48	

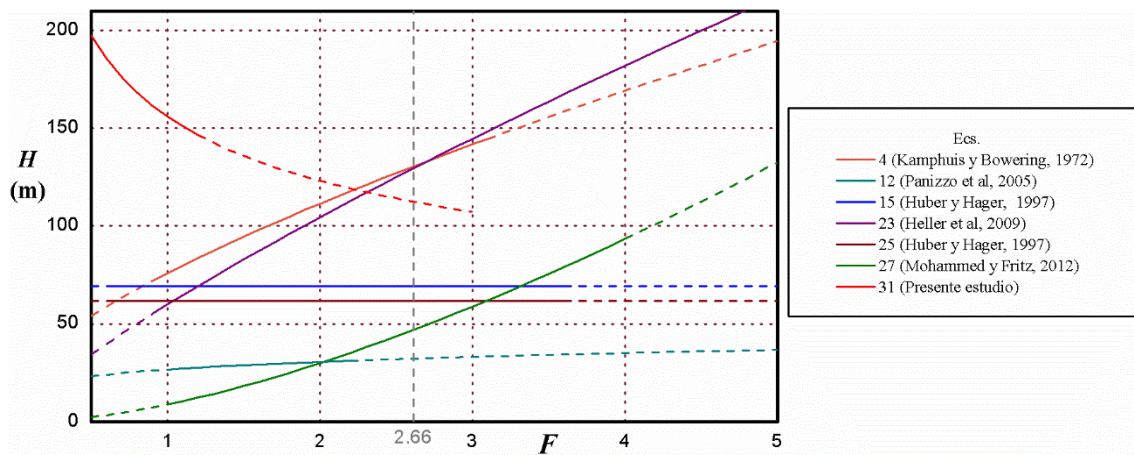


Figura 47. Altura de la onda H vs número de Froude F en la Bahía de Lituya, Alaska en 1958 ($X = 10$, $\gamma = 0^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

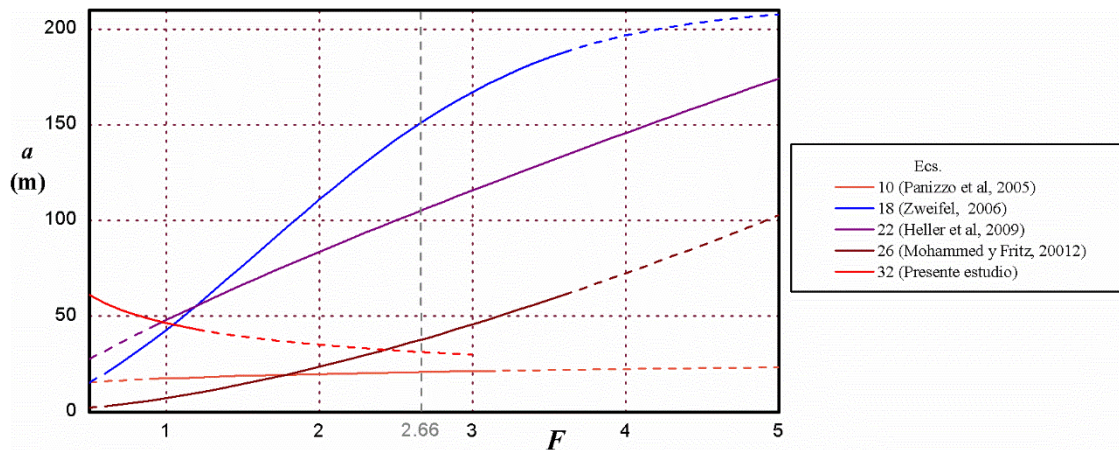


Figura 48. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en la Bahía de Lituya, Alaska en 1958 ($X = 10$, $\gamma = 0^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

Miller (1960) caracterizó el evento entre un deslizamiento y una caída de rocas, la geometría de la Bahía permitió que la onda se generara y propagara en 3D en la zona cercana; por tanto, las expresiones que mejor deben describir el evento son las obtenidas con bloques granulares que se deforman, además de ondas que se generan y propagan en 3D, así la H debió tener una magnitud menor que el de las ecs. 4 y 23, pero mayor que la ec. 31 porque F se ubica cerca de 3, del orden $H \approx 120$ m en $X = 10$ y $\gamma = 0^\circ$.

Embalse Vajont Italia

El evento ocurrió el 9 de octubre 1963, el bloque de tierra fue de 270 Mm^3 (con $\rho_g = 2640$ y $n = 0.39$), de 2 km de ancho, 140 m de altura y 750 m de longitud. El embalse tenía una profundidad media $h = 200$ m, donde la onda generada viajó y ascendió sobre la ladera opuesta hasta una altura de $R_u = 235$ m (Semenza, 2002), ubicada a en $\gamma = 0^\circ$ y $x = 280$ m. El agua paso por encima de la cortina ubicada en dirección $\gamma = -90^\circ$. Datei (2003) mediante un registro sísmico determinó que el bloque se movió a una V_s de entre 20 y 25 m/s sobre la ladera de pendiente variable de $\alpha = 6^\circ$ en la parte baja y hasta 10° en la parte alta. Los parámetros adimensionales del evento son: $Vol_g^* = 2.06$, $G_g = 2.64$ y $F = 2.08$, $T_s = 4.98$ (según Semenza, 2002).

Los parámetros máximos de las ondas resultan: $a_M = 149$ m (ec. 1 de Noda, 1970), $H_M = 53$ m (ec. 3 de Kamphuis y Bowering, 1972), $a_M = 203$ m (ec. 5 de Walder *et al*, 2003), $a_M = 63$ m y $H_M = 96$ m (ecs. 6 y 7 de Di Risio, 2005), $a_M = 61$ m (ec. 8 de Ataie-Ashtiani y Nik-Khah, 2008), $H_M = 187$ m (ec. 11 de Panizzo *et al*, 2005), $a_M = 17$ m, 48 m, 68 y 37 m (ecs. 16, 17, 20 y 24 de Fritz *et al*, 2004; Zwifel, 2006; Heller *et al*, 2009; Slingerland y Voight, 1979), $H_M = 85$ m (ec. 21 de Heller *et al*, 2009). La propagación de las ondas en $X = 0.56$ y $\gamma = 0^\circ$ se muestra en la tabla 12 y figs. 49 y 50.

Tabla 12. Resultados del evento del embalse de Vajont, Italia 1963.

Ec.	$H(x), H(x, \gamma)$ (m)	$a(x), a(x, \gamma)$ (m)
31	237	
32		92
4	115	
9		60
12		
15	27	
18		69
22		84
23	105	
25	49	
26		13
27	33	

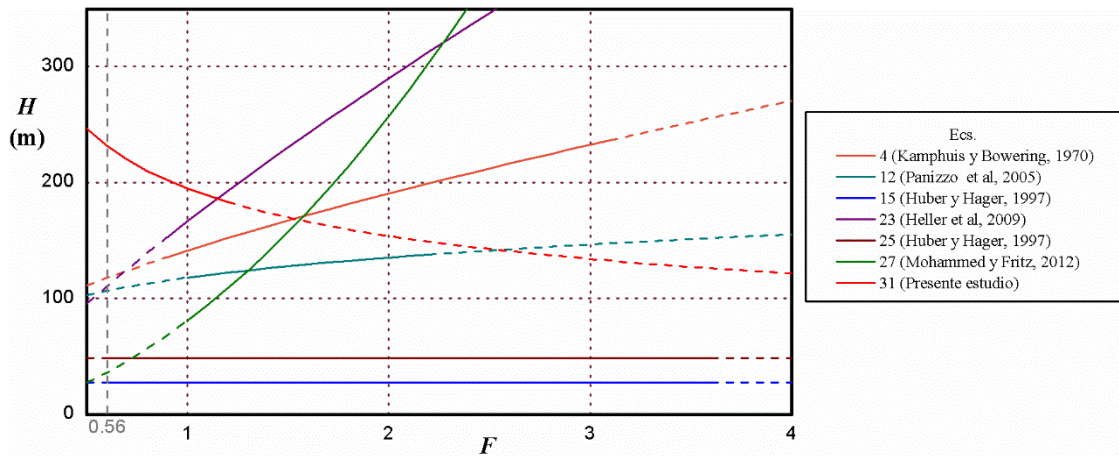


Figura 49. Altura de la onda H vs número de Froude F en el embalse de Vajont, Italia en 1963 ($X = 0.56, \gamma = 0^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

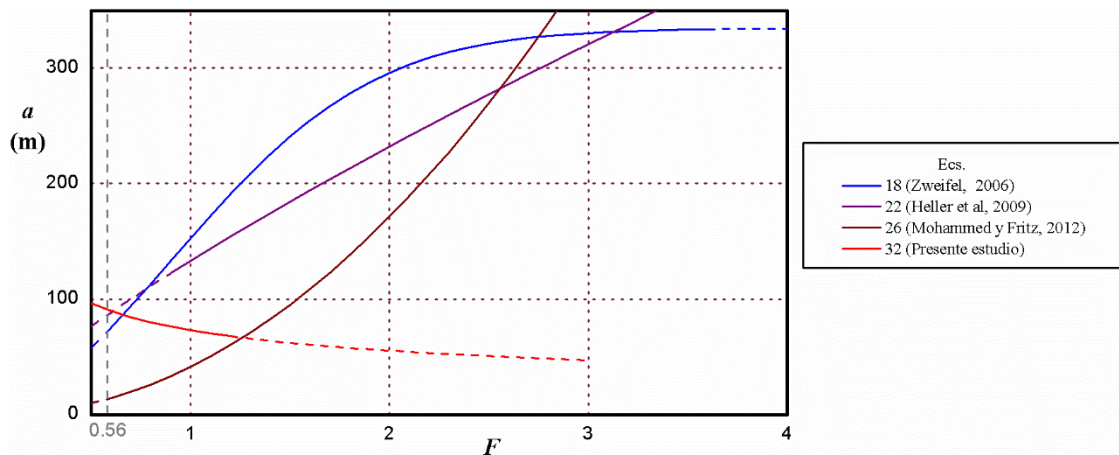


Figura 50. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en el embalse de Vajont, Italia en 1963 ($X = 0.56, \gamma = 0^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

Las características descritas por Semenza (2002) y el $F = 0.56$ ubican a este evento fuera o cerca del límite de los rangos experimentales de todas las ecs., excepto de las presentadas aquí y que generan una $H = 237$ m con una $a = 92$ m. Las ecs. más cercanas son la 4 de Kamphuis y Bowering (1972) de $H = 115$ m (-51%) y 22 de Mohammed y Fritz (2012) con una $a = 84$ m (-8%).

Río Grijalva México

El evento ocurrió el 4 de noviembre de 2007, cuando deslizó la ladera externa de una curva del río Grijalva (con un $\alpha = 15.6^\circ$) con una $h = 52$ m. Gómez y Berezowsky (2013) recopilan información de este evento, donde el bloque tuvo un $Vol_s = 47.4$ Mm³, $\rho_s = 1725$, $n = 0.25$, con geometría: $b = 610$, $l = 1200$ m y $s = 70$ m; además, con el registro sísmico determinan una $V_s = 35$ m/s ($Vol_g^* = 21.55$, $G_g = 2.3$, $F = 1.55$). Las marcas del ascenso de las ondas de hasta $R_u = 50$ m fueron en el poblado de San Juan Grijalva, ubicando en $x = 100$ m ($X = 1.92$) en una dirección perpendicular al movimiento del bloque $\gamma = -90^\circ$.

Tabla 13. Resultados del evento del Río Grijalva, México, 2007.

Ec.	$H(x), H(x, \gamma)$ (m)	ΔH (%)	$a(x), a(x, \gamma)$ (m)	Δa (%)
31	47			
32			19	
4	59	+24		
10			33	+76
12	73	+54		
14	16	-66		
15	56	+18		
18			119	+536
22			91	+384
23	113	+140		
25	22	-53		

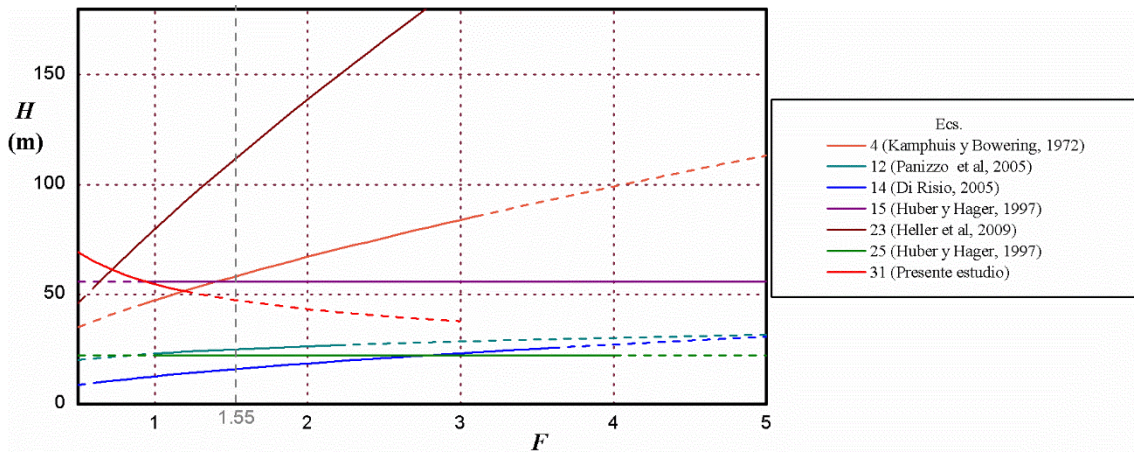


Figura 51. Altura de la onda H vs número de Froude F en el río Grijalva, México en 2007 ($X = 1.55$, $\gamma = -90^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

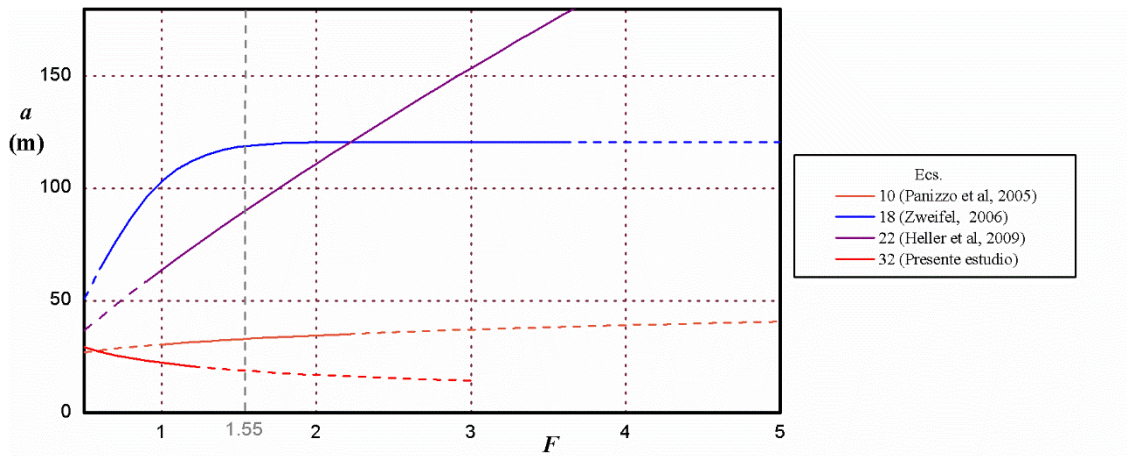


Figura 52. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en el río Grijalva, México en 2007 ($X = 1.55$, $\gamma = -90^\circ$), rango experimental de las ecs. en línea continua.

En este evento, el valor del Vol_g^* es el parámetro dominante y es superior a todos los rangos experimentales de las ecs; esto expresa la relación del tamaño del bloque con respecto al cuerpo de agua. La ec. 31 y 32 generan los valores de $H = 47$ m y $a = 19$ m, siendo las ecs. más cercanas a estos valores, la 15 de Huber y Hager (1997) y la 10 de Panizzo *et al* (2005) con $H = 56$ m (+18%) y $a = 33$ m (+76%) respectivamente.

9. CONCLUSIONES

La generación de ondas en un cuerpo de agua ha sido estudiada con un dispositivo experimental tridimensional bajo las leyes de similitud de Froude, con 34 experimentos diseñados para evitar la presencia de efectos de escala en las ondas. El dispositivo experimental construido permitió una reproducción controlada de las características del bloque, de la rampa y del cuerpo de agua, y una variación independiente de los parámetros en estudio. Los experimentos se realizaron con dos bloques de geometría semi elíptica, rígida, con dimensiones constantes, pero con porosidad y densidad variable (al cambiar el material de su interior). El ángulo de inclinación de la rampa se mantuvo constante. La generación y propagación de las ondas se realizó en un tanque, donde se estudió la influencia de la distancia y la dirección de propagación; además de la profundidad. La influencia de la dinámica del bloque fue estudiada variando su posición inicial, subaéreo, semisumergido y sumergido. El sensor de posición del bloque y los de nivel de agua realizaron mediciones en 24 puntos del tanque con éxito. Además, la CAV permitió en la zona de generación distinguir fenómenos de la mezcla aire (arrastrado), bloque (sólido) y agua que ocurren a gran velocidad para el ojo humano.

Los parámetros adimensionales y los rangos experimentales fueron: el número de Froude $0.52 \leq F \leq 1.19$, la densidad granular relativa del bloque $1.73 \leq G_g \leq 1.84$, el volumen granular relativo del bloque $0.12 \leq Vol_g^* \leq 0.64$, la porosidad del bloque $n = 0.0$ y 0.25 , el ángulo de la rampa $\alpha = 16.5^\circ$. El rango de la altura relativa del bloque $0.16 \leq S \leq 0.63$ se debe únicamente al cambio de la profundidad. Las mediciones fueron realizadas en una distancia relativa $2.25 \leq X \leq 18$. El diseño experimental tuvo interés en el rango donde ha sido poco estudiado el fenómeno: con profundidades donde la longitud del bloque es importante y velocidades de impacto donde la porosidad tiene efecto en las características de las ondas, $F < 3$ según Zweifel (2004).

Los experimentos se realizaron aislando la influencia de cada variable en el fenómeno:

- Con la disminución de la profundidad se generan ondas de mayor altura, con la primera cresta y valle de mayor amplitud.
- Las profundidades pequeñas provocan que cuando el bloque llega al final de la rampa su otro extremo queda cerca de la superficie, y este evita que se forme libremente la segunda onda, así que después de la primera onda y la segunda cresta solo se presenta un tren de ondas sin definición.
- Las ondas generadas tienen la mayor altura y amplitud sobre la dirección de movimiento del bloque $\gamma = 0^\circ$, y decaen hacia la dirección perpendicular $\gamma \rightarrow 90^\circ$ pero sin hacerse de magnitud cero. El decaimiento longitudinal es mayor en la dirección $\gamma = 0^\circ$ y decae hacia $\gamma \rightarrow 90^\circ$.
- La presencia de porosidad inhibe la formación del cráter de impacto que se presenta en las mismas pruebas con el bloque sin porosidad; además, las ondas del bloque poroso son de menor altura y amplitud, por consecuencia de que parte de la energía del bloque se disipa en turbulencia generada en superficie del bloque y del flujo en medio poroso dentro del bloque.
- Diversos autores (Kamphuis y Bowering, 1972; Di Risio, 2005; Fritz *et al*, 2004; Zweifel, 2004; Slingerland y Voight, 1979 y 1982; Mohammed y Fritz, 2012) observaron en eventos subaéreos que la magnitud de las ondas es proporcional a la velocidad de impacto del bloque, y esta a su vez es proporcional a la posición inicial del bloque. En los experimentos del presente trabajo, a velocidades menores (sin la presencia del cráter de impacto) y con la posición inicial del bloque cerca de la superficie libre del agua se presentaron las ondas con las mayores magnitudes, tanto para eventos subaéreos, semisumergidos y sumergidos. La onda generada de mayor magnitud, es una onda más esbelta que transporta un menor volumen de agua, con respecto a ondas generadas por bloques subaéreos o sumergidos.
- Cuando el bloque inicia subaéreo la primera cresta es mayor que la segunda, pero cuando el bloque comienza sumergido esta relación se revierte, para eventos sumergidos la segunda cresta es la de mayor magnitud.

- El decaimiento longitudinal de las ondas siempre es mayor en la primera onda, incluso cuando en la zona de generación la primera cresta es mayor (eventos subaéreos), ya en la zona lejana decae la primera cresta y es menor que la segunda.

Los datos experimentales de la amplitud y altura de la onda, respectivamente se compararon con siete y cinco enfoques de estudios previos, donde:

- El comportamiento es diferente debido a la profundidad, los enfoques bidimensionales subestiman los valores en la zona de generación, pero sobrestiman en la zona de propagación (el decaimiento de las ondas tridimensional es mayor que en un caso bidimensional).
- La generación de ondas con bloques de material granular suelto subestiman los valores experimentales, porque parte de la energía del bloque se gasta en su deformación.

Las alturas relativas de onda H/h , amplitudes de onda relativas de la primera cresta a/h y del primer valle a_v/h en eventos subaéreos (504 datos de 21 pruebas con 6 diferentes distancias y 4 diferentes direcciones de propagación) se ajustaron a funciones en términos de los parámetros de volumen granular relativo Vol_g^* , densidad granular relativa G_g , número de Froude F , inclinación de la rampa α , decaimiento radial y longitudinal, con coeficientes de correlación $R = 0.904, 0.853$ y 0.929 , respectivamente. El decaimiento longitudinal y radial de las ondas en términos de la distancia relativa X y ángulo γ se ajustan de forma muy similar a estudios tridimensionales previos.

NOTACIÓN

Abreviaciones y términos

2D	dos dimensiones
3D	tres dimensiones
EE	error estándar de ajuste, $= \sqrt{\sum_{i=1}^{Nd} (y_i - \hat{y}_i)^2 / (Nd - Np)}$
GS	generador de señales
SP	sensor de posición
SMNA	sondas medidoras del nivel de agua
TAD	tarjeta de adquisición de datos

Parámetros adimensionales

a/h	amplitud relativa de la cresta
a_v/h	amplitud relativa del valle
F	número de Froude del bloque, $= V_s / (gh)^{1/2}$
G_g	densidad relativa granular, $= \rho_g / \rho_w$
G_s	densidad relativa del bloque, $= \rho_s / \rho_w$
H/h	desplazamiento relativo de la superficie
L	longitud relativa del bloque, $= l/h$
M	masa relativa del bloque, $= m / (\rho_w bh^2)$
S	altura relativa del bloque, $= s/h$
Vol_g^*	volumen relativo granular, $= Vol_g / (bh^2)$
Vol_s^*	volumen relativo del bloque, $= Vol_s / (bh^2)$
P	parámetro de impulso, $= FS^{1/2} M^{1/4} (\cos 6\alpha/7)^{1/2}$
Re	número de Reynolds
T	tiempo relativo, $= t(g/h)^{1/2}$
T_s	tiempo relativo de movimiento sumergido del bloque $= t_s(g/h)^{1/2}$
W_e	número de Weber
X	distancia relativa de propagación de la onda, $= x/h$

Símbolos

α	[°]	ángulo inclinación de la rampa o ladera
a	[L]	amplitud de la onda
a_M	[L]	amplitud máxima de la onda
a_{Mbox}	[L]	amplitud máxima de la onda generada por un bloque rígido
a_v	[L]	amplitud del valle de la onda
A_b	[L ²]	área frontal del bloque
A_p	[L ²]	área de la base del bloque
b	[L]	ancho del bloque
C	[-]	parámetro geométrico del bloque
Δt	[T]	incremento de tiempo
d_g	[L]	diámetro granular
ρ_g	[ML ⁻³]	densidad granular
ρ_s	[ML ⁻³]	densidad del bloque
ρ_w	[ML ⁻³]	densidad del agua
ε	[-]	parámetro geométrico del bloque
E_K	[ML ² T ⁻²]	energía cinética
$f()$	[-]	función de
ϕ	[°]	ángulo de ataque del bloque
γ	[°]	ángulo de la dirección de propagación de las ondas
δ	[-]	coeficiente de fricción dinámico
g	[MT ⁻²]	aceleración de la gravedad
γ	[°]	ángulo de propagación de la onda
h	[L]	profundidad del agua
H	[L]	altura de la onda
H_M	[L]	altura máxima de la onda
k_b	[-]	parámetro de forma geométrica a lo ancho del bloque
k_l	[-]	parámetro de forma geométrica a lo largo del bloque
l	[L]	longitud del bloque
m	[M]	masa del bloque
Nd	[-]	número de datos
Np	[-]	número de parámetros

n	[-]	porosidad del bloque
s	[L]	altura del bloque
V_s	[LT ⁻¹]	velocidad de impacto del bloque
Vol_g	[L ³]	volumen granular
Vol_s	[L ³]	volumen del bloque
R_u	[L]	altura del ascenso de la onda
t	[T]	tiempo
t_s	[T]	tiempo de movimiento sumergido del bloque
x	[L]	distancia de propagación de la onda
x_b	[L]	coordenada geométrica del ancho del bloque
y_i	[-]	valor del dato
\hat{y}_i	[-]	valor estimado
y_l	[L]	coordenada geometría del largo del bloque
z	[L]	posición del bloque, medida sobre la rampa
z_i	[L]	posición inicial del bloque
Z	[L]	superficie de la geometría del bloque
V	[LT ⁻¹]	velocidad del bloque
V_M	[LT ⁻¹]	velocidad máxima del bloque
V_s	[LT ⁻¹]	velocidad de impacto del bloque con la superficie libre del agua

REFERENCIAS

- Ataie-Ashtiani B. and Najafi-Jilani A. (2008a), "Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide", *Coastal Engineering*, 55 (12), 989-1004. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.003
- Ataie-Ashtiani B. and Nik-Khah A. (2008b), "Impulsive waves caused by subaerial landslides", *Environmental Fluid Mechanics*, 8(3), 263-280. DOI: 10.1007/s10652-008-9074-7
- Bateman A., Bregoli F., Medina V., Rast M. and Bentz C. (2011), "Setup of an experimental device for high-speed debris flows generating 2D impulse waves", *A: IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Beijing, 841-852.
- Bonnard C. (2011), "Technical and Human Aspects of Historic Rockslide-Dammed Lakes and Landslide Dam Breaches", *Natural and Artificial Rockslide Dams, Lecture Notes in Earth Sciences* Volume 133, Springer Berlin Heidelberg 2011, 101-122. DOI: 10.1007/978-3-642-04764-0(3)
- Buckingham, E. (1914), "On physically similar systems", *Physical Rev.* 4:354-376.
- Cruden D.M. and Varnes D.J. (1996), "Landslide Types and Processes". In Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report, 247: 36-75.
- Cruickshank V. C. (1969), "Derrumbes en embalses", *Instituto de Ingeniería UNAM*, 152.
- Datei C. (2003), "Vajont, La storia idraulica, Cortina, Padova".
- Davidson D. D. and McCartney B. L. (1975), "Water Waves Generated by Landslides in Reservoirs", *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, 101(12), 1489-1501.
- Di Risio, M. (2005). "Landslide generated impulsive waves: generation, propagation and interaction with plane slopes. An experimental and analytical study", PhD thesis, University of Roma Tre, Rome.
- Di Risio M., Bellotti G., Panizzo A. and De Girolamo P. (2009), "Three-dimensional experiments on landslide generated waves at a sloping coast", *Coast. Eng.*, 56(5-6), 659-671. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.01.009
- Echávez A. G. (1982), "Waves generated by landslides in a reservoir", *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*, Coventry England.
- Evers F. M. and Hager W. H. (2015), "Laboratory Impulse Wave Generation: Comparison of Free Granular with Mesh-Packed Slides", *Journal of Marine Science and Engineering*, 3, 100-110. DOI:10.3390/jmse3010100
- Fawu Wang and Tonglu Li (Eds.) (2009), *Landslide Disaster Mitigation in Three Gorges Reservoir, China*, Springer-Verlag, ISBN: 9783642001321.
- Fernandes C. R. and Antunes C. J. S. (2007), "Landslides into reservoirs and their impacts on banks", *Environ. Fluid. Mech.*, 7:481-493. DOI: 10.1007/s10652-007-9039-2
- François Enet and Stéphane T. Grilli (2007). "Experimental Study of Tsunami Generation by Three-Dimensional Rigid Underwater Landslides." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 133, SPECIAL ISSUE: Tsunami Engineering, 442-454. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:6(442)

- Fritz H.M. (2002), “Initial phase of landslide generated impulse waves”, *Ph.D.-Thesis*, VAW-Mitteilung 178, Minor, H.-E., ed. ETH Zurich, Zurich.
- Fritz H. M., Hager W. H. and Minor H. E. (2001), “Lituya bay case: Rockslide impact and wave run-up”, *Science of Tsunami Hazards*, 19 (1), 3-22.
- Fritz H. M., Hager W. H. and Minor H. E. (2003), “Landslide generated impulse waves”, *Experiments in Fluids*, 35 (6), 505-519. DOI: 10.1007/s00348-003-0659-0
- Fritz, H., Hager, W., and Minor, H. (2004). ”Near Field Characteristics of Landslide Generated Impulse Waves.” *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 130(6), 287–302.
- Fritz H. M., Hager W. H. and Minor H. E. (2008), “Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves”, *Experiments in Fluids*, 44 (5), 691-703. DOI: 10.1007/s00348-007-0427-7
- Fritz H., Mohammed F. and Yoo J. (2009), “Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary”, *Pure and Applied Geophysics*, 166: 153–175. DOI: 10.1007/s00024-008-0435-4
- Gabl R., Kapeller G. and Aufleger M. (2009), “The Effect of Avalanche Impulse Waves in Reservoirs”, *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, IAHR, Vancouver, British Columbia, Canada, 2500-2505.
- Gómez N. J. and Berezowsky V. M. (2013), “Estimation of water waves generated by landslide in the Grijalva River, Mexico, 2007”, *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Book Series (6), 237-243.
- Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Rossi M. and Valigi, D. (2009), “Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy”. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 222–229. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.01.005
- Heller V., Hager W. and Minor H. (2008), “Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves”, *Exp Fluids*, 44, 691-703. DOI: 10.1007/s00348-007-0427-7
- Heller V., Hager W. and Minor H. (2009), “Landslide generated impulse waves in reservoirs - Basics and computation”, *VAW Mitteilung 211*, Boes, R. ed. ETH Zurich, Zurich (translation of VAW Mitteilung 206)
- Heller V. and Hager W. H. (2010), “Impulse product parameter in landslide generated impulse waves”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 136(3):145-155. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000037).
- Heller V. and Spinneken J. (2013), “Improved landslide-tsunami prediction: Effects of block model parameters and slide model”, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 1489–1507, DOI: 10.1002/jgrc.20099.
- Highland L. M. y Bobrowsky P. (2008), *Manual de derrumbes. Guía para entender todo sobre los derrumbes: Reston, Virginia*, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 129.
- Huang B., Yin Y., Wang S., Chen X., Liu G., Jiang. Z. and Liu J., (2013), “A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiafang landslide in Three Gorges Reservoir, China”, *Landslides*, 11(3), 513-525. DOI: 10.1007/s10346-013-0453-x
- Huang B., Yin Y., Chen X., Liu G., Wang S. and Jiang. Z., (2014), “Experimental modeling of tsunamis generated by subaerial landslides: two case studies of the Three Gorges Reservoir, China”, *Environmental Earth Sciences*, 71, 3813-3825. DOI: 10.1007/s12665-013-2765-5

- Huber A. (1980), “Schwallwellen in Seen als Folge von Felsstürzen”, *VAW-Mitteilung* 180, Vischer, D., ed. ETH Zurich, Zurich.
- Huber A. and Hager W. H. (1997), “Forecasting impulse waves in reservoirs: Commission Internationale des Grands Barrages”, *Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages*, Florence, 1997, 993-1005.
- Hughes S. A. (1993), “Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”, *Advanced Series on Ocean Engineering* 7. World Scientific, London.
- Jørstad F. (1968), “Waves generated by landslide in Norwegian fjords and lakes”, *Norwegian Geotechnical Institute*, Publication 73: 13-32. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Kamphuis J. W. and Bowering R. J. (1972), “Impulse waves generated by landslides”, *Proc. 12th Coastal Engineering Conf*, ASCE, New York 1:575-588.
- Miller D. J. (1960), “Giant waves in Lituya Bay, Alaska”, *U.S. Geological Survey. Prof. Pap.*, 354-C, 86.
- Mohammed F. and Fritz H. M. (2012), “Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides”, *J. Geophys. Res.*, 117, C11015. DOI: 10.1029/2011JC007850.
- Noda E. K. (1970), “Water waves generated by landslides”, *J. of the Waterways and Harb. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng.*, 96 (WW4): 835–855.
- Panizzo A., De Girolamo, P. and Petaccia, A. (2005a). “Forecasting impulse waves generated by subaerial landslide”, *J. Geophys. Res.*, 110, C12025, 23 pp. DOI: 10.1029/2004JC002778.
- Panizzo A., De Girolamo P., Di Risio M., Maistri A. and Petaccia A. (2005b), “Great landslide events in Italian artificial reservoirs”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 733-740.
- Russell J.S. (1837), “Report of the Committee on Waves”, *Report of the 7th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, Liverpool, 7:417-496.
- Russell J.S. (1844), “Report on waves”, *Report of the 14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science*, York, 14:311-390.
- Schuster R. L. (1987), “Landslide dams: processes, risk, and mitigation: proceedings of a session”, *Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE*, Convention in Seattle, Washington.
- Schuster R. L. and Costa J.E. (1986), “A perspective on landslide dams”, Schuster, R.L., ed., *Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation*: American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication No. 3, 1-20.
- Semenza E. (2002), “La Storia del Vaiont”.
- Slingerland R. L. and Voight B. (1979), “Occurrences, properties and predictive models of landslide-generated impulse waves”, *Rockslides avalanches* 2, 317–397, B. Voight, ed., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Slingerland R. and Voight B. (1982), “Evaluating Hazard of Landslide-Induced Water Waves”, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 108, 504-512.
- Townson J.M. and Kaya Y. (1988), “Simulations of the waves in lake Botnen created by the Rissa Landslide”, *Proc. Instn Civ. Engrs*, Part 2, 85, 145-160. DOI: 10.1680/iicep.1988.113

- Viroulet S., Sauret A. and Kimmoun O. (2014). “Tsunami generated by a granular collapse down a rough inclined plane”. *EPL (Europhysics Letters)*, 105(3), 34004. DOI: 10.1209/0295-5075/105/34004
- Walder J. S., Watts P., Sorensen O. E., and Janssen K. (2003), “Tsunamis generated by subaerial mass flows”, *Journal of Geophysical Research*, 108(B5), 2236. DOI: 10.1029/2001jb000707
- Wang F. and Li T. (2009), “Landslide Disaster Mitigation in Three Gorges Reservoir, China, Environmental Science and Engineering”, *A Study of the 1985 Xintan Landslide in Xiling Gorge, Three Gorges Area, China*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 387-409.
- Ward, S.N. and Day, S. (2003), “Ritter Island volcano - lateral collapse and the tsunami of 1888”, *Geophysical Journal International*, 154:891-902. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.02016.x
- Wiegel R.L. (1955), “Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body”, *Transactions, American Geophysical Union* 36. DOI: 10.1029/TR036i005p00759
- Wiegel R.L. (1970), “Earthquake engineering”, U.S.A. Prentice-Hall. Chapter 11 *Tsunamis*, 253-306.
- Western Canada Hydraulic Laboratories, Vancouver (1970), “Hydraulic model studies—wave action generated by slides into Mica Reservoir—British Columbia”, Report.
- Yim S., Tuy D., Panizzo A., Di Risio M. and Liu P. (2008), “Numerical Simulations of Wave Generation by a Vertical Plunger Using RANS and SPH Models”, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 134-3, 143-159. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:3(143)
- Zweifel A. (2004), “Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe”, *VAW-Mitteilung* 186, Minor, H.-E., ed. ETH Zurich, Zurich.

APÉNDICE

A.1 Modelo de similitud

El análisis dimensional se basa en el Teorema Π de Buckingham (1914), donde los m parámetros independientes q_1, q_2, \dots, q_m que gobiernan un fenómeno físico pueden ser reducidos a $j = m - o$ parámetros adimensionales $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_j$ sin perder información física; donde o es el número de dimensiones fundamentales: longitud, tiempo, y masa [L, T, M]. Por lo anterior, una prueba realizada con un modelo (subíndice M) es similar a su prototipo (subíndice P), lo que implica que cada par de estos parámetros adimensionales es idéntico: $\Pi_{1M} = \Pi_{1P}, \Pi_{2M} = \Pi_{2P}, \dots, \Pi_{jM} = \Pi_{jP}$. Este enfoque es ampliamente utilizado en la modelación hidráulica, porque la descripción adimensional simplifica el trabajo experimental y los resultados se expresan en general, y no solo para un prototipo.

La similitud perfecta de los modelos físicos y dispositivos experimentales se cumple si y solo si hay similitud geométrica, cinemática y dinámica simultáneamente. La similitud geométrica se refiere a que las relaciones de longitud de las escalas entre el modelo y el prototipo sean igual a uno; del mismo modo, la similitud cinemática implica un movimiento idéntico entre el modelo y el prototipo; mientras que para satisfacer similitud dinámica se requiere que los coeficientes de todas las fuerzas dinámicas sean idénticos. Por lo anterior, es importante identificar cuáles son las fuerzas que dominan el fenómeno y poder justificar que fuerzas despreciar (Hudson *et al*, 1979).

En el presente caso de estudio, en orden de importancia las fuerzas relevantes son las de inercia, la gravitacional, la viscosa, la tensión superficial y la de compresión. Por lo anterior, el número más importantes es el de Froude porque expresa la relación entre las fuerzas de inercia y gravitacional; en segundo lugar el número de Reynolds que relaciona las fuerzas de inercia y viscosas; posteriormente el número de Weber que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y de tensión superficial, y finalmente el número Cauchy que relaciona las fuerzas de inercia y las de compresión. Los $m = 11$ parámetros independientes que regulan el fenómeno y las $o = 3$ dimensiones fundamentales [L,T,M] producen $j = 7$ parámetros adimensionales que rigen el fenómeno, tabla 4.

Tabla 14. Parámetros gobernantes adimensionales

Parámetro adimensional	Descripción
$F = V_s/(gh)^{1/2}$	Número de Froude
$A = bs/h^2$	Área relativa del bloque
$Vol_s^* = Vol_s/(bh^2)$	Volumen relativo del bloque
$G_s = \rho_s/\rho_w$	Densidad relativa del bloque
$X = x/h$	Distancia relativa
α	Ángulo de la rampa
n	Porosidad del bloque
$T = t(gh)^{1/2}$	Tiempo relativo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un bloque que se desliza, según Highland y Bobrowsky (2008).	- 5 -
Figura 2. Clasificación del movimiento de laderas, según Cruden y Varnes (1996).	- 6 -
Figura 3. Movimiento de caída de bloques.	- 7 -
Figura 4. Movimiento de deslizamiento rotacional.	- 8 -
Figura 5. Movimiento de deslizamiento traslacional.	- 8 -
Figura 6. Desprendimiento lateral de bloques.	- 9 -
Figura 7. Flujo de material.	- 10 -
Figura 8. Etapas del fenómeno de deslizamiento de laderas en cuerpos de agua.	- 11 -
Figura 9. Sub aéreo.	- 11 -
Figura 10. Semisumergido.	- 11 -
Figura 11. Sumergido.	- 12 -
Figura 12. Parámetros más importantes en la generación de ondas,	- 12 -
Figura 13. Clasificación de los experimentos previos.	- 18 -
Figura 14. Clasificación de las ondas, según Noda (1970) en inglés.	- 19 -
Figura 15. Amortiguación de la onda 3D, según Huber y Hager (1997).	- 26 -
Figura 16. Propiedades simétricas del fenómeno.	- 35 -
Figura 17. Tanque y rampa del dispositivo experimental.	- 36 -
Figura 18. Dimensiones de los bloques experimentales.	- 37 -
Figura 19. Bloques experimentales, a) A rígido no poroso, b) B rígido poroso	- 38 -
Figura 20. Material de los cilindros, a) aleación aluminio 6061-T6, b) nylamid 6/6, c) concreto.	- 39 -
Figura 21. Generador de señales.	- 39 -
Figura 22. Sensor de posición.	- 40 -
Figura 23. Sondas medidoras del nivel de agua.	- 41 -
Figura 24. Esquema de las condiciones iniciales de la prueba A003220-34.	- 43 -
Figura 25. Ubicación de los SMNA en la prueba de reproducibilidad.	- 43 -
Figura 26. Resultados de la prueba de reproducibilidad, a) velocidad del bloque V (m/s), desplazamiento de la superficie H (m) en: b) P1, c) P2, d) P3, e) P4, f) P5, g) P6, h) P7.	- 45 -
Figura 27. Ubicación general de los SMNA.	- 46 -
Figura 28. Influencia de la profundidad en la dinámica del bloque, pruebas A003220-68,	- 47 -
Figura 29. Serie de imágenes con un incremento de tiempo 0.1 s que muestran la influencia de la profundidad, a-f) tratamiento A003230-68 ($h = 0.3$ m), g-l) tratamiento A003240-68 ($h = 0.4$ m).	- 49 -

Figura 30. Influencia de la profundidad en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs el tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en $\gamma = 0^\circ$, a) $x = 0.9$ m, b) $x = 1.2$ m, c) $x = 1.8$ m, d) $x = 2.4$ m,	50 -
Figura 31. Secuencia de imágenes con un incremento de tiempo de 0.06 s de la vista superior de la formación de las ondas en el tratamiento A003230-68, a) impacto del bloque con la superficie del agua, b) c) d) desplazamiento del agua por el bloque, e) final del movimiento del bloque e inicio del movimiento del agua para restaurar la superficie libre, f) propagación de las ondas y continuación de la restauración de la superficie libre, g) colapso del hueco generado detrás del bloque, h) i) formación del segundo valle y subsecuente tren de ondas.	52 -
Figura 32. Influencia de la dirección de propagación γ (0° , 30° 60° y 90°) en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs el tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$, a) $X = 3$, b) $X = 4$	53 -
Figura 33. Efecto de la porosidad en la dinámica del bloque, tratamiento A003230-68 y	54 -
Figura 34. Serie de imágenes con un incremento de tiempo 0.1 s que muestran la influencia de la porosidad, a-f) tratamiento A003230-68, g-l) tratamiento B253230-68.	55 -
Figura 35. Influencia de la porosidad n en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en las pruebas A003230-68 y B253230-68,.....	56 -
Figura 36. Dinámica del bloque con diferentes posiciones iniciales z_i , a) desplazamiento $z(t)$, b) velocidad $V(t)$. Los instantes en que ocurre el impacto se muestran con estrellas, cuando el bloque inicia subaéreo en líneas discontinua y semisumergido en línea continua.	57 -
Figura 37. Serie de imágenes con un $\Delta t = 0.1$ s que muestran la influencia de la posición inicial del bloque z_i , a-i-a.vii) A003240-102,	59 -
Figura 38. Influencia de la posición inicial del bloque z_i , a) la velocidad de impacto V_S y máxima V_M , b) el desplazamiento relativo de la superficie H/h	60 -
Figura 39. Influencia de la posición inicial z_i en el desplazamiento relativo de la superficie H/h vs tiempo relativo $T = t(gh)^{1/2}$ en: a) P1, b) P2, c) P3, d) P4, e) P5, f) P6.....	61 -
Figura 40. Comparación del desplazamiento relativo de la superficie experimental vs ecs. 2D,	62 -
Figura 41. Desplazamiento relativo de la superficie H/h en 3D, experimental vs ecs,	63 -
Figura 42. Alturas de onda a/h en 2D, experimentales vs ecs, a) Ataie-Ashtiani y Nik-Khah (2008a), b) Zweifel (2004), c) Heller et al (2009).	64 -
Figura 43. Alturas de onda a/h en 3D, experimentales vs ecs, a) Panizzo et al (2005a),.....	65 -
Figura 44. Ajuste de los desplazamientos relativos de la superficie H/h experimentales	68 -
Figura 45. Ajuste de las amplitudes de onda relativas a/h experimentales con la ec. 32.	69 -
Figura 46. Ajuste de las amplitudes relativas del primer valle av/h experimentales con la ec. 33.....	69 -
Figura 47. Altura de la onda H vs número de Froude F en la Bahía de Lituya, Alaska en 1958	72 -
Figura 48. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en la Bahía de Lituya, Alaska en 1958.....	72 -

Figura 49. Altura de la onda H vs número de Froude F en el embalse de Vajont, Italia en 1963	- 74 -
Figura 50. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en el embalse de Vajont, Italia en 1963	- 74 -
Figura 51. Altura de la onda H vs número de Froude F en el río Grijalva, México en 2007	- 75 -
Figura 52. Amplitud de la onda a vs número de Froude F en el río Grijalva, México en 2007	- 76 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros independientes gobernantes.	- 13 -
Tabla 2. Parámetros relacionados con la porosidad del bloque.	- 13 -
Tabla 3. Principales eventos de generación de ondas por deslizamiento de laderas.	- 16 -
Tabla 4. Rango experimental de las formulaciones empíricas.....	- 28 -
Tabla 5. Proporciones de los bloques experimentales.	- 37 -
Tabla 6. Propiedades del material granular (cilindros).....	- 38 -
Tabla 7. Valores experimentales de los parámetros.	- 42 -
Tabla 8. Tratamientos del diseño experimental.....	- 42 -
Tabla 9. Ubicación de los SMNA en la prueba de reproducibilidad.	- 44 -
Tabla 10. Ubicación general de los SMNA	- 46 -
Tabla 11. Resultados del evento de la Bahía de Lituya, Alaska en 1958.	- 71 -
Tabla 12. Resultados del evento del embalse de Vajont, Italia 1963.....	- 73 -
Tabla 13. Resultados del evento del Río Grijalva, México, 2007.....	- 75 -
Tabla 14. Parámetros gobernantes adimensionales	- 90 -

AGRADECIMIENTOS

A mi director el Dr. Moisés Berezowsky Verduzco quien motivó este desafiante e interesante tema; con quien se realizaron fructíferas discusiones en todas las etapas del proyecto.

A mis tutores: el Dr. Jesús Gracias Sánchez, el Dr. Oscar Fuentes Mariles, el Dr. Ramón Domínguez Mora y el Dr. Carlos A. Escalante Sandoval por revisar y corregir de manera paciente cada párrafo.

Al Ing. Victor Franco, que desde la etapa temprana y hasta la final atendió incondicionalmente mis necesidades y las del proyecto de investigación.

Al CONACYT por patrocinar mis ingresos económicos con la beca número 315119.

A los Ing. Rodolfo Federico Peters Lammel y Enríque Ramón Gómez Rosas de la Coordinación de Electrónica del Instituto de Ingeniería, quienes reacondicionaron el equipo de instrumentación, y colaboraron en la construcción del dispositivo experimental.

Al PAPIIT por apoyar con recursos económicos la construcción del dispositivo experimental con el proyecto IN 116011.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin y a la Lic. Diana Carolina Vargas Ortega por su apoyo con la cámara de alta velocidad.

A los M. en I. Victor Ortiz y Juan Cesar Luna, y a la Ing. Diana Zicle Chavez por su apoyo en la realización de pruebas experimentales.

A la Ing. Elizabeth González, al Ing. Federico J. Ochoa y al M. en I. Alejandro Lara con quien aprendí y discutí aspectos importantes en la modelación física y numérica del fenómeno estudiado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM y sus trabajadores, en especial al Sr. David por dotarme un espacio de trabajo y su apoyo en un gran número de actividades.

A mi madre Cochita y abuelos Olinda y Loreto que con ilusión solo pudieron ver el inicio de este proyecto.

A mi esposa Deya, por todo su amor y sacrificios para darme su apoyo incondicional.

A mi padre Juanito y hermano Emmanuel por su ejemplo de perseverancia.

A mi bebé y sobrinos como muestra de empeño y pasión por el conocimiento.