

OLEAJE PROVOCADO POR DESLIZAMIENTO DE LADERAS EN EMBALSES. ESTUDIO DEL EFECTO DEL GRADO DE FRACTURACIÓN DEL MATERIAL DESLIZADO

Tesina del Máster en Sistemas de Ingeniería Civil

Ricardo Manuel Monteiro Alves

3 de septiembre de 2015

Universidad Politécnica de Madrid
E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos

Índice

1	Introducción.....	4
2	Consideraciones teóricas.....	5
2.1	Teorías aplicadas a olas generadas por deslizamientos.....	8
3	Modelación física.....	10
3.1	Modelos físicos en 2D con material granular.....	11
3.2	Modelos físicos en 2D con bloques	14
3.3	Modelos físicos en 3D con material granular.....	16
3.4	Modelos físicos en 3D con bloques	22
3.5	Modelos físicos combinados	24
3.6	Resumen	25
4	Referencias	27
5	Anexo 1	30

1 Introducción

El fenómeno de olas generadas por deslizamientos de laderas (*landslide generated impulse waves* término en inglés) es un evento formado por un proceso geo-mecánico (inestabilidad de la ladera y posterior deslizamiento) y un proceso hidrodinámico (generación y propagación de ola), el cual ha poseído una atención especial por parte de investigadores e instituciones gubernamentales a nivel mundial debido al carácter potencialmente catastrófico que éste posee y la necesidad de generar criterios adecuados para una gestión eficiente del riesgo asociado a este fenómeno.

En general toda la literatura técnica clásica de mecánica de suelos y de rocas es aplicable al deslizamiento de este tipo de laderas. Sin embargo, el efecto que producen los cambios en la profundidad de agua en el embalse (debido a la operación del mismo), tanto en el material como en las condiciones de la presión intersticial, son aspectos que influyen significativamente en este tipo de movimientos y que le dan un carácter particular a este proceso (ICOLD, 2002).

Además se debe tener en cuenta que los deslizamientos se deben clasificar de acuerdo a la posición relativa a la superficie del agua y al tipo de material constituyente dado que las características hidrodinámicas que se generan en el fluido son diferentes de acuerdo a estos criterios, como se ha podido comprobar en las campañas experimentales desarrolladas por (Ataie-Ashtiani & Najafi-Jilani, 2008; Ataie-Ashtiani & Nik-Khah, 2008; Fritz, Hager, & Minor, 2003b; Panizzo, 2004). De acuerdo al material constituyente se identifican los materiales de alta densidad (rocas, suelos y lodos) y los de baja densidad (glaciares y avalanchas de nieve). De acuerdo con la posición relativa se identifican los deslizamientos sub-aéreos, parcialmente sumergidos y submarinos o sub-acuosos.

El efecto inmediato de un deslizamiento de ladera sobre una superficie de agua estática es la generación de un tren de olas que se propaga tridimensional o bidimensionalmente de acuerdo a las condiciones del cuerpo que delimita el agua. El proceso de olas generadas por deslizamientos es un fenómeno físico descrito por 5 diferentes etapas (Garrote & Laguna, 2007): Desprendimiento o deslizamiento de material de ladera o material submarino; Generación de ola; Propagación de ola en vaso del embalse;

Interacción con embalse y márgenes; Propagación de onda aguas abajo y efecto sobre estructuras.

Por su parte, la segunda fase se puede subdividir en otras cinco fases: Impacto de masa en deslizamiento de alta velocidad (relativa al agua embalsada); Deformación del deslizamiento y penetración en el fluido; Separación del fluido; Formación hidrodinámica del cráter de impacto; Establecimiento claro del perfil de ola.

En el caso de la modelación numérica de las olas generadas por deslizamientos se han usado los enfoques clásicos de análisis de dinámica de fluidos newtonianos (Ecuaciones de Navier Stokes) o de análisis de olas (Ecuaciones de Boussinesq). Sin embargo la supuesta aleatoriedad existente en la generación de olas ha expuesto un grado de incertidumbre mayor, debido a que el tren de olas está en principio influenciado por las características cinemáticas del deslizamiento.

Estos aspectos han generado una serie de investigaciones experimentales y numéricas que han tenido como objetivo determinar las variables de las que depende el fenómeno de generación de oleaje y a su vez el tipo de tren de olas que se producen durante la propagación. En España, bajo el subprograma INNPACTO del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación, se llevó a cabo el proyecto “Desarrollo de Herramientas para el Análisis en Laderas con Riesgo Potencial sobre Infraestructuras Críticas (XLIDE)”, con el objetivo de aportar al colectivo técnico de herramientas para mejorar la capacidad de respuesta ante este tipo de eventos. El trabajo desarrollado durante este proyecto de investigación ha servido de base a esta tesis.

El estado de arte técnico y experimental correspondiente a este tema se resume a continuación.

2 Consideraciones teóricas

El estudio del fenómeno de generación y propagación de olas se basa en la determinación de sus características en función de determinados parámetros del deslizamiento que gobiernan el fenómeno y de las características geométricas del embalse. Las principales características del oleaje son: amplitudes (a), alturas de ola (H), movimiento de la superficie del agua (η), periodo (T), longitud de onda (L), celeridad o velocidad de

propagación (c) y la reflexión producida en la zona opuesta al deslizamiento. Las principales características del deslizamiento y de la geometría del embalse son: velocidad del deslizamiento (V_s), volumen (\mathcal{V}_s), masa (m_s), densidad (ρ_s), espesor (s), ángulo de deslizamiento (α), profundidad del embalse (h) y distancia al punto de impacto (x). En la Figura 1 se muestra un esquema de todos estos parámetros.

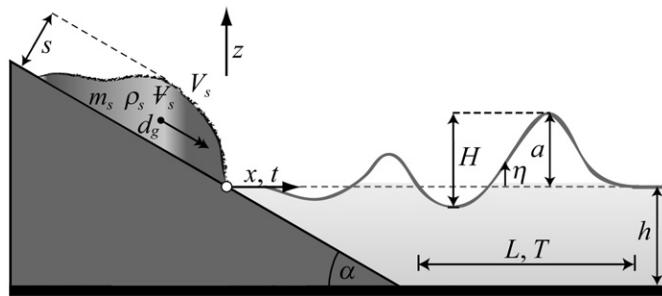


Figura 1. Esquema de los parámetros que gobiernan el fenómeno y de las características de las olas (V. Heller & Hager, 2011).

A su vez se debe mencionar que para minimizar la cantidad de variables estudiadas y analizadas en las diferentes investigaciones, mediante Análisis Dimensional han determinado una serie de parámetros adimensionales que se utilizan en las distintas publicaciones y que se muestran a continuación (V. Heller, 2007):

- Número de Froude del deslizamiento: $Fr = V_s/(g \cdot h)^{1/2}$
- Espesor relativo: $S = s/h$
- Masa deslizamiento relativa: $M = m_s/(\rho_w \cdot b \cdot h^2) = (\rho_s \cdot \mathcal{V}_s)/(\rho_w \cdot b \cdot h^2)$
- Distancia de propagación relativa: $X = x/h$
- Tiempo relativo: $Tr = t \cdot (g/h)^{1/2}$

donde b es la anchura del embalse. Cabe resaltar que para el caso en 3D la posición relativa se mide en coordenadas polares y por ende se mide en función de la distancia radial (r) y el ángulo de difracción (θ o γ).

La investigación de este tipo de fenómenos inició con el estudio teórico de los desastres ocurridos en el embalse de Vajont en Italia (Kiersch, 1961; Mueller, 1968; Müller, 1964) y las laderas de Bahía de Lituya en Alaska (Miller, 1960), de los que las publicaciones indicaban datos sobre las condiciones topográficas y geológicas del deslizamiento y la altura máxima de ola, así como los volúmenes de sobrevertido producidos. Estos estudios

se enfocaron en determinar la influencia de las condiciones intersticiales, el porcentaje de arcillas y la posible reactivación de antiguas fallas geológicas en el deslizamiento.

A raíz de estos eventos se inició el desarrollo de los primeros estudios experimentales (Kamphuis & Bowering, 1972; Noda, 1970) en los cuales se consideró que el fenómeno se producía por una transferencia entre la cantidad de movimiento que poseía el deslizamiento y el agua que está en reposo; la cual, luego de ser perturbada inicia un movimiento trasiente que se dispersa en el medio en el que está ubicado, con lo cual disipa la energía adquirida. La mayoría de estos experimentos se basaron en la determinación de la relación que existía entre la energía cinemática del deslizamiento y los parámetros del tren de olas. Sin embargo, los resultados experimentales revelaron que dependiendo de la magnitud (lo cual posteriormente se estudiará en función del espesor, longitud, forma, densidad y rigidez) y de la velocidad (expresada adimensionalmente por el número de Froude, Fr , con la profundidad del embalse, h , como longitud característica) del deslizamiento se producían formas de ola distintas. En muchas publicaciones actuales se hace referencia a que el trabajo de Noda (1970) es un referente en el análisis de este fenómeno ya que fue el primero que estableció la existencia de una división en la forma de ola con respecto a la velocidad de caída; definiendo cuatro tipologías: oscilatoria no lineal, transitoria, solitaria y disipativa con trasiente de vórtices. Además, desarrolló ecuaciones para el cálculo de la máxima amplitud de ola generada por caída de bloques (similitud con deslizamiento de rocas) que aplicaban al caso de ondas lineales y solitarias y que durante mucho tiempo fueron utilizadas por diseñadores para calcular los efectos de este fenómeno. En posteriores investigaciones (Ataie-Ashtiani & Najafi-Jilani, 2008; Carvalho & Carmo, 2007; Fritz, Hager, & Minor, 2004; Fritz, 2002; Andreas Zweifel, Hager, & Minor, 2006) se han comparado los resultados obtenidos contra estos criterios, encontrando diferencias significativas, las cuales se explican debido a la no consideración de material granular deformable y las suposiciones hechas para linealizar el problema. Aun así el trabajo de Noda se considera ejemplar y original y es siempre referenciado en toda la literatura técnica.

2.1 Teorías aplicadas a olas generadas por deslizamientos

Los resultados obtenidos en las diferentes campañas experimentales han permitido que se reconozca que las olas generadas por deslizamientos puedan ser modeladas mediante cuatro diferentes teorías de ondas no lineales, teniendo en cuenta que la onda lineal o sinusoidal (Figura 2 izquierda a) es un ideal, el cual es difícil que se presente en estos eventos (V. Heller & Hager, 2011). Las cuatro teorías son entonces:

- Teoría de Stokes (Stokes G.G., 1847) (Figura 2 izquierda b): Está basada en flujo irrotacional y asumiendo una distribución de presión no-hidrostática. Las partículas de agua describen órbitas abiertas, las olas son oscilatorias con pequeño transporte de masas. El rango de este tipo de ondas varía entre $2 \leq L/h \leq 20$ (Le Méhauté, 1976) y $L/h < 10$ para ondas de quinto orden (Keulegan, 1950) correspondiendo el número de Ursell a valores de $U < 10$.
- Teoría de Onda Cnoidal (Korteweg & DeVries, 1895) (Figura 2 izquierda c): Son un desarrollo de las ecuaciones generales de Boussinesq. Se derivan asumiendo distribución de presión hidrostática para la aproximación de primer orden y no-hidrostática para la de segundo orden, asumiendo flujo irrotacional. Tiene un perfil oscilatorio pero con transporte de masa de agua. Es aplicable para aguas someras, especialmente apropiadas para $U > 25$ (Keulegan, 1950) validas en el rango $L/h \geq 10$.
- Teoría de Onda Solitaria (Figura 2 izquierda d): derivada por Boussinesq en 1871 y Rayleigh en 1876 (V. Heller & Hager, 2011), asumiendo distribución de presión no hidrostática y flujo rotacional. Esta onda es traslativa; con un transporte de masa significativo (Le Méhauté, 1976) (lo que impide el carácter oscilatorio) y en el cual los efectos no lineales se balancean con los dispersivos (despreciando el efecto de la capa límite) para crear un frente de ola constante sin caída a lo largo de su avance horizontal. La definición matemática de celeridad (velocidad de onda) de la ola solitaria es ampliamente aceptada por diferentes investigadores como característica de la velocidad de olas generadas por deslizamientos sub-aéreos (e.g. Fritz, 2002; Heller, 2007; Kamphuis & Bowering, 1972).
- Teoría de ondas Bore (Figura 2 izquierda e): es aplicable a olas que se producen en aguas someras, en el cual debido a la perturbación de las partículas de agua,

éstas se mueven de manera aleatoria en vórtices turbulentos, lo cual crea una onda de un frente pronunciado con una cola que se aplana suavemente hacia atrás. Para las ecuaciones se asume una distribución de presión hidrostática y flujo irrotacional.

La clasificación de un tren de olas se realiza mediante observación del perfil de olas (V. Heller & Hager, 2011), la relación a/H o el criterio de Ursel, lo cual implica que para caracterizar la ola se requiera que el evento ya haya sucedido. En la investigación se Heller y Hager (2011) se utilizaron un total de 434 experimentos (211 propios y 223 de otros investigadores), donde obtienen que las olas generadas se ajustan a las cuatro teorías establecidas y determinan que existe una relación entre los parámetros del deslizamiento como la velocidad de impacto (representada por el Fr), la profundidad del embalse y el ángulo de deslizamiento con el tipo de ola generada obteniendo como resultado el gráfico de la Figura 2 (derecha).

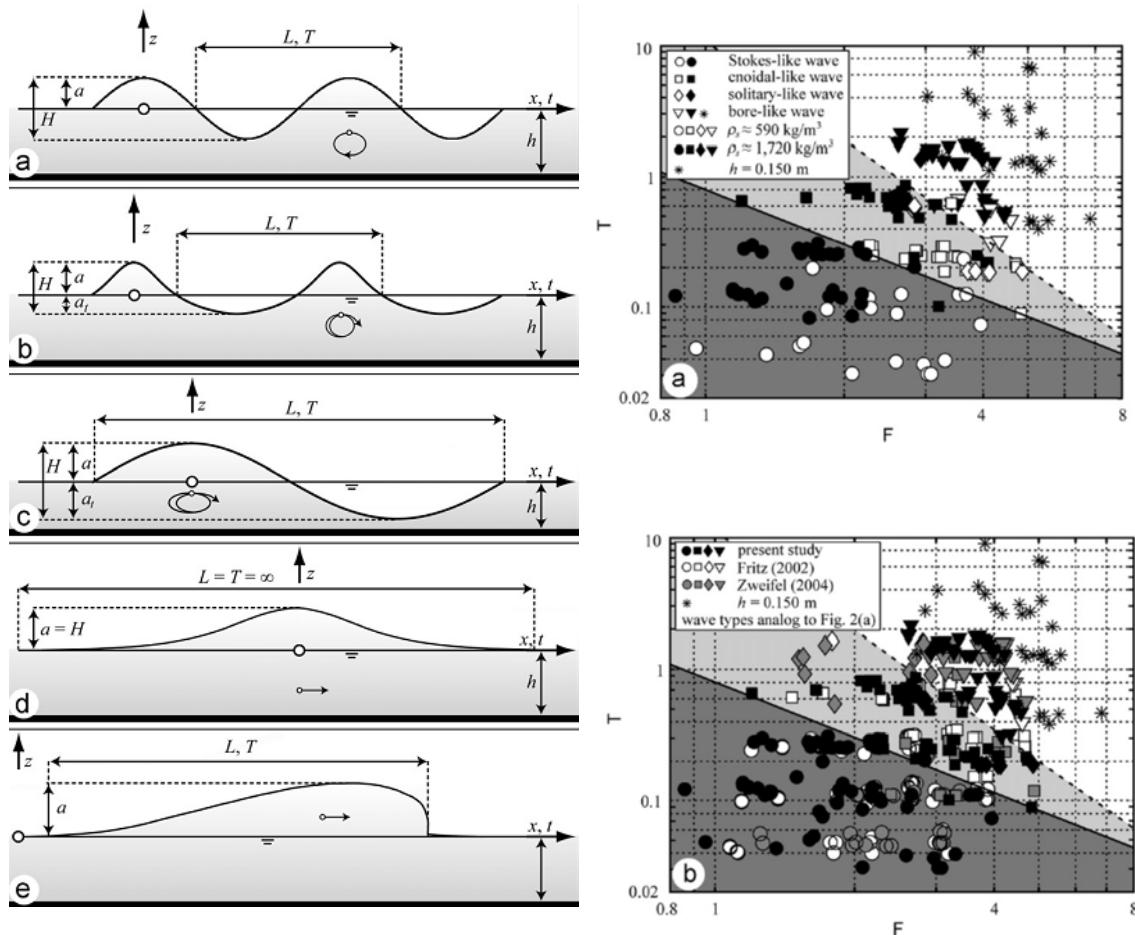


Figura 2. Tipologías de olas generadas por deslizamientos (izquierda). Gráficos para clasificación del tipo de ola en función del deslizamiento (derecha), donde $T=S^{1/3} \cdot M \cdot \cos[(6/7) \cdot \alpha]$ y $F=Fr$ (V. Heller & Hager, 2011).

3 Modelación física

La modelación física desarrollada en el tema de generación y propagación de ondas se ha basado en determinar la influencia que poseen las variables antes mencionadas, con el objetivo de proveer de herramientas de cálculo a los agentes encargados en la gestión de este tipo de elementos que sirvan para resguardar las infraestructuras y pueblos vecinos existentes.

A nivel de antecedente histórico se puede mencionar que el primer trabajo en modelación física de olas impulsadas fue realizado por Sir Scott Russel en 1984 (Marcello Di Risio & Sammarco, 2008), el cual utilizó bloques sólidos en caída libre sobre agua en reposo que estaba colocada en un canal, determinando el patrón de olas producido y derivando conceptos especialmente para olas solitarias. Posterior a ello, las investigaciones sirvieron de base para el inicio de la comprensión cualitativa y teórica del proceso (Huber, 1980; Kamphuis & Bowering, 1972; Noda, 1970; R. L. Wiegel, 1964; Robert L. Wiegel, Noda, Kuba, Gee, & Tornberg, 1970). A partir de estos experimentos existió un proceso de investigación teórica y numérica extenso (Fritz, Hager, & Minor, 2003a; Fritz et al., 2003b, 2004; Fritz, 2001, 2002; V. Heller, 2007; Law & Brebner, 1968; Panizzo, De Girolamo, & Petaccia, 2005; Panizzo, 2004; Slingerland & Voight, 1979; Walder, 2003; A. Zweifel, 2004).

La campaña experimental realizada por Fritz fue desarrollada en el Laboratorio de Hidráulica, Hidrología y Glaciología (VAW por sus siglas en alemán) del Instituto Federal de Tecnología de Suiza (ETH por sus siglas en alemán) en Zúrich como parte de un proyecto de investigación del gobierno suizo para crear un manual que sirviera a diseñadores y gestores suizos en el cálculo de éste fenómeno y las medidas preventivas que se deben llevar a cabo. Este proyecto comprende las investigaciones desarrolladas por Fritz (2002), Zweifel (2004) y Heller (2007) como parte de los trabajos para sus tesis doctorales y cuyos resultados han servido de base para realizar conclusiones sobre el fenómeno y mejorar los métodos de cálculo.

La Tabla 2 y Tabla 3 del Anexo 1 resumen las principales características de algunas de las campañas experimentales llevadas a cabo, separando por tipo de material deslizado (bloques o material granular). Más recientemente se ha modelado a la escala 1:500 el

possible deslizamiento de una ladera rocosa inestable detectada en un fiordo noruego en Åkerneset (Storfjorden) al oeste de Noruega de cara a poder predecir los posibles daños y zonas inundadas (Lindstrøm, Pedersen, Jensen, & Glimsdal, 2014).

3.1 Modelos físicos en 2D con material granular

Fritz (2002) realizó 137 ensayos con un material artificial para simular deslizamientos granulares usando las instalación de ensayos que se muestra en la Figura 3. Se considera un trabajo original en el campo principalmente debido a la utilización del sistema de medición de velocidades denominado *Velocímetro de Imágenes de Partículas* (PIV por sus siglas en inglés) y un aparato neumático para controlar las variables del deslizamiento (s , ∇s , V_s) de manera independiente. El trabajo se enfocó en la determinación de la hidrodinámica y transferencia de energía ocurrida en la zona de generación, producto del impacto del deslizamiento con el agua y a raíz del mismo se han publicado 3 artículos científicos (Fritz et al., 2003a, 2003b, 2004).

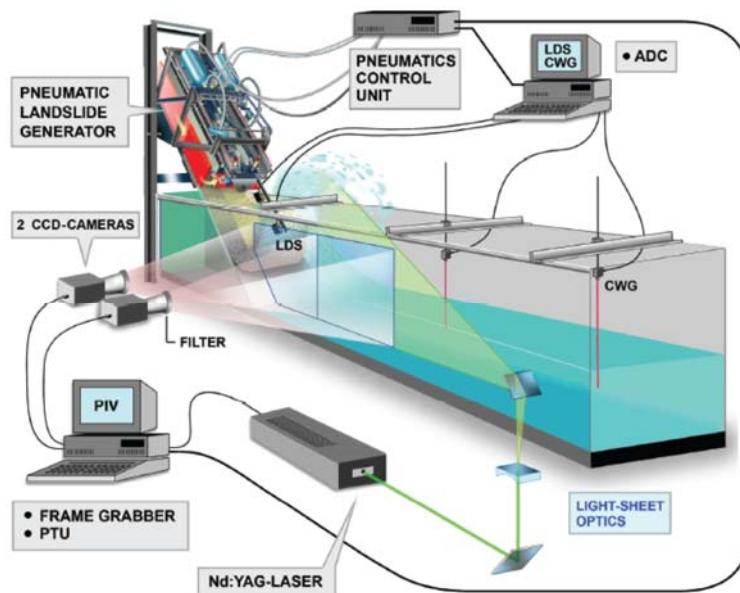


Figura 3. Configuración de la instalación de ensayos usada por Fritz (2002).

La Figura 4 muestra la ejecución de uno de los experimentos y la Figura 5 un ejemplo de los datos obtenidos con el sistema PIV donde se puede observar con detalle todos los momentos y fases del impacto. Además, mediante una técnica digital de tratamiento de imágenes se obtienen los vectores de velocidad de las partículas de agua y de esta manera se logra calcular la transferencia de energía que se produce en el impacto.

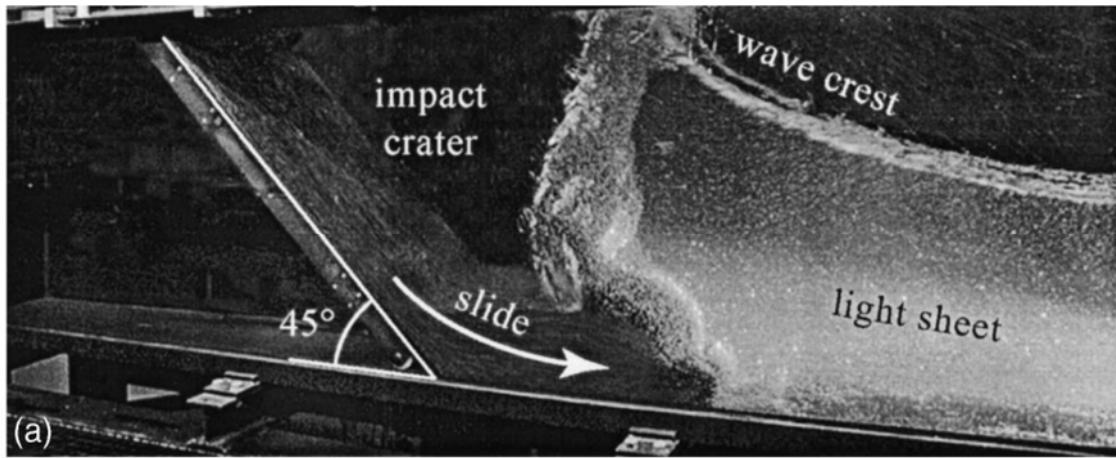


Figura 4. Generador neumático de deslizamientos durante un experimento donde se aprecia la separación de fluido y la creación de un cráter resultado del impacto (Fritz et al., 2004).

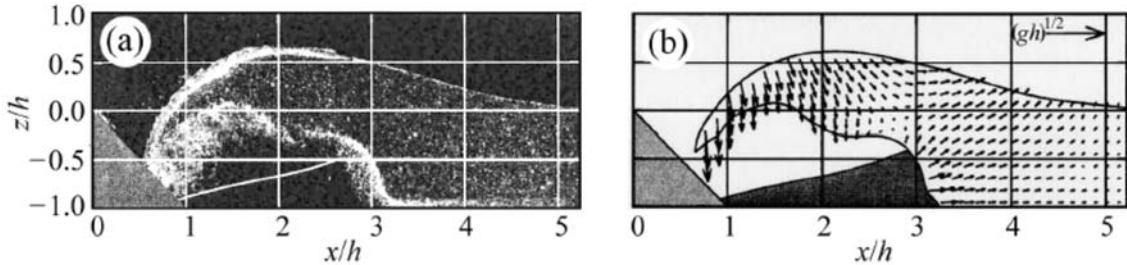


Figura 5. Cratera de impacto. Imagen obtenida con el sistema PIV (izquierda) y procesada para obtener los vectores de velocidad (derecha) (Fritz et al., 2004).

Los deslizamientos ensayados tuvieron condiciones de impacto variable, con Números de Froude entre $1,0 < Fr < 4,8$ con lo cual se obtuvieron 4 tipos de olas no-lineales distintas: oscilatorias, transitorias, solitaria y dissipativa tipo Bore. Según los autores aproximadamente entre 2,0% a 30,0% de la energía del deslizamiento se transfiere a la ola principal dependiendo esta transferencia de Fr y S así como las características del cráter de impacto. Aproximadamente entre 4% a 50% se transfiere al tren de olas.

Encontró correlaciones entre el tipo de cráter formado con las características del deslizamiento Fr y S , definiendo 4 posibles estados: impacto sin separación, impacto con separación local, cráter con colapso en cola y cráter con impacto en frente de ola.

Las conclusiones obtenidas de estos análisis fueron la deducción de una ecuación adimensional (basada en regresión lineal) para la amplitud máxima de cresta, la cual depende del Fr y S con $R^2=0.93$ (Fritz et al., 2004).

Zweifel et al (2006) publicaron un documento basado en los resultados experimentales obtenidos por Zweifel (2004) para su tesis doctoral y que poseía una configuración

experimental igual a la de Fritz. Se realizaron un total de 86 ensayos con material granular con el objetivo de analizar la influencia de la densidad en las características de generación de olas (mediante el sistema PIV) y la caída de la amplitud de la primera onda durante su propagación. Las conclusiones más relevantes de este estudio se basan en la influencia que poseen la velocidad de impacto (representada mediante Fr), el espesor y la densidad del deslizamiento. Se reconoce que se generan 4 tipos de ondas distintas y además se resalta la importancia que poseen las fuerzas boyantes en deslizamientos granulares de baja densidad ($\rho_s < \rho_w$) cuando el parámetro $Fr < 2.0$ (deslizamientos de velocidad de impacto media-baja).

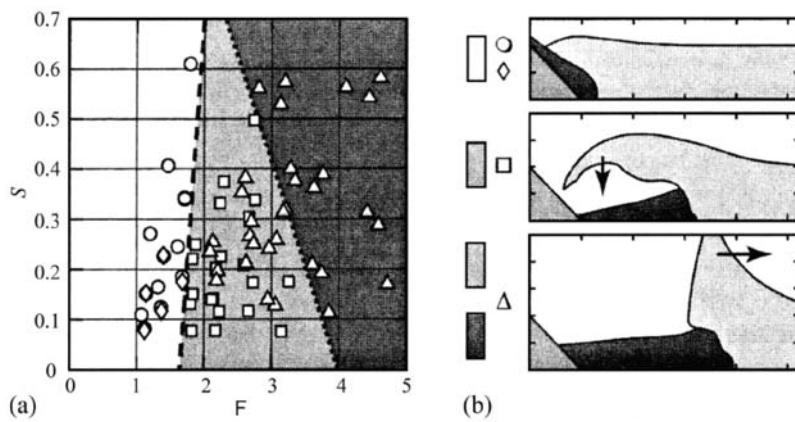


Figura 6. Clasificación de tipos de cráter formados durante el impacto en función de parámetros del deslizamiento (Fritz et al., 2003b).

Heller (2007) desarrolló la última investigación del proyecto de investigación suizo elaborado para la construcción del Manual de Diseño VAW-Mitteilungen 206. En este caso se realizaron 211 ensayos con el objetivo de confirmar las observaciones y conclusiones hechas por Fritz y Zweifel anteriormente referenciados y, además, validar ecuaciones empíricas desarrolladas para las diferentes propiedades del tren de olas. Al igual que sus predecesores utilizó el sistema PIV para la determinación de los campos de velocidad en el agua posterior al impacto y para el cálculo de la energía existente en la ola.

Concluyó que el principal parámetro del que depende este fenómeno es la velocidad de impacto en su forma adimensional (Fr) y se introdujo el término *Parámetro de Impulso* (Impulse Product Parameter en inglés) con el cual se desarrollaron las ecuaciones adimensionales para las propiedades de las olas. Además realizó la clasificación del tipo de ola a formarse, obteniendo una buena correlación con los experimentos anteriores de

Fritz y Zwifel. El Parámetro de Impulso referido anteriormente se expresa de la siguiente manera:

$$P = F \cdot S^{1/2} \cdot M^{1/4} \cdot (\cos[(6/7) \cdot \alpha])^{1/2} \quad [1]$$

Indica que la granulometría y la forma del deslizamiento pueden ser despreciadas y que en este último, su efecto puede ser bien representado por su espesor (s) y su volumen (V_s). Concluye que el efecto del ángulo del deslizamiento debe ser tomado en cuenta en la formulación de ecuaciones empíricas del fenómeno.

Posterior a esta investigación Heller et al (2008) realizaron otra campaña experimental enfocada en la determinación del efecto-escala que posee el análisis de este tipo de fenómenos. Se realizaron 18 ensayos con la misma configuración e instrumentación de los ensayos anteriores en el VAW. Los ensayos fueron divididos en familias, las cuales poseían parámetros de entrada escalados mediante la escala de Froude y se concluyó que esta formulación es errónea y puede afectar los resultados obtenidos en experimentos con profundidades de agua someras ($h < 0.150m$) ya que la hidrodinámica se ve afectada por la viscosidad y la tensión superficial del agua. Además, existe una fuerte variación en las características de la entrada y salida de aire durante el impacto y el principal parámetro afectado es la máxima amplitud de la ola.

Los autores concluyeron que para evitar el efecto a escala se debe garantizar que en el ensayo el número de Reynolds sea mayor que $R > 3.0 \cdot 10^5$ y el número de Webber $W > 5000$. En la Figura 7 se muestran las zonas donde los efectos de escala son observados.

3.2 Modelos físicos en 2D con bloques

Walder (2003) realizó 203 ensayos con bloques sólidos con el objetivo de determinar las características de las olas en la zona de propagación para calibrar un modelo numérico basado en las ecuaciones de Navier Stokes de modo Euleriano. La zona de generación es despreciada en el modelo y su estudio se simplifica a un análisis adimensional para determinar la ola generada en función del tiempo de sumergencia (t_s) del deslizamiento. Obtiene que este dato depende de las propiedades adimensionales Fr y Volumen ($V^* = V_s / (b \cdot h^2)$).

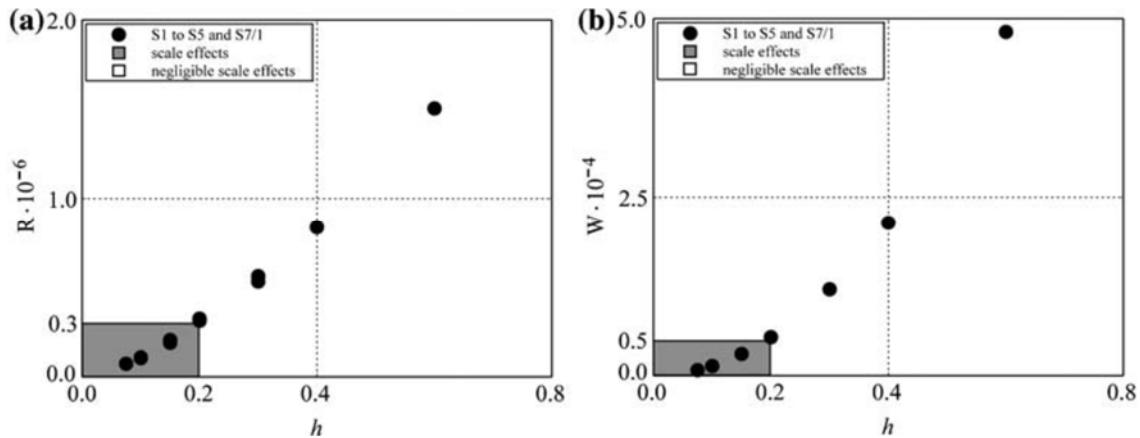


Figura 7. Región donde se aprecian efectos de escala (gris) para ensayos de ondas con agua y aire, profundidad de agua versus el número de Reynolds (R) y el número de Weber (W) (Valentin Heller, Hager, & Minor, 2008).

Carvalho & Do Carmo (2007) desarrollaron una investigación en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Coimbra en Portugal; en la cual se realizaron 20 ensayos experimentales simulando el deslizamiento a través de elementos cúbicos de cemento de 10x7x8cm lo cual se asemeja más a deslizamiento de roca o de bloque sólido que al caso granular. El objetivo de los ensayos fue analizar la generación y propagación de las olas generadas por deslizamientos y además el rebalse y fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre la ladera opuesta a la zona de falla.

A nivel teórico en esta publicación se indica que el material de fondo del embalse posee una importancia en la propagación de olas y debe ser tomado en cuenta en futuras campañas experimentales. Los autores concluyeron que los parámetros que mayor influencia tienen sobre el proceso son la velocidad de impacto, la profundidad de agua en el embalse y el volumen del deslizamiento y comprueban criterios como los de Noda para la diferenciación de tren de olas o el de la ecuación empírica de Fritz para la velocidad del deslizamiento en función de la diferencia de elevaciones del centro de masa.

Anteriormente, los mismos autores habían utilizado los resultados de estos experimentos para compararlos con 2 modelos numéricos (Carvalho & Carmo, 2006), de los cuales uno estaba basado en la teoría de Boussinesq y otro en las ecuaciones de Reynolds-2D desarrolladas a partir de las de Navier Stokes acopladas con un método de volumen de fluido. Se observó que los modelos sobreestimaban la amplitud y depresión de la primera ola, siendo el segundo de los modelos el que producía menos error.

(Sælevik et al. (2009) realizaron una campaña experimental modelando en 2D la zona del embalse de Akneset en Noruega; con una escala geométrica 1:500, con el objetivo de observar los efectos que podría causar un deslizamiento de rocas sobre la presa de dicho embalse. Se estudiaron 3 deslizamientos potenciales (escenarios) y se realizaron 3 ensayos por cada uno de ellos, utilizando el sistema PIV referido anteriormente en las investigaciones de Fritz. Se analizaron las características de la zona de generación y el tren de olas producido en la zona de propagación y sus resultados se utilizaron para determinar si las ecuaciones de Boussinesq podían servir para determinar el campo de velocidades horizontal de las olas y por ende su amplitud (a) y perfil (η). Las olas generadas en los ensayos poseían carácter oscilatorio no-lineal.

Los autores concluyeron que los criterios utilizados a bloques sólidos deben ser distintos que los utilizados para material granular debido a las diferencias observadas en la separación de flujo y cráter de impacto en comparación con los experimentos de Fritz (2002). Hicieron la indicación que estos dos procesos dependían del volumen (V_s) y la longitud del deslizamiento (l_s). Además comprobaron que las ecuaciones de Boussinesq (en forma no lineal) determinaban de manera aceptable la fase inicial de generación de olas por comparación con los resultados del PIV).

Panizzo (2004) realizó una serie de experimentos como parte de su investigación para su tesis doctoral en la Universidad de L'Aquila en Italia, de los cuales inicialmente se realizaron ensayos con bloques (2D) repitiendo el experimento de Russel (1837), simulándolo con la técnica de modelación numérica SPH (Figura 4). Se realizaron 135 ensayos que sirvieron para orientar la construcción de un modelo en 3D (108 calibrando el aliviadero a colocar) que posteriormente fue desarrollado además para obtener una mayor visión del proceso mediante el uso de la técnica matemática de Fourier denominada transformada de ondícula (wavelet transform), con lo cual se calculó la energía de la ola y su propagación.

3.3 Modelos físicos en 3D con material granular

En la tesis de Heller (2007) se expresa que el arreglo experimental correspondió a un tanque amplio donde las sondas de nivel se colocaron en ángulos entre 90º y -90º con respecto a la dirección del deslizamiento. El deslizamiento fue de tipo granular mediante

la mezcla de materiales con diámetros de 8mm a 30mm. La profundidad de agua en el embalse fue de 0.12m y 0.36m, con números de Froude entre 0.5<Fr<3.7.

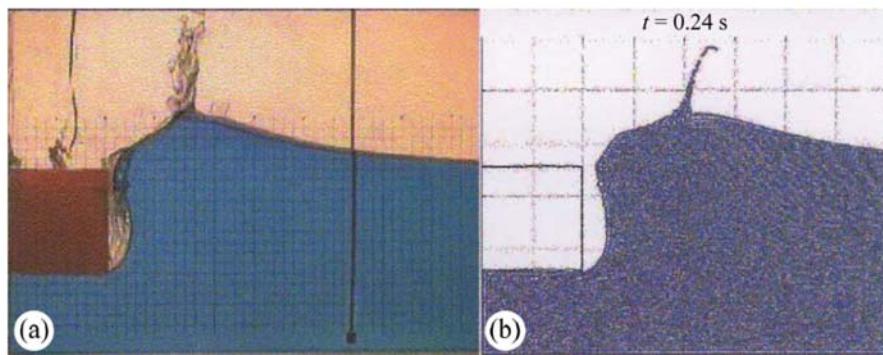


Figura 8. Experimento de Russell's (1837) con generador de olas en el modelo hidráulico (izquierda) y en la modelación numérica con SPH (Panizzo, 2004).

Se indica que en las conclusiones del autor se expresa que durante los experimentos se observaron ondas sinusoidales, cnoidales y solitarias y se comprobó que la celeridad de onda solitaria representa adecuadamente el comportamiento de todas las ondas. A través del análisis de ondas se determinó que aproximadamente entre 1% a 40% de la energía cinética del deslizamiento se transfiere a la onda.

Huber y Hager (1997) volvieron a realizar un análisis de los resultados en 3D y obtuvieron ecuaciones para la caída de ola, la amplitud máxima y la máxima altura de ola presentada. Determinaron que en 3D los efectos de dispersión lateral provocan una caída más rápida de la onda y que este valor depende tanto del ángulo de difracción (θ) como de la distancia radial (r). En este caso el parámetro adimensional de caída fue proporcional a $H(r, \theta) \propto r^{-0.66}$ lo cual es mucho mayor en comparación con el obtenido para el caso en 2D que fue de $H(x) \propto x^{-0.25}$.

En la tesis de Panizzo (2004) se presenta un gráfico que compara los resultados de la altura de ola máxima, H_M , con los de Hubber y Hagger (1997) y se observa que los resultados poseen una menor dispersión en comparación con los de Fritz, lo cual indica que las características en 3D son similares pero aún se ven afectadas por el tipo de material utilizado.

Mohammed, McFall y Fritz (2011) en el Laboratorio de Investigación de Oleaje de la Universidad Estatal de Oregon, EE.UU. realizaron un modelo en tres dimensiones utilizando el generador neumático de deslizamientos, ya utilizado en modelos de 2D, por

lo que era posible tanto el control de la velocidad, el volumen y el espesor del deslizamiento.

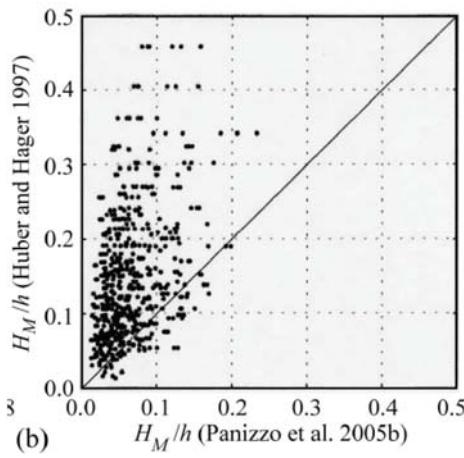


Figura 9. Comparación de la amplitud máxima relativa resultados de ensayos tridimensionales de Panizzo et al. (2005) y Huber & Hager (1997) (V. Heller, 2007).

El experimento se llevó a cabo a través de una rampa con inclinación de 27,1° en una cuenca de oleaje de dimensiones 48,4 m de largo, 26,54 m de ancho y 2,1 m de profundidad Figura 10. La masa de deslizamiento estaba formada por árido natural y redondeado de río con $D_{50}=13,7\text{mm}$, densidad aparente de $1,76 \text{ t/m}^3$, porosidad de 0,31 y ángulo de fricción de 23°. Un total de 65 ensayos fueron realizados variando la profundidad del agua, la velocidad de deslizamiento y el volumen del material de deslizamiento. Las profundidades elegidas fueron 0,3 m, 0,6 m, 0,9 m, 1,05 m, 1,2 m y 1,35 m para obtener información de las características de las olas desde aguas profundas a someras. Las masas de deslizamiento fueron 1293 kg y 646 kg. Las velocidades de impacto estaban entre 2,35 m/s y 4 m/s con números de Froude que variaban entre $0,65 < Fr < 2,33$. En esta campaña se ensayaron diferentes posiciones relativas con respecto a la superficie del embalse.

Los deslizamientos de materiales granulares tiene un perfil longitudinal caracterizado por un frente abrupto que conduce a un máximo espesor de deslizamiento y un gradual decaimiento hacia la cola. La pendiente de la parte delantera y la propagación del deslizamiento dependerán del volumen de deslizamiento inicial y la velocidad de liberación de la caja. El máximo espesor de deslizamiento es obtenido de las medidas de las formas que va tomando a lo largo de su caída por la rampa de deslizamiento.

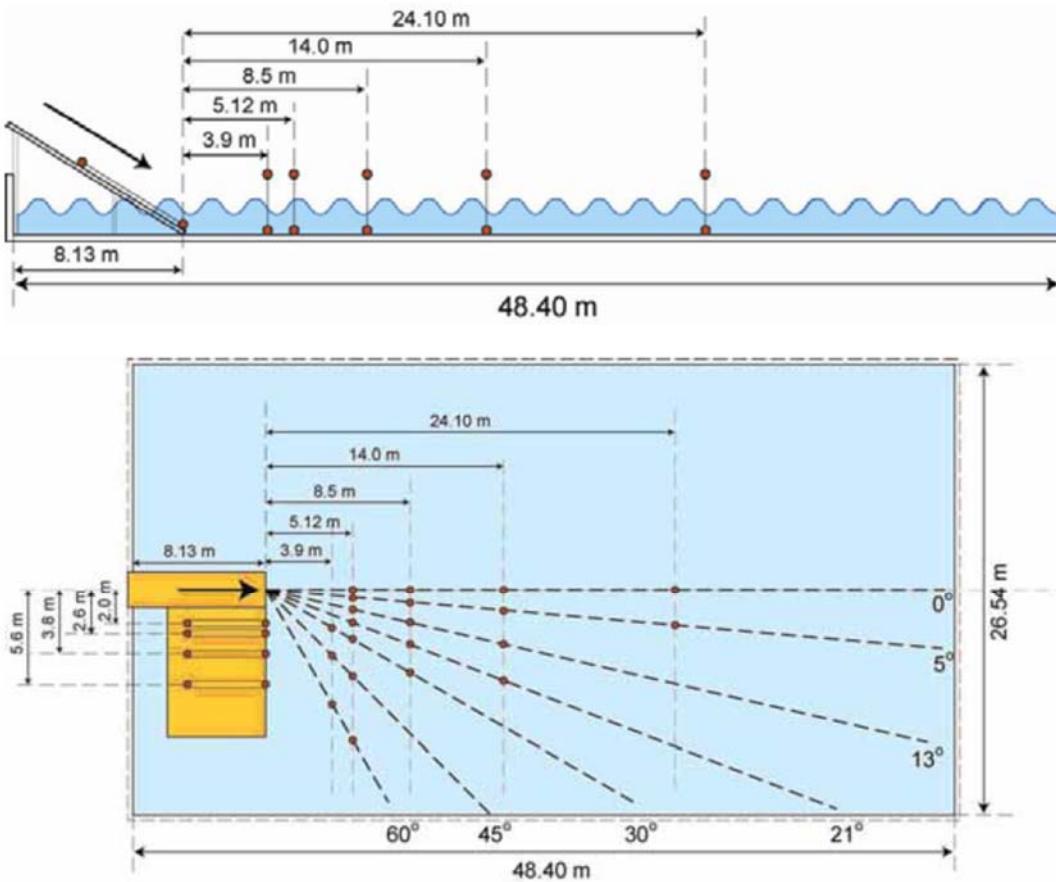


Figura 10. Colocación de las sondas de nivel en la piscina de ensayos para medir las características del oleaje (Fritz et al., 2009).

Después del derrumbe en el plano de la rampa, el movimiento del material es acompañado por una difusión lateral no confinada. La anchura lateral del deslizamiento de tierra influye en la anchura del cráter de impacto sobre el agua. El ancho de deslizamiento de tierra, el espesor y la velocidad durante el impacto determinará el porcentaje de masa, cantidad de movimiento y flujo de energía del deslizamiento. Como consecuencia, influyen en la propagación radial de las ondas generadas y los ratios de decaimiento de las amplitudes de onda. La anchura y la velocidad del frente se determinan a partir de las secuencias de imágenes grabadas por la cámara PIV.

Durante la fase inicial del movimiento del deslizamiento de tierra, la velocidad de su frente corresponde a la velocidad que lleva la caja del generador neumático de deslizamientos. Después de la liberación de la caja, el material de deslizamiento sigue un movimiento gravitatorio, determinado por las imágenes de las cámaras Figura 11. La velocidad máxima se halla en el centro del deslizamiento de tierras y aumenta de forma constante por la pendiente debido a la fuerza gravitatoria imponiéndose a las pérdidas

por fricción. El campo de velocidades de la masa de deslizamiento es máxima en su núcleo y ésta va disminuyendo progresivamente según nos acercamos a la parte exterior del deslizamiento Figura 12.

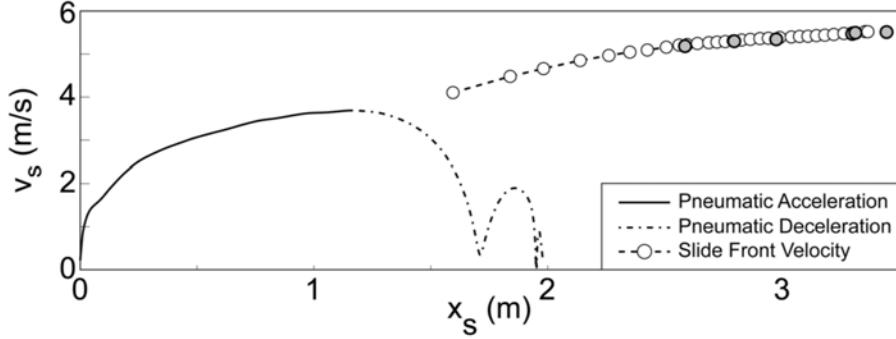


Figura 11. Velocidad del frente del deslizamiento para el caso en el que el volumen deslizado es de $0,756 \text{ m}^3$ y la velocidad de liberación de la caja de $3,8 \text{ m/s}$. Los círculos huecos son mediciones de la cámara lateral y los círculos llenos del sistema PIV (Mohammed et al., 2011).

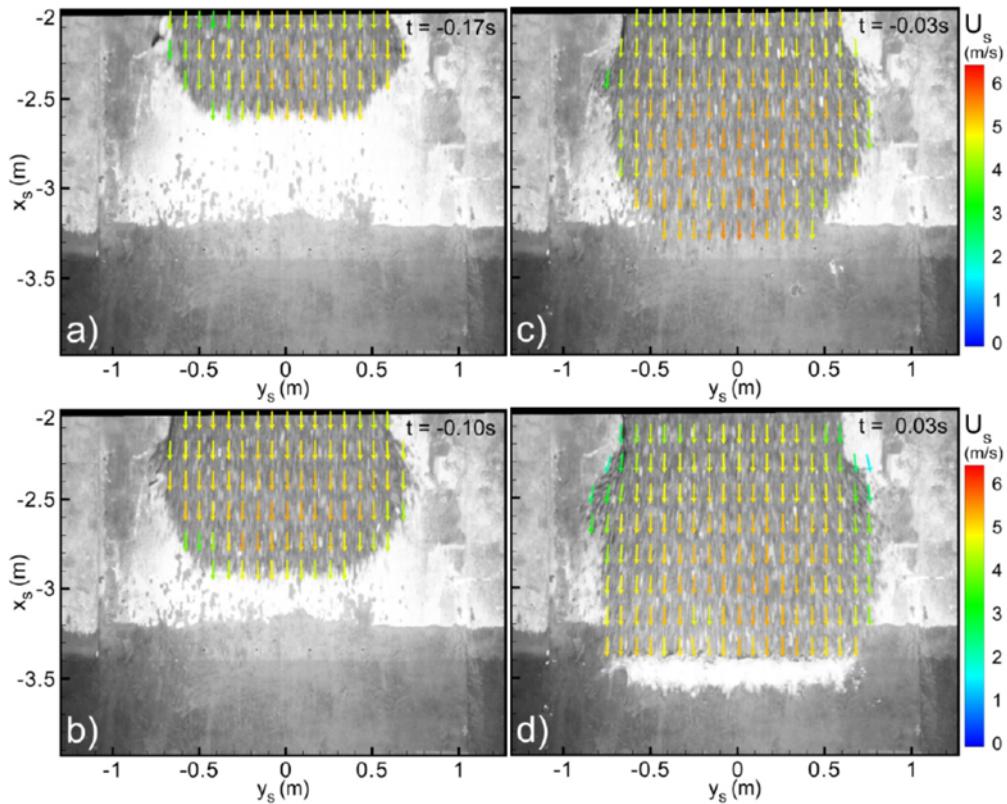


Figura 12. Distribución de velocidades del material granular tomado con el sistema PIV (Mohammed et al., 2011).

Las olas generadas por un deslizamiento de tierra son generadas por una rápida transferencia de la cantidad del movimiento del material deslizado al cuerpo de agua. Esto da como resultado un desplazamiento del agua alrededor de la región de impacto que se mueve radialmente hacia el exterior que forma la cresta de la ola principal. La

carrera del agua producida por el impacto del deslizamiento de tierra da lugar a la formación de la depresión del frente de onda principal. El desplazamiento de agua alcanza el punto máximo cuando las fuerzas de retroceso tienden a conducir el fluido de vuelta a su estado no perturbado. Debido a la dirección del movimiento del deslizamiento y la transferencia de la cantidad de movimiento, las fuerzas de retroceso son más fuertes en la dirección lateral en comparación con la dirección longitudinal.

El colapso del cráter y la posterior eclosión del agua forman la cresta del frente de la segunda ola. Por conservación de la masa, la eclosión es seguida por una depresión en la superficie del agua que forma la segunda ola. En el proceso en el que la superficie se está restaurando, el campo de flujo consiste en oscilaciones transitorias de *run-up* y *run-down*. Esto provoca la formación del tren de olas final después de dos olas principales. En la Figura 13 se ilustra todo el proceso de formación del tren de olas provocado por un deslizamiento descrito anteriormente.

En este trabajo se han medido también las longitudes de *runup* medidas en laderas y líneas de costa simuladas en laboratorio mediante una rampa adicional ubicada delante de la rampa de deslizamiento. Usando un nuevo sistema de medición denominado Multi-transducer acoustic array (MTA) los autores han registrado la forma del depósito submarino formado por el deslizamiento de tierra (Figura 14).

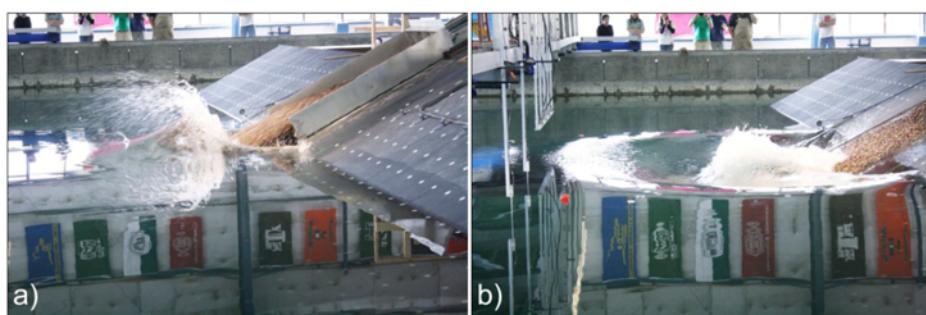


Figura 13. Proceso de formación de las dos primeras ondas del tren. Primer impacto y formación de la primera cresta por transferencia de cantidad de movimiento del deslizamiento al cuerpo de agua en reposo (izquierda). Formación del cráter que resulta en la depresión de la primera onda y su colapso que resulta en la formación de la cresta de la segunda onda (derecha) (Mohammed et al., 2011).

Hubers, Fritz y McFall (2011) continuaron la línea de investigación en el Laboratorio de Investigación de Oleaje de la Universidad Estatal de Oregon realizando 132 ensayos en un modelo en la que la ola era generada por un deslizamiento en torno a una isla cónica. La masa de deslizamiento fue granular y deformable usando el sistema de deslizamiento

neumático de estudios anteriores. La isla cónica consistía en un cono truncado de acero con 1,83 m de altura, base con 10 m de diámetro y ángulo de sus generatrices con la base de 27°. Situado en su parte superior se hallaba el generador neumático de deslizamientos (Figura 15).

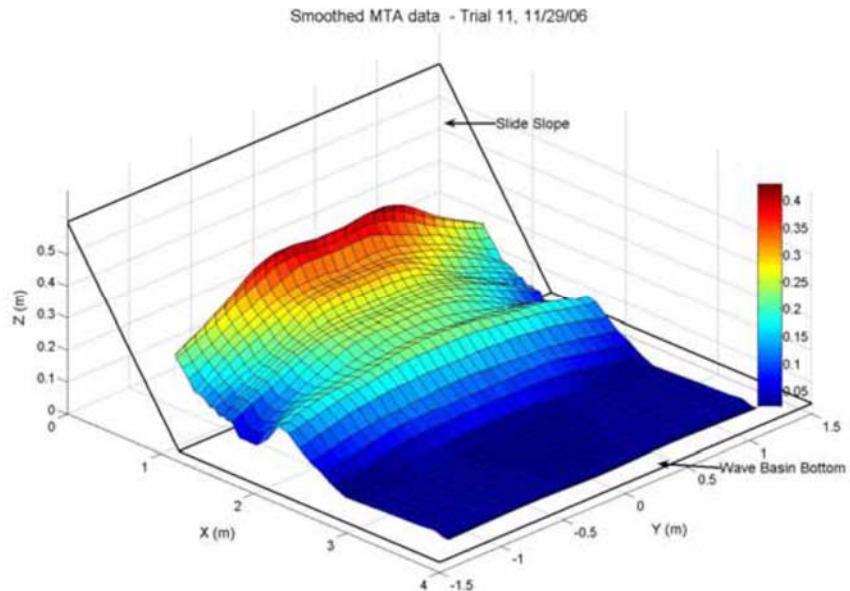


Figura 14. Perfil tridimensional del depósito de material deslizado obtenido con el sistema MTA (Fritz et al., 2009).

El modelo fue ensayado varias veces combinando diferentes condiciones de profundidad del agua (30 cm, 60 cm, 90 cm y 120 cm), cantidad de material de deslizamiento (680 kg y 1380 kg) y velocidad de impacto controlada por el generador neumático de deslizamientos. El equipo de recogida de datos estaba formado por el sistema PIV, cámaras de video estándar, una cámara de video de alta velocidad, limnímetros capacitivos, sensores de nivel *runup* y el sistema MTA referido anteriormente. A la data de la publicación, la mayor parte de los datos recogidos no habían sido procesados.

3.4 Modelos físicos en 3D con bloques

Como se mencionó anteriormente, Panizzo (2004) desarrolló una campaña experimental para su tesis doctoral en la cual realizó inicialmente ensayos con bloques en 2D que le sirvieron para determinar las condiciones de análisis que llevaría a cabo para desarrollar un ensayo tridimensional. El ensayo 3D se ejecutó dentro de un tanque rectangular de amplias dimensiones, donde un bloque sólido que desliza por una rampa impacta la

superficie del agua desde un vértice del tanque (Figura 9). En total el autor ha realizado 288 ensayos.



Figura 15. Generador de deslizamientos colocado sobre la isla cónica (Hubers et al., 2011).

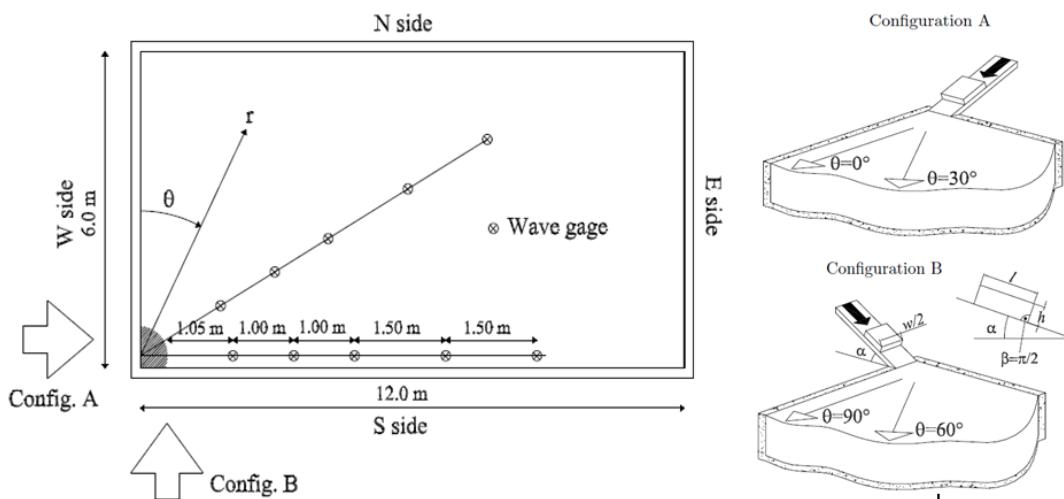


Figura 16. Esquema de la piscina de ensayos, de la colocación de las sondas de nivel y las direcciones de impacto asumidas en las configuraciones A y B (izquierda). Configuraciones A y B del modelo tridimensional (derecha) (Panizzo, 2004).

El arreglo experimental simula la cuarta parte de un embalse simétrico. Concluye que el movimiento sumergido tiene un papel importante en el proceso de generación del tren de olas y que un simple parámetro adimensional, el tiempo relativo del movimiento sumergido, puede incluir o expresar el mecanismo del deslizamiento. Observó a través

del análisis de ondas (wavelet analysis) la existencia de 3 tipos de olas: lineal, transitoria y solitaria dependientes del volumen deslizado y de la velocidad en el impacto. Introduce un nuevo parámetro que cuantifica si la onda se propaga con características de onda solitaria u oscilatoria. Define ecuaciones empíricas de predicción de las características de las ondas.

Sobre los efectos del oleaje provocado por deslizamientos en islas fue estudiado por Di Risio et al. (2009).

3.5 Modelos físicos combinados

Ataie-Ashtiani y Najafi-Jilani (2008) publicaron una investigación desarrollada en la Universidad Tecnológica de Sharif en Irán, donde llevaron a cabo ensayos con bloques y material deformable del tipo granular en un entorno tridimensional.

En total se desarrollaron 120 ensayos, de los cuales 102 se realizaron con bloques sólidos (con diferentes formas) y 18 con materiales granulares (de los cuales 9 se hicieron con el material confinado y 9 sin confinar). Esta diferenciación se hizo con el objetivo de determinar si la deformabilidad del deslizamiento tenía influencia en el patrón de olas generado así como la amplitud máxima.

En los resultados de la publicación se comprobó que la deformabilidad es un factor determinante en el comportamiento de las olas, y se observó que a medida que el material es más deformable la amplitud de ola se reduce y la longitud de onda y el periodo aumentan. Además, observó que deslizamientos de bloques sólidos poseen una mayor capacidad para transferir su energía, generando olas con mayores amplitudes. Todos los experimentos fueron llevados a cabo para Fr menores que 1,5. El tren de olas observado correspondió con olas oscilatorias no-lineales. Los autores concluyeron que los parámetros que más influyen en el proceso de olas por deslizamientos son el ángulo de inclinación de la ladera, la velocidad en el impacto, el espesor, la dinámica del movimiento y la deformabilidad del deslizamiento. Proponen ecuaciones empíricas diferenciando entre zonas de proximidad al impacto (near-field) y alejadas del impacto (far-field).

3.6 Resumen

En la última década se han generado una gran serie de campañas experimentales las cuales han mejorado sustancialmente el conocimiento existente en el tema de generación de olas por deslizamiento. Los experimentos desarrollados dentro del proyecto suizo han marcado un hito debido a la utilización del sistema PIV debido a la observación minuciosa del impacto del deslizamiento y, por consiguiente, del proceso de transferencia de energía.

Cabe resaltar que se han producido ensayos tanto para condiciones de bloques sólidos rígidos como de materiales deformables del tipo granular en los cuales se han analizado con detalle la influencia de diferentes parámetros del deslizamiento y geométricos como la forma, la granulometría (D_g), la densidad (ρ_s), el espesor (s), el volumen (V_s), la velocidad en el impacto (V_s) y la profundidad de agua en el embalse (h), el ángulo de deslizamiento, entre otros. La Tabla 1 muestra el rango de variación de algunos parámetros del deslizamiento controlados en diferentes campañas experimentales.

El control de la velocidad de impacto sólo ha podido ser independiente de su posición mediante el uso del generador neumático de deslizamientos, lo cual ha permitido que en las investigaciones donde se haya utilizado esta aplicación el rango de variables estudiadas haya sido mayor; de lo contrario la velocidad es función de la aceleración de la gravedad y del coeficiente de fricción entre el material deslizado y el plano de deslizamiento.

De un modo general, las diferentes investigaciones han permitido desarrollar formulaciones empíricas predictivas de las principales características del tren de olas como por ejemplo su máxima amplitud, que puedan ser utilizadas por diseñadores para gestionar los posibles efectos sobre estructuras vecinas.

Los estudios de Panizzo (2004) e Ataie-Ashtiani y Najafi-Jilani (2008) conforman los estudios mejor documentados en un ámbito tridimensional. Hasta lo que se ha podido indagar, queda por estudiar la caída de bloques sólidos en ambientes tridimensionales.

Tabla 1. Resumen de los rangos de variación de algunos parámetros del deslizamiento controlados en diferentes campañas experimentales.

AUTOR	V_s [m/s]	Fr	S	v^*
Fritz, H. <i>Ph.D. Thesis</i> (2002)	2,76-8,20	1,08-4,66	0,076-0,663	0,045-0,910
Zweifel, A. <i>Ph.D. Thesis</i> (2004)	2,60-8,77	1,25-4,89	0,125-1,134	0,116-3,757
Heller, V. <i>Ph.D. Thesis</i> (2007)	2,06-8,34	0,86-6,83	0,09-1,64	0,19-5,94
Zweifel, A.; Zuccala D.; Gatti, D. (2007)	1,37-5,13	0,57-2,11	0,33-0,88	0,185-1,504
Heller, V.; Hager, W.; Minor, H. (2008)	2,03-6,04	1,68-4,25	0,15-0,53	0,216-0,90
Walder, J.; Watts, P. (2003)	1,00-3,50	1,00-4,10	0,238-1,190	NI
Panizzio <i>Ph.D. Thesis</i> *3D Test (2004)	2,8-4,4	0,99-2,21	0,11-0,425	NI
Carvalho, R.; Do Carmo, J. (2007)	0,3-2,2	NI	NI	NI
Ashtiani, B. Nik-Khah, A. (2008)	0,40-3,50	0,30-1,40	0,100-0,40	NI
Fritz, H.; Mohammed, F.; McFall, B. (2009)	2,35-4,00	0,65-2,33	0,11-1	3,5-14

Por último la utilización de los resultados de investigaciones bien documentadas para compararlos con la salida de modelos numéricos de reciente desarrollo y matemáticamente potentes (métodos SPH o PFEM), se corresponde con una metodología que permitirá calibrar y validar los mismos. Un primer intento en este concepto corresponde con la investigación desarrollada por Salazar et al. (2012), el cual se basa en la aplicación del modelo matemático PFEM; el cual combina los criterios de un sistema de partículas con formulación lagrangiana y el método de los elementos finitos, con las publicaciones de Fritz (2001) y Sælevik et al. (2009).

4 Referencias

- Ataie-Ashtiani, B., & Najafi-Jilani, A. (2008). 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., & Nik-Khah, A. (2008). Impulsive waves caused by subaerial landslides. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(3), 263–280.
- Carvalho, R. F., & Carmo, J. S. A. (2006). Numerical and experimental modelling of the generation and propagation of waves caused by landslides into reservoirs and their effects on dams. In *River Flow* (pp. 483–492).
- Carvalho, R. F., & Carmo, J. S. A. (2007). Landslides into reservoirs and their impacts on banks. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(6), 481–493.
- Di Risio, M., De Girolamo, P., Bellotti, G., Panizzo, A., Aristodemo, F., Molfetta, M. G., & Petrillo, A. F. (2009). Landslide-generated tsunamis runup at the coast of a conical island: New physical model experiments. *Journal of Geophysical Research*, 114(C1), C01009. doi:10.1029/2008JC004858
- Di Risio, M., & Sammarco, P. (2008). Analytical Modeling of Landslide-Generated Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134(1), 53–60. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:1(53)
- Fritz, H. M. (2001). Lituya Bay case rockslide impact and wave run-up. *Science of Tsunami Hazards*, 19(1), 3–22.
- Fritz, H. M. (2002). *Initial phase of landslide generated impulse waves*. Swiss Federal Institute of Technology Zürich.
- Fritz, H. M., Germanovich, L., Puzrin, A., Kim, S., Mohammed, F., & Yoo, J. (2009). *Landslide Tsunami Generator Experiments*.
- Fritz, H. M., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2003a). Landslide generated impulse waves. 1. Instantaneous flow fields. *Experiments in Fluids*, 35(6), 505–519.
- Fritz, H. M., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2003b). Landslide generated impulse waves. 2. Hydrodynamic impact craters. *Experiments in Fluids*, 35(6), 520–532.
- Fritz, H. M., Hager, W. H., & Minor, H.-E. (2004). Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of Waterway, Port, Costal and Ocean Engineering*, 130(6), 287–302.
- Garrote, L., & Laguna, F. (2007). Generación de olas por deslizamiento. In *Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses*. Zaragoza.
- Heller, V. (2007). *Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics*. Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich.

- Heller, V., & Hager, W. H. (2011). Wave types of landslide generated impulse waves. *Ocean Engineering*, 38(4), 630–640.
- Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2008). Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves. *Experiments in Fluids*, 44(5), 691–703.
- Huber, A. (1980). *Schwallwellen in Seen als Folge von Felsstürzen*. Eidgenöss. Techn. Hochsch., Zürich. Retrieved from <http://www.worldcat.org/title/schwallwellen-in-seen-als-folge-von-felssturzen/oclc/255972325>
- Huber, A., & Hager, W. H. (1997). Forecasting impulse waves in reservoirs. In *19th Congrès des Grands Barrages* (p. C.31: 993–1005). Florence: ICOLD.
- Hubers, G., Fritz, H. M., & McFall, B. (2011). Effects of landslide generated tsunamis on a conical island.
- ICOLD. (2002). Reservoir landslides: Investigation and Management - Guidelines and case histories, *Bulletin 1*.
- Kamphuis, J. W., & Bowering, R. J. (1972). Impulse waves generated by landslides. In *Proceedings of the 12th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 575–588). Washington D.C.: ASCE.
- Keulegan, G. H. (1950). *Wave motion. Engineering hydraulics*. New York: Wiley.
- Kiersch, G. (1961). Vajont Reservoir Disaster: Geologic causes of tremendous landslides accompanied by destructive flood wave. *Civil Engineering*, 34(3), 32–39.
- Korteweg, D. J., & DeVries, G. (1895). On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. *Philosophical Magazine, Series 5*(39), 422–433.
- Law, L., & Brebner, A. (1968). On water waves generated by landslides. In *Third Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics* (pp. 155–159). Sidney.
- Le Méhauté, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. New York: Springer.
- Lindstrøm, E. K., Pedersen, G. K., Jensen, A., & Glimsdal, S. (2014). Experiments on slide generated waves in a 1:500 scale fjord model. *Coastal Engineering*, 92, 12–23. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.06.010
- Miller, D. J. (1960). *Giant waves in Lituya Bay, Alaska. 354 C*. Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp354C>
- Mohammed, F., McFall, B., & Fritz, H. M. (2011). Tsunami Generation by 3D Deformable Granular Landslides. In *Solutions to Coastal Disasters* (pp. 310–320). ASCE. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41185\(417\)28](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41185(417)28)
- Mueller, L. (1968). New considerations on the Vajont Slide. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, 6(1/2), 4–91.

- Müller, L. (1964). The rock slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology*.
- Noda, E. (1970). Water Waves Generated by Landslides. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(4), 835–855. Retrieved from <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?7001043>
- Panizzo, A. (2004). *Physical and numerical modelling of subaerial landslide generated waves*. Università degli studi di L’Aquila.
- Panizzo, A., De Girolamo, P., & Petaccia, A. (2005). Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(12), 1–23.
- Russel, J. S. (1837). Report on waves. In *Meeting of the British Association for the Advancement of Science* (pp. 417–496). Liverpool.
- Sælevik, G., Jensen, A., & Pedersen, G. (2009). Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide, Western Norway. *Coastal Engineering*, 56(9), 897–906.
- Salazar, F., Oñate, E., & Morán, R. (2012). Modelación numérica de deslizamientos de ladera en embalses mediante el método de partículas y elementos finitos (PFEM). *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 28(2), 112–123.
- Slingerland, R. L., & Voight, B. (1979). *Occurrences, properties and predictive models of landslide-generated impulse waves*. (B. Voight, Ed.) *Rockslides avalanches* (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Stokes G.G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 441–455.
- Walder, J. S. (2003). Tsunamis generated by subaerial mass flows. *Journal of Geophysical Research*, 108(B5), 1–19. doi:10.1029/2001JB000707
- Wiegel, R. L. (1964). Water Wave Equivalent of Mach-Reflection. In *Coastal Engineering* (pp. 82–102). ASCE. Retrieved from <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?286045>
- Wiegel, R. L., Noda, E. K., Kuba, E. M., Gee, D. M., & Tornberg, G. F. (1970). Water Waves Generated by Landslides in Reservoirs. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(2), 307–333. Retrieved from <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?17311>
- Zweifel, A. (2004). *Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe*. ETH Zürich.
- Zweifel, A., Hager, W. H., & Minor, H.-E. (2006). Plane Impulse Waves in Reservoirs. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*.

5 Anexo 1

Tabla 2. Ensayos experimentales de generación y propagación de olas por deslizamiento con bloques sólidos.

AUTOR	Datos Generales				Dimensiones Tanque o Canal					Dimensiones y Características Bloque Sólido					Medición del "deslizamiento" y zona de impacto					Medición del tren de olas					Comentarios
	Nº Ensayos	Repeticiones	Tipo	Variables estudiadas	Largo	Profundidad	Ancho	Angulo de Rampa	Profundidad de agua	Largo	Ancho	Espesor	Material	Angulo Frontal	Video-cámaras	Frecuencia	Posición	Error inducido	Limímetros	Transductores de Presión	Frecuencia y Precisión	Posición	-		
	-	-	-	-	[m]	[m]	[m]	°	[mm]	[m]	[m]	[m]	-	-	-	Hz	-	[mm]	-	-	Hz (mm)	-	-	-	-
Walder, J. Watts, P (2003)	103	3	2D (Impacto)	V _s ; H _s ; h _o ; s _t ; A	3,00	1,00	0,285	11,2 ; 15,0 ; 19,5	51 ; 90 ; 130	0,094 - 0,401	0,15	0,031 ; 0,051	Nylon (relleno de material granular)	32	1	30	En viga-guía por encima	3 - 15	-	-	-	-	-	El tren de olas se midió con video-cámaras posicionada 0,5m del extremo aguas abajo del canal. Se dibujó una cuadrícula de 5mm de espaciamiento para las mediciones. El error inducido es de 1-2mm	
	78	1	2D (Release-On-Shore)	V _s ; H _s ; V _o ; h _o ; s _t ; A	6,00	1,00	0,20	30	73 - 182	0,094 - 0,402	0,15	0,031 ; 0,052	Nylon (relleno de material granular)	33	1	30	Desde un costado con cuadrícula de 5mm de espaciamiento			-	-	-	-	-	
	22	2	2D (Release-On-Shore)	V _s ; H _s ; V _o ; h _o ; s _t ; A	6,0	1,00	0,20	30	42 - 145	-	0,14	0,050	Cilindro Acero	-					-	-	-	-	-		
Panizzio Ph.D. Thesis (2004)	27	1	2D	M _s ; Ε _s ; I _s ; h _o ; A; λ	4,0	0,40	0,11	NA	230,00	0,05; 0,10; 0,15	0,10	NI	Bloque sólido de densidad 2200 kg/m ³	0	1 (300 Mpxs)	25	A un costado	0,5-1mm	6 (de Resistencia eléctrica)	-	50	Eje axial, colocadas de manera aleatoria	Bloque Sólido en caída libre, medido mediante un acelerómetro piezoelectrónico monoaixial (Metromess CB41), de 1000Hz de frecuencia. La caída se realizó desde 3 posiciones de inmersión distintas		
	108	1	2D (pared vertical)	M _s ; Ε _s ; I _s ; h _o ; A; λ; estructura desague	3,40	0,40	0,11	NA						0											
	288	1	3D	V _s ; I _s ; h _o ; A; λ; ángulo de incidencia	12,0	1,20	6,00	16; 26; 36	400; 800	0,42	0,60; 1,20	0,090; 0,180	90	1 (300 Mpxs)	25	Desde arriba	0,5-1mm	10 (Resistencia eléctrica)	-	50	Colocadas en 2 ejes que forman un ángulo de 30°	Se utiliza una estructura de desague en 2 lados del tanque, calibrada con ensayo 2D			
Carvalho, R.; Do Carmo, J. (2007)	20	1	2D (Avalancha de rocas)	V _s ; H _s ; V _o ; h _o ; t _s ; A; λ	12,0	1,50	1,00	30,7 ; 39,5	300 - 550	0,10	0,07	0,08	Calcareo (G _s =2,38 n=0,40 φ=23-26°)	90	1	NI	A un costado	NI	5	4 (ubicados en talud aguas abajo)	20 Hz (1,0)	Eje axial del canal con 2,0m de espaciamiento	Se analizaron 2 volúmenes de deslizamiento formados por bloques con las dimensiones expuestas en ese apartado. Además se analiza el impacto de la ola y la reflexión que se produce en el talud opuesto al lado de generación.		
Zweifel, A.; Zuccala D.; Gatti, D. (2007)	4	1	2D	V _s ; V _o ; h _o ; A; λ	11,0	1,00	0,50	45	300; 600	0,34	0,50	0,20	Madera y=1,3T/m ³	90	1 Velocímetro de Imágenes de Partículas (PIV) constituido por un Nd:YAG laser, una video-cámara y una lámina de luminosidad se utiliza para medir la dinámica en la zona de impacto					7 CWG (de Capacitancia)	Error= 15-20%	Eje axial del canal con 1,0m de espaciamiento	Los bloques fueron soldados desde el reposo y alcanzaron velocidades de impacto entre 1,37-2,42m/s, mucho menor que los granulares		
Ashtiani, B. Nik-Khah, A. (2008)	102	2	3D	Forma, V _s ; V _o ; s _t ; h _o ; h _c ; α; A; λ; n; Rigidez	25,0 (pero el aparato utilizado poseía 6m de longitud.)	1,80	2,50	15 - 60	500 ; 800	8 Tipología de bloques distintas, de forma regular, pero dimensión y angulo frontal variable. Hechos de acero de 2mm de espesor					2	25	1 en vista superior y 1 en posición lateral	NI	-	8 (Validyne Series DP15)	300 (0,35-3,5)	Eje axial con 0,90m de espaciamiento	Debido a las dimensiones relativas entre los bloques y el ancho del canal se considera que el ensayo posee características tipo 3D. La rampa fue lubricada para proveer una superficie sin fricción.		
Sælevik, G.; Jensen, A.; Pedersen, G. (2009)	3	3	2D	V _s ; V _o ; s _t ; h _o ; A; λ	25,00	1,00	0,51	35	600	1,0; 1,6 2,0	0,45	0,12; 0,16	Acero	45	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV), mediante 1 Fotocámara de 1000Hz, con un láser de pulso dual (Quanttronix Darwín) y esferas poliméricas de 50μm. El foco de visión fue de 0,45x0,45m. Las imágenes se procesaron con sistema DigiFlow®					3 (acústicas, marca Banner U-gage S18)	-	300	Eje axial con espaciamiento variable.	El deslizamiento fue modelado mediante bloques modulares de 0,50m o 0,60m con un "gap" de 0,05m entre bloques. En la medición del tren de olas también se utilizó el sistema PIV con 2 cámaras con foco de visión combinado de 0,80x0,45m y 333Hz	

Tabla 3. Ensayos experimentales de generación y propagación de olas por deslizamiento con materiales granulares.

AUTOR	Datos Generales				Dimensiones Tanque o Canal					Dimensiones y Características Material Granular						Medición del "deslizamiento" y zona de impacto				Medición del tren de olas				Comentarios	
	Nº Ensayos	Repeti- ciones	Tipo	Variables estudiadas	Largo	Profundidad	Ancho	Angulo de Rampa	Profundida- d de agua	D ₅₀	γ	G _s	Porosidad (n)	Largo	Ancho	Espesor	Video- cameras	Frecuencia	Posición	Error inducido	Limnímetros	Transductores de Presión	Frecuencia y Precisión	Posición	
	-	-	-	-	[m]	[m]	[m]	°	[mm]	[mm]	[T/m ³]	-	-	-	[m]	[m]	[m]	-	[Hz]	-	[mm]	-	-	Hz (mm)	-
Fritz, H. <i>Ph.D. Thesis</i> (2002)	137	1	2D	V _s ; s; V; h; A; c, λ , T, η	11,0	1,00	0,50	45	300-675	4	1,72	2,64	0,39	Forma, Volumen y Velocidad de Impacto están controlados por el Generador Neumático de Desl.	0,050 - 0,199	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV) con laser de doble pulso Nd-YAG; foco de visión de 0,80x0,80m; además 1 cámara CCD tomando imágenes a 15Hz y esferas poliméricas de 1,6mm.	7 CWG (de Capacitancia)	-	500 (±1,5mm)	Eje axial del canal con 1,0m de espaciamento	Además se utilizaron 2 Sensores laser para medir el perfil vertical del deslizamiento con frecuencia de 100Hz				
Zweifel, A. <i>Ph.D. Thesis</i> (2004)	86	1	2D	V _s ; s; V; h; A; c, λ , T, η	11,0	1,00	0,50	45	150-600	4; 5	0,59 ; 1,01 ; 1,34 ; 1,72	0,955 ; 2,372 ; 2,429 ; 2,745	0,40	Forma, Volumen y Velocidad de Impacto están controlados por el Generador Neumático de Desl.	0,075 - 0,189	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV) con laser de doble pulso Nd-YAG; con foco de visión de 0,80x0,80m; además una cámara CCD de doble marco tomando imágenes a 15Hz y esferas poliméricas de 2mm.	7 CWG (de Capacitancia)	-	Depende de cantidad de aire entrante y saliente	Eje axial del canal con 1,0m de espaciamento	Slide material were made by a composites of two artificial uniform and cylindrically shape granulates of two different densities.				
Zweifel, A.; Zuccala D.; Gatti, D. (2007)	7	1	2D	V _s ; V; h; A; λ; η	11,0	1,00	0,50	45	300; 600	5 ± 1	0,59	0,955	0,40	variable	0,472	0,12 ; 0,24	La velocidad del deslizamiento fue controlada mediante un instrumento neumático que se utilizaba para "lanzar" el deslizamiento	7 CWG (de Capacitancia)	-	Error: 15- 20%	Eje axial del canal con 1,0m de espaciamento	El material no se encontraba confinado. Además se utilizaron 2 Sensores laser ubicados a lo largo de la rampa, para medir el perfil vertical del deslizamiento.			
Heller, V. <i>Ph.D. Thesis</i> (2007)	211	1	2D	V _s ; V; h; A; λ; η	11,0	1,00	0,50	30-90	150-600	2; 4; 5; 8 y mezcla	0,59; 1,72	0,955 ; 2,745	0,40	Forma, Volumen y Velocidad de Impacto están controlados por el Generador Neumático de Desl.	0,050 - 0,250	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV) con laser de doble pulso Nd-YAG; con foco de visión de 0,80x0,80m; además una cámara CCD de doble marco tomando imágenes a 15Hz y esferas poliméricas de 2mm.	7 CWG (de Capacitancia)	-	500 (±1,5mm)	Eje axial del canal con distantiamiento variable	Además se utilizaron 2 Sensores laser para medir el perfil vertical del deslizamiento con frecuencia de 100Hz produciendo un error de ±0,15m/s				
Heller, V.; Hager, W.; Minor, H. (2008)	18	1	2D (efecto escalas)	V _s ; s; V; h; ts; A; λ , T, η	11,0	1,00	0,51; 0,25; 0,125	45	75-600	8; 4; 2 (Grano- metría homogé- nea)	1,338 - 1,592	2,372 - 2,745	0,39 - 0,45	0,15 ; 0,30; 0,60	0,472	0,059; 0,118; 0,236	En 7 ensayos se utilizó un generador de deslizamiento neumático para controlar la velocidad del deslizamiento con una presión de hasta 4,5bar. Se utilizó una cámara de alta resolución y frecuencia en el costado del canal para observar la zona de impacto.	7 CWG (de Capacitancia)	-	500 (±1,5mm)	Eje axial del canal con 1,0; 0,50 o 0,25m de espaciamento	2 Sensores laser para medir el perfil vertical del deslizamiento con frecuencia de 100Hz			
Ashtiani, B.; Nik- Kah, A. (2008)	9	2	3D	Forma, V _s ; V; s; l; h; ho; α; A; λ ; η; Rígidez	25,0 (pero el aparato utilizado poseía 6m de longitud.)	1,80	2,50	30- 60	800	7 - 9	1,8 - 2,0	-	-	-	-	Simulado mediante sección triangular. Triángulo rectángulo dimensiones 0,15m; 0,26m; 0,30m. (Similar a uno de los bloques sólidos)	2	25	1 en vista superior y 1 en posición lateral	NI	-	8 (Validyne Series DP15)	300 (0,35-3,5)	Eje axial con 0,90m de espaciamento	El material granular NO fue confinado antes del ensayo.
	9	2	3D	Forma, V _s ; V; s; l; h; ho; α; A; λ ; η; Rígidez																				El material granular fue confinado con una malla sintética que permitía que toda la masa se moviera homogéneamente	
Fritz, H.; Mohammed, F.; McFall, B. (2009)	65	1	3D	V _s ; V; h; F _z ; A;	48,80	2,10	26,50	27,1	300-1350	13,7	1,76	-	0,31	Forma, Volumen y Velocidad de Impacto están controlados por el Generador Neumático de Desl.	0,15-0,3	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV). También se utilizó un transductor múltiple de barrido acústico (Multiple Transducer Acoustic array MTA) que permítia hacer un estudio batimétrico del fenómeno, trazando un modelo de la superficie.	21 CWG (de Capacitancia)	1 (MTA)	-	De forma radial y a diferentes distancias	El material granular era redondeado y proveniente del río.				
Fritz, H.; Hubers, G.; McFall, B. (2011)	132	1	3D	V _s ; V; h; F _z ; A;	48,80	2,10	26,50	27	300-1200	-	-	-	-	Forma, Volumen y Velocidad de Impacto están controlados por el Generador Neumático de Desl.	-	Se utilizó el velocímetro de imágenes de partículas (PIV). También se utilizó un transductor múltiple de barrido acústico (Multiple Transducer Acoustic array MTA) que permítia hacer un estudio batimétrico del fenómeno, trazando un modelo de la superficie.	31 CWG (de Capacitancia)	1 (MTA)	-	De forma radial y a diferentes distancias. Se colocaron limnímetros en la zona opuesta al cono del impacto	La isla cónica consistía en un cono truncado de acero en la que sus dimensiones quedaban definidas por su altura de 1,83 m, su diámetro de la base 10 metros y el ángulo que formaba el suelo con sus generatrices de 27°. El material granular era redondeado y proveniente del río. Las masas de deslizamiento fueron 680 kg y 1360 kg				

Landslide impulse waves in reservoirs. An experimental research on the effect of the fragmentation of the sliding material

Oleaje por deslizamiento de laderas en embalses. Investigación experimental del efecto de la fragmentación del material deslizado

R.M. Alves, R. Morán & M.Á. Toledo

Technical University of Madrid. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Civil Engineering Department: Hydraulics, Energy and Environment. 28040 Madrid.

Abstract

The paper presents the results of an experimental research about impulse waves generated by landslides in reservoirs. The aim of the investigation is to study the effect of the degree of fragmentation of the sliding material on the generated waves. Based on the Froude similarity, landslide impulse waves were studied using a three-dimensional physical model to analyze the effect of fragmentation of sliding blocks. Three material types were tested, non-fractured, slightly fractured and highly fractured, keeping constant the apparent volume of the samples. Three different sliding angles and four still water depths were tested varying between 35° and 45°, and 30 cm and 60 cm, respectively. Most of the wave types observed, about 97%, were nonlinear falling 86% of those observations in the Stokes theory range. In 88% of the cases the second wave crest exceeded the leading crest in height. A predictive model for the maximum wave height is proposed.

Keywords: Impulse waves; Landslides; Fragmentation; Reservoirs; Three-dimensional models.

1 Introduction

The phenomenon of impulse waves in reservoirs generated by landslides has been studied by the academic and technical communities worldwide especially because of its potentially catastrophic consequences for dams and for downstream populations due to overtopping or run-up events. Two different physical processes are involved in the generation of impulse waves: landslide and the hydrodynamic response of the water body. Such response can be subdivided into three phases: wave generation, propagation and interaction with the dam and shoreline (Garrote & Laguna 2007). Thus, for a better understanding of the wave generation and propagation, efforts must focus on getting good correlations between the geotechnical characteristics of the landslide and the parameters of the wave train.

The focus of the present study is on the effect of the fragmentation of subaerial landslides over the wave formation and propagation characteristics, mainly on the maximum wave amplitude and height, in a three dimensional physical model. Other studies on the assessment of impulse waves were carried out in two-dimensional physical models with gravel type material (Fritz et al. 2004; Zweifel et al. 2006; Heller & Hager 2010) and with sliding blocks (Kamphuis & Bowering 1972; Panizzo 2004; Carvalho & Carmo 2007; Sælevik et al. 2009). Three-dimensional physical models with gravel type material were also performed (Bregoli et al. 2013) as well as with blocks (Panizzo et al. 2005; Enet & Grilli 2007). Studies on underwater and subaerial landslides using rigid blocks with different shapes and deformable sliding masses simulated by granular type material were carried out in three-dimensional physical models (Ataie-Ashtiani & Najafi-Jilani 2008; Ataie-Ashtiani & Nik-Khah 2008).

2 Physical model and methodology

2.1 Test set-up

A test facility including a pool 602 cm long, with 445 cm of maximum width, 294 cm of minimum width and 85 cm deep, was constructed (Figure 1). The pool has a longitudinal symmetry axis.

The sliding ramp is an aluminum rectangle 285 cm long and 150 cm wide resting on a telescopic frame that allows to change the sliding angle. The frame with the ramp is centered in the narrowest zone of the pool. Together with the ramp there are other accessories used to perform the tests (Figure 2): a box used to store the material, closed by a gate that allows to sustain the sliding material before the test initiation. A rapid opening of the gate, through a mechanism provided with a spring, avoid external interferences with the sliding process.

The gate is used to define in the space and time the beginning of each slide. Is made of galvanized iron and consists of a frame approximately 50 cm high and 150 cm wide, a 3 mm plate, a rotation axis on the upper beam and the above mentioned mechanism that permits a quick opening. It is placed all along the width of the ramp, perpendicular to the longitudinal axis of the slide, and 62 cm from the ramp upper edge.

The storage box is made of 3 mm aluminum plates and is 60 cm wide, 30 cm long and 15 cm high (internal measures). It is centered in the width of the ramp just behind the gate. Its front face, the one in contact with the gate, is open to enable the release of the sliding material when the opening mechanism of the gate is triggered. The box is attached to the ramp.



Figure 1. General view of the pool used in the test campaigns (left) and its dimensions in meters (right). The upper conduit in the left image have nothing to do with the facilities used in the experimental campaign.

2.2 Materials

Three materials were tested in order to simulate different degrees of fragmentation: non-fragmented (M1), slightly fragmented (M2) and highly fragmented (soil) (M3). For the non-fragmented material, a single concrete block 60 cm wide, 30 cm long and 15 cm high was used. The slightly fragmented material consisted on the former concrete block divided into eight cubic blocks with edges 15 cm long. To simulate the highly fragmented material, a gravel was used, with a mass median diameter (D_{50}), corresponding to the sieve size at 50% of the cumulative distribution, equal to 1.26 cm and 1.55 for the uniformity coefficient (C_U) (Table 1, Figure 3). The uniformity coefficient is given by the following expression:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [1]$$



Figure 2. View of the sliding ramp and its accessories.

The concrete used for M1 and M2 has the following composition: 11105 N of gravel, 7868 N of sand, 3237 N of cement (*CEM I 52,5 R* according to *UNE-EN 197-1:2000*), 245 N of filler and 1422 N of water what resulted in a concrete density of $23878 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$. Porosity and void ratio are assumed to be negligible, because the concrete porosity and the space between cubes (M2) in its initial form correspond to a small air volume in comparison with the porosity of the gravel. So density in dry state is equal to the concrete density, what results in a specific gravity of the solid constituents (G_s) around 2.43. The gravel used for material M3 have a dry density of $1458 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and a density of its solid constituents of $2565 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ what results in a G_s around 2.57. Porosity and void ratio of the gravel are respectively 0.41 and 0.69.

The specific surface area (ss), defined as the total surface area of a material per unit of mass, was used to quantify the degree of fragmentation. Materials M1 and M2 showed specific surface areas of $9.586 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.643 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. To obtain the surface area per unit of volume it is necessary to multiply these quantities by the density of the solid constituents, resulting 23.33 m^{-1} and 40 m^{-1} for M1 and M2, respectively. The specific surface area of a soil made of spherical or cubical particles, with cumulative grain size distribution represented by a straight line in the standard semilogarithmic plot is given by (Santamarina et al. 2002):

$$ss = \frac{3 \cdot (C_U + 7)}{4 \cdot \rho_w \cdot G_s \cdot D_{50}} \quad [2]$$

where ρ_w is the water density. Assuming material M3 as a granular material composed by spherical particles, using Eq.2 results in a specific surface of $2.021 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ or $5.087 \cdot 10^2 \text{ m}^{-1}$. The relative volume of one particle with respect to the initial bulk volume is 1, $1.250 \cdot 10^{-1}$ and $3.558 \cdot 10^{-5}$ for M1, M2 and M3, respectively.

Table 1. Grain size distribution of the gravel used for material M3 according to the sieve tests.

Sieve size (mm)	14.00	13.00	12.50	12.00	10.00	8.00	6.35
Material passed in weight (%)	100.00	65.03	43.92	22.82	18.6	8.11	4.76
Sieve size (mm)	5.00	4.00	3.20	2.50	2.00	1.00	0.50
Material passed in weight (%)	3.18	2.23	1.90	1.56	1.41	1.11	0.00



Figure 3. Materials used in the experimental campaign.

2.3 Physical model

2.3.1 Governing parameters

Figure 4 shows the slide parameters relevant for wave generation and its characteristics according to Heller & Hager (2011), being V_s the *slide impact velocity*, V_s the *bulk volume*, m_s the *slide mass*, ρ_s the *bulk slide density* and s the *slide thickness*. The water body topography is defined in this case by the *still water depth* (h) and the *sliding angle* (α). The wave characteristics are described by the *wave amplitudes* (a), the *wave height* (H), the *wave length* (L) and the *wave period* (T) dependent on the *stream wise distance* (x), *stream wise angle* (β) and *time* (t). In a three dimensional model, the *stream wise angle* is the angle between the horizontal component of the landslide velocity vector, and the position vector. The origin of the system is located at the center impact point of the landslide with the water.

By dimensional analysis the previous governing parameters results in dimensionless governing variables (Heller 2007). Accounting for the gravitational acceleration (g), the water density (ρ_w) and h as *fundamental scalings*, these parameters are: a) the *slide Froude number* varying in the range $0.74 < Fr < 2.78$; b) the *relative slide thickness* ($0.02 < S < 0.5$; for M3 thickness in the impact with the water surface was assumed equal to D_{50}); c) the *relative stream wise distance* ($2.71 < X < 11.83$); d) the *sliding angle* α ($35^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$); and e) the *relative time* ($5.20 < T < 26.42$ for the first crest). The dimensionless governing parameters are expressed as follows:

$$Fr = \frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h}} \quad [3]$$

$$S = \frac{s}{h} \quad [4]$$

$$X = \frac{x}{h} \quad [5]$$

$$T = t \cdot \sqrt{\frac{g}{h}} \quad [6]$$

2.3.2 Test procedure

The slide and topographic parameters controlled directly during the test campaign were the material with different degrees of fragmentation and properties, the sliding angle and the still water depths. Velocities of the sliding mass were measured, but were not controlled during the tests, and are dependent on α and h .

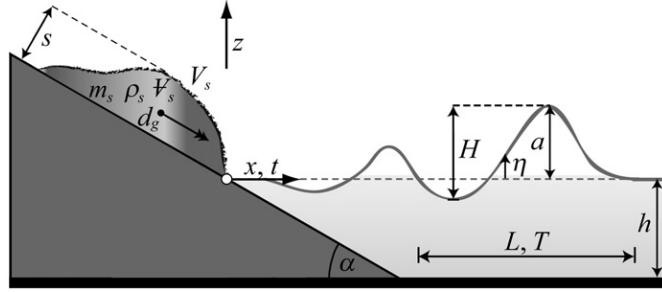


Figure 4. Sketch of the governing parameters and wave features in (x,z) plane (Heller & Hager 2011).

Each material defined previously and showed in Figure 3 was tested for three values of α (35° , 40° and 45°) and for each angle were tested four values of h (30 cm, 40 cm, 50 cm and 60 cm). In total, thirty six tests were performed. The minimum still water depth accounted for the scale effects experimentally analyzed by Heller that observed prediction of wave characteristics may be distorted for shallow waters bellow 15 cm deep (Heller 2008). Measured slide impact velocities varied between $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

The procedure of each test consisted in placing the different materials behind the gate (if M3, material was collected inside the storage box), centered on the ramp longitudinal axis. Next, all probes were calibrated for the correspondent h . Then, the gate was opened and the mass sliding began. Depending on its degree of fragmentation, the material suffered a certain dispersion along the ramp before the impact on the water surface. The dispersion was higher for grater degrees of fragmentation. Obviously, material M1 suffered no dispersion (Figure 5).



Figure 5. Dispersion along the sliding depending on the material type for $\alpha = 40^\circ$. M1 (left), M2 (center) and M3 (right).

2.3.3 Registered measurements

To obtain the sliding velocity, a photographic camera Panasonic DMC-TZ40BG was used, that can record high velocity videos with 200 fps (VGA), and a digital chronometer with seven digits that allows measuring time steps of $1/100$ of a second. The camera was placed in the vicinity of points B and C and the chronometer between points F and G (Figure 1, right). A metric scale with 5 cm spaced marks was drawn on the sliding ramp. Marks were perpendicular to the longitudinal axis of the ramp. The post-processing of the video recording, with the help of the chronometer and the metric scale, enabled to graphic the displacement of the sliding mass versus time. Velocity of the tested sliding mass was obtained from that plot as the slope of the curve.

Rotation of the block, or blocks, composing materials M1 and M2 around the axis normal to the ramp was permitted, so obtaining the velocity for the blocks based only on one control point could be a major simplification. Thus, for material M1, displacements were measured in three vertex instead of only one in order to compare the obtained velocities. Figure 6 (left) shows variation of the relative position against time of three different vertices of the block measured in

a single test ($\alpha=45^\circ$ and $h=0.30$ m). As can be observed in that figure, rotation of the block has little influence on displacement evolution along the sliding process.

For material M2 the effect of rotation of every block was neglected based on the analysis done for material M1. Instead, displacements evolution were investigated for three of the eight blocks for the same test conditions ($\alpha=45^\circ$ and $h=0.30$ m) (Figure 6, right). The displacement evolution up to approximately 75 cm is roughly similar for all three analyzed blocks. Nevertheless, for higher sliding lengths, one of the blocks traveled faster than the other two. For the same cumulative time (0.77 s) the fastest block traveled around 0.2 m more and velocities at that point differ about 16%.

Based on the previous paragraphs analysis, the control point for the measurement of the displacement along the sliding process was one of the vertex for material M1, and one vertex of one of the eight blocks for material M2. For material M3, velocity was obtained for two particles of the sliding mass and the average of those two values was used as the characteristic velocity of the sliding mass.

The water oscillation profile (η) was registered using eight wave probes partially submerged placed in different points of the testing pool (Figure 7, left; Table 2) that measure electrical current between their two stainless steel rods (Figure 7, center). The probes are connected to the *Wave gauge system* of HR Wallingford™ (Figure 7, right). They were placed over the pool on aluminum rails forming *stream wise angles* of 0° , 15° , 30° , 45° with the longitudinal direction of the pool, and defining concentric radii spaced 50 cm. These radii are identified as R1 (1 m from the center of the ramp base) to R6 (3 m from the center of the ramp base). The rails were named as G1 to G4 (Figure 7, left). It is important to emphasize that the base of the ramp do not coincide with the lower extremity of the ramp.

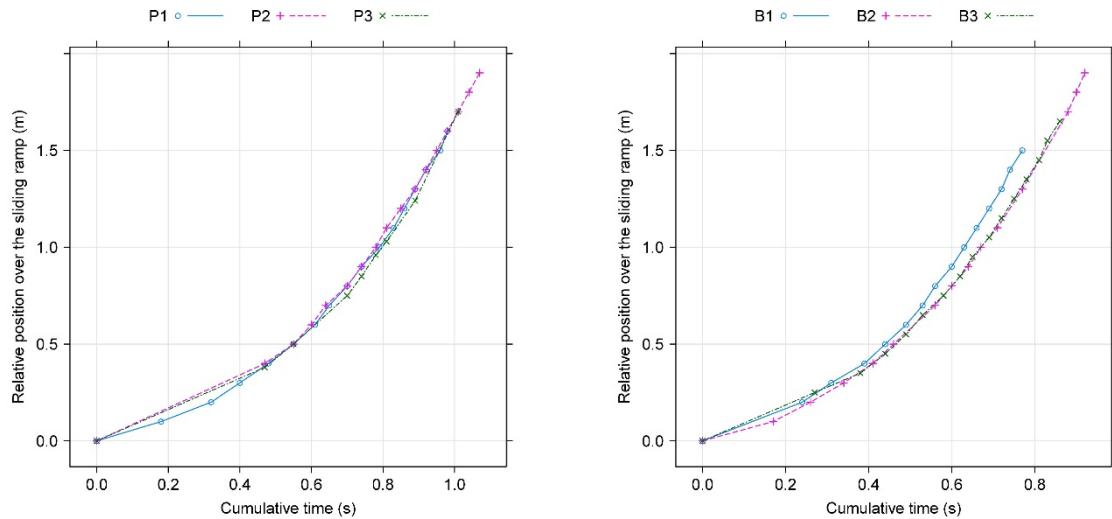


Figure 6. Evolution of the relative position of the blocks on the ramp against cumulative time, during the test $\alpha=45^\circ$ and $h=0.30$ m. Evolution in three different control points of the block for material M1 (left). Evolution in one control point for every one of three different blocks of material M2 (right).

3 Experimental results

3.1 Wave types

The *wave lengths* were estimated considering two wave celerities depending on the distance to the impact zone and assuming that radial variation of velocities are negligible. Therefore, using

the first crest registered in the three probes placed on the guide G1, these two mean celerities were determined and applied to the other probes as follows: probes from radii R2 to R3 were assumed to have the same mean celerity measured between G1R2 and G1R4, and probes from radii R4 to R6 were assumed to have the same mean celerity measured between G1R4 and G1R6. The *maximum wave height* (H_{\max}) was defined as the sum of the first trough and the maximum value of the first two crests. The impulse waves may change their type even along a short wave channel reach (Heller & Hager 2011) so profiles were investigated in every probe.

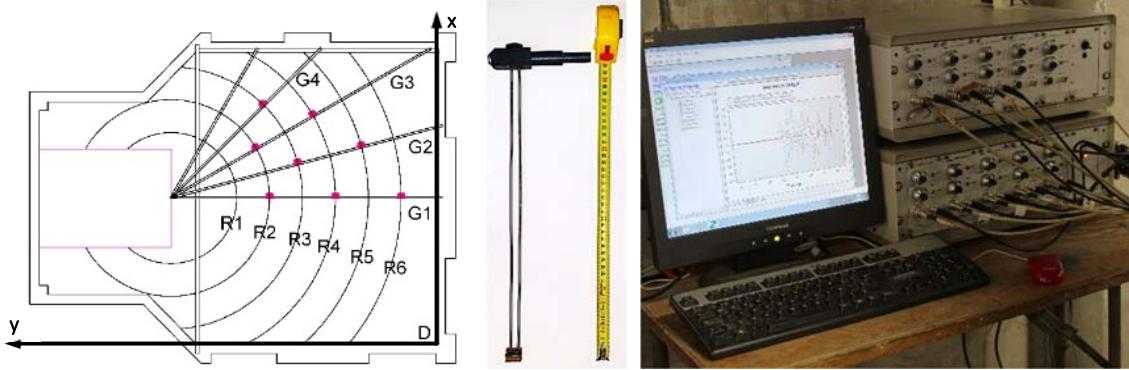


Figure 7. Position of the eight wave probes over the testing pool (left). View of the *Wave gauge system* of HR Wallingford™ used to record the water surface oscillation (center) and of one of the eight wave probes used during the test campaign (right).

Table 2. Orthogonal coordinates of the probes position given with respect to point D (Figure 7, left).

Probe	xx coord. (m)	yy coord. (m)
G1R2	2,263	2,576
G1R4	2,263	1,576
G1R6	2,263	0,576
G2R3	2,766	2,152
G2R5	2,895	1,669
G3R2	2,982	2,789
G3R4	3,482	1,923
G4R3	3,630	2,674

Linear oscillatory waves defined by $H/h < 0.03$ and $H/L < 0.006$ (Heller 2007), resulting the Ursell number $U = (H/L)/(h/L)^3 = HL^2/h^3 \rightarrow 0$ (Fritz 2002), were observed in six occasions in probes G1R5 and G1R6. Figure 8 (right) shows one of these cases registered in probe G1R6. In other three observations the condition $H/h < 0.03$ is satisfied but $H/L < 0.006$ is not. Figure 8 (left and center) shows two of these three cases, both registered also in probe G1R6. In these cases H/L varies between $0.0061 < H/L < 0.0087$ and U between $0.292 < U < 0.806$. The conditions of linearity were accomplished far from the impact zone, and all observations of this type were along the longitudinal axis of the pool (G1). Six of these observations were obtained for material M3, two for M1 and one for M2. The linear wave profile is characterized by a sinusoidal curve where H should be twice the wave amplitude (Heller 2007). The maximum crest and trough amplitudes observed in the range of linear waves had mean values of 0.0081 m and 0.0054 m, respectively, while the wave height had a mean value of 0.0135 m. Water particles should describe closed orbits of circular or elliptical shape and should be pure oscillatory waves with no fluid mass transport.

The majority of observations (about 97%) were therefore nonlinear waves with ranges: $0.031 < H/h < 0.459$, $0.0067 < H/L < 0.1085$ and $0.388 < U < 38.135$. For $U > 25$ the cnoidal theory is

applicable whereas the Stokes theory applies for $U < 10$ (Heller 2007). Both theories are equally valid for $10 \leq U \leq 25$ according to Sorensen (1993).

Values of $U > 25$, valid in the range $L/H \geq 10$ (Keulegan 1950), were observed in four occasions, all of them in the same test: material M2 for $h=0.3$ m and $\alpha=35^\circ$, and far from the impact zone, on radii R4, R5 and R6, and guides G1, G2 and G3. In all these cases L/h was fulfilled and varied between 11.9 and 15.8.

A major part of the nonlinear waves fall in the range $U < 10$, with approximately 86% of the observations. Stokes waves are steeper than sinusoidal waves, the water particles should describe open orbits and are oscillatory with a transient character and, therefore, a small fluid transport (Heller 2007). The range for Stokes waves if defined as $2 \leq L/h \leq 20$ (Le Méhauté 1976) or as $L/h \leq 10$ (Keulegan 1950) falling the test observations in the range $3.1 \leq L/h \leq 8.8$. The nonlinear wave profiles showed in Figure 8 fall in the range of the Stokes theory. About 9% of the observations fall in $10 \leq U \leq 25$ varying L/h between $4.8 \leq L/h \leq 9.4$.

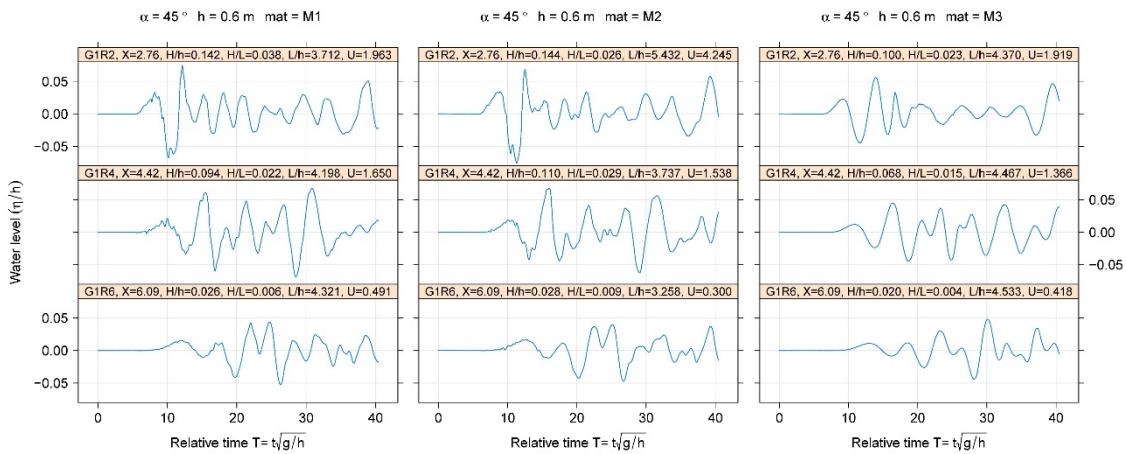


Figure 8. Relative water level (η/h) oscillation registered in probes G1R2, G1R4 and G1R6 for the same test ($\alpha=45^\circ$ and $h=60$) varying the sliding material (M1 left, M2 center and M3 right).

3.2 Wave amplitudes and maximum wave height

The wave amplitudes registered for each material are here compared. The first wave crest amplitude (a_{c1}) and trough (a_t) as well as the second wave crest amplitude (a_{c2}) of all tests were considered. It was observed that these amplitudes were not affected by reflection for any probe. This effect of reflection could be observed at different moments depending on the distance of the probes to the walls of the pool. Furthermore, according to the leading wave reached in most cases the highest level but, in some cases, for the weakly nonlinear and the nonlinear transition region, the second wave crest exceeded the leading wave crest level, in agreement with Fritz et al. (2004). Amplitudes were analyzed with respect to different parameters such as the stream wise distance and angle, the sliding distance and the slide velocity in the impact.

3.2.1 Parametric analysis

The influence of the different governing parameters controlled during the test campaign on the relevant wave amplitudes and maximum wave height are here analyzed. First and second wave amplitudes, and first wave trough were plotted against: a) the stream wise distance (Figure 9); b) the stream wise angle (Figure 10); and c) the relative sliding distance (Figure 11). The lines drawn over the scatter plots represent the best fit curves for each material. In general, there are small differences between M1 and M2 regression curves, mostly for parameters x , β and D . As can be

seen, the scatterplots for these two materials are very similar resulting in quasi-coincident regression curves. Differences for material M3 are more significant. However, the regression curves for this material follow the same patterns as for the other two.

Starting with the relationship with the stream wise distance (Figure 9), data fits better to a cubic regression curve for a_{c1} and a_{c2} and to a quadratic regression curve for a_t . The cubic regressions are obtained varying x linearly while the quadratic regression adjusts better varying the natural logarithm of a_t with the natural logarithm of x . For a_{c2} and materials M1 and M2, the cubic regressions could be adjusted to the quadratic form without significant changes in the coefficient of determination (R^2), 0.34 and 0.28, respectively, while for M3 the quadratic form would imply a drop of 10% in this coefficient. The best fittings were obtained for a_t where $0.74 < R^2 < 0.78$ and the worst for a_{c2} where $0.25 < R^2 < 0.34$. For all three amplitudes the tendency is negative, i.e., for higher values of x , lower are the wave amplitudes, as expected due to the progressive attenuation of the wave. The difference of amplitudes for different materials is lower for longer distances from the impact zone.

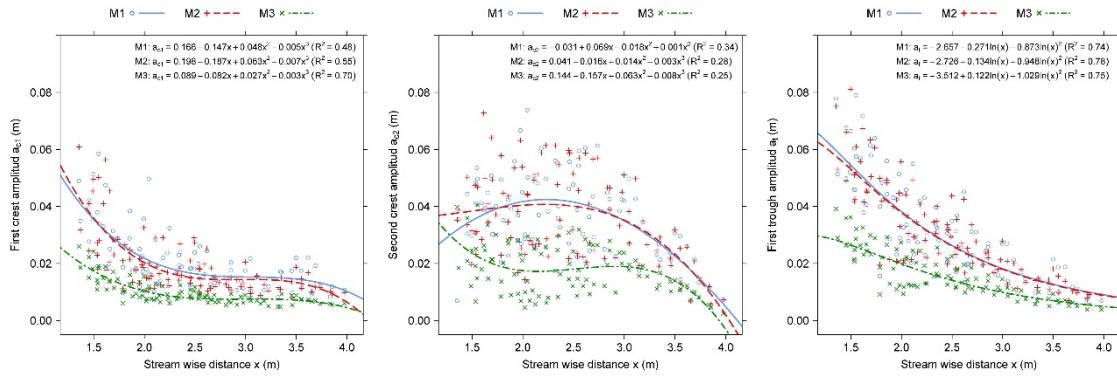


Figure 9. Relationship of the analyzed relative wave amplitudes with the stream wise distance (x). The first wave trough amplitudes are given in absolute values.

Turning to the relationship with the stream wise angle (Figure 10), variation of the amplitudes are not that clear and the R^2 obtained are very low. Polynomials with higher degrees give coefficients of determination in the same order of magnitude to those plotted in Figure 10. This parameter has little effect on a_{c1} and a_t where the slopes of the linear regressions are nearly zero. Nevertheless, variation of these amplitudes is positive with $\cos(\beta \cdot \pi / 180)$, where β is given in degrees. This means that some amplitude attenuation is observed for higher values of β . The relationship is stronger for a_{c2} especially for M2 and M3 where the slopes are roughly about 10%.

Looking now to the sliding parameters, with respect to the relative sliding distance (Figure 11), data fits better to a linear regression. Variation of a_{c1} with this parameter adjusts better to a log-log plot with R^2 varying between 0.57 and 0.64. In this case, a linear regression varying both variables linearly would imply a drop of 6%, 15% and 11% in this coefficient for M1, M2 and M3, respectively. On the other hand, for a_{c2} and a_t and for all three materials the previous relationship (log-log) do not change significantly R^2 when comparing to a linear variation of the variables. Tendency of the models are positive what results in higher wave amplitudes for higher sliding distances. The best fittings were obtained for a_{c1} and the worst for a_{c2} where $0.25 < R^2 < 0.33$.

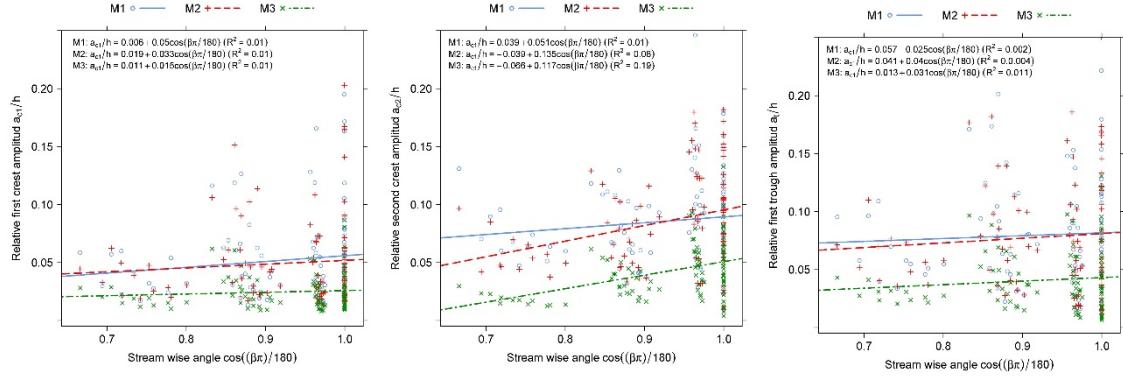


Figure 10. Relationship of the analyzed relative wave amplitudes with the stream wise angle β (degrees). The first wave trough amplitudes are given in absolute values.

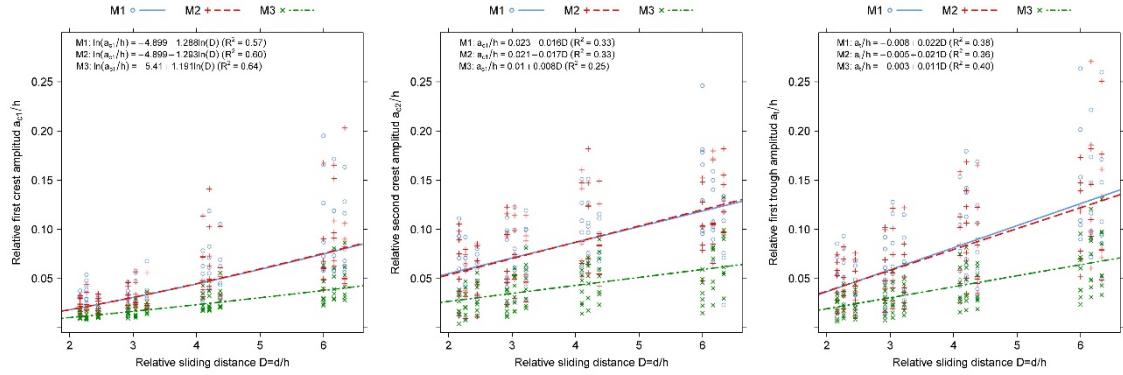


Figure 11. Relationship of the analyzed relative wave amplitudes with the relative sliding distance ($D=d/h$). The first wave trough amplitudes are given in absolute values.

The Froude number resulted in different ranges of application depending on the material setup. M1 was tendentially the slowest sliding material while the fastest was M3 (Figure 12). Data fits better to a cubic regression for a_{c1} and to the quadratic form for a_{c2} and a_t . Variation of a_{c1} adjusts to a log-log plot with $0.40 < R^2 < 0.57$. For M1 the cubic regression could be set to the quadratic form without any loss of precision. For M2 and M3 that would imply a drop of 2% and 3% in R^2 . On the other hand, for a_{c2} and a_t (for all three materials) a log-log relation would result in lower values of R^2 when comparing to a linear variation of the variables, being the biggest and smaller drop of this coefficient observed for a_{c2} and M1 (10%) and for a_t and M2 (1%), respectively. The best fittings were obtained for a_{c1} and the worst for a_{c2} where $0.23 < R^2 < 0.38$. For all amplitudes, tendency is positive what means that for higher values of Fr and, thus, higher impact velocities, the bigger are the wave amplitudes, as expected.

Variation of the maximum wave height (H_{\max}) with the geometric or topographic parameters of the reservoir are shown in Figure 13, and with the slide parameters in Figure 14. In general, the behavior and tendencies observed when comparing the wave amplitudes with the different parameters were also observed for the maximum wave height.

Starting with the stream wise distance, data fits to a third degree polynomial varying both variables linearly. The best fit is obtained for M1 ($R^2=0.59$) while the worst is for M3 ($R^2=0.49$). For higher values of x , the wave maximum heights are lower, and differences between materials reduces for higher distances to the impact zone, as expected. Turning to the stream wise angle, the R^2 obtained were very low but, nevertheless, a small positive tendency with the $\cos(\beta \cdot \pi / 180)$

was observed for all materials, i.e., for wider angles a small decrease (about 10%) in the maximum wave height was observed.

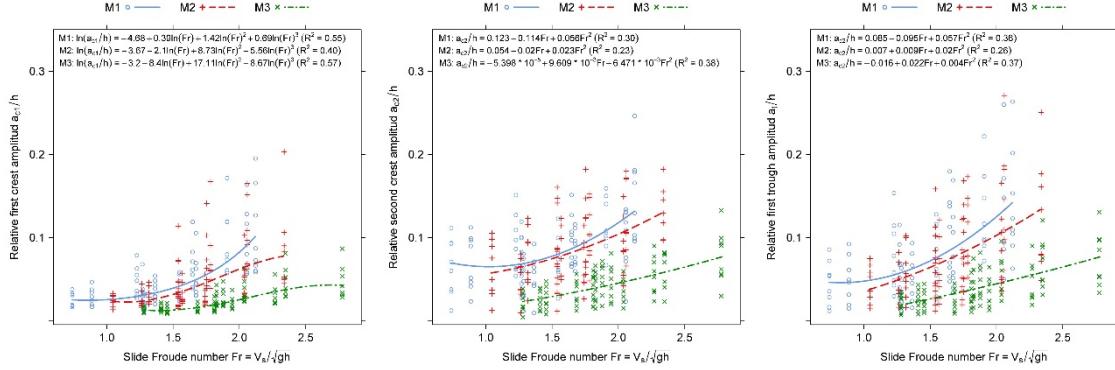


Figure 12. Relationship of the analyzed relative wave amplitudes with the sliding Froude number ($Fr = V_s / (g \cdot h)^{0.5}$). The first wave trough amplitudes are given in absolute values.

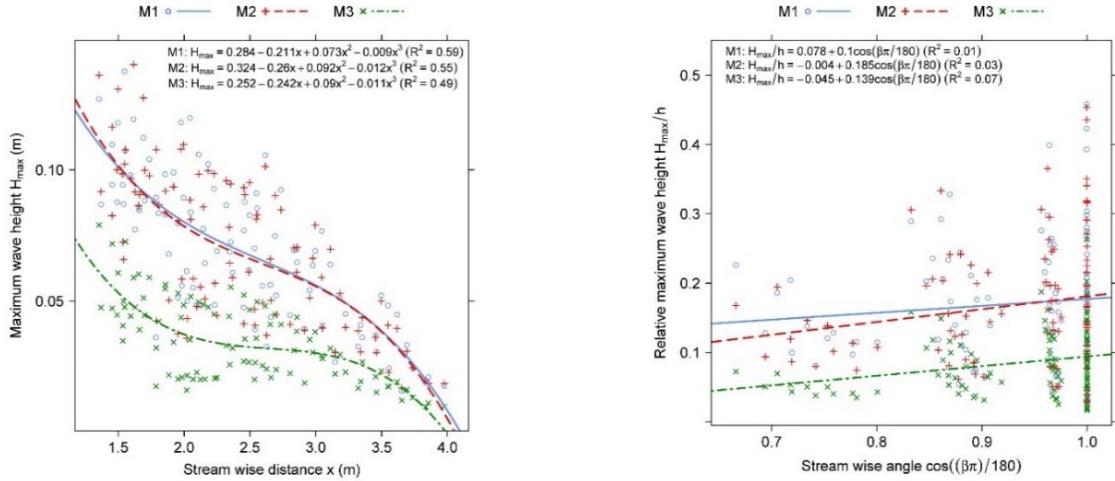


Figure 13. Relationship of the maximum wave height with x (left) and β (right) where the last is given degrees.

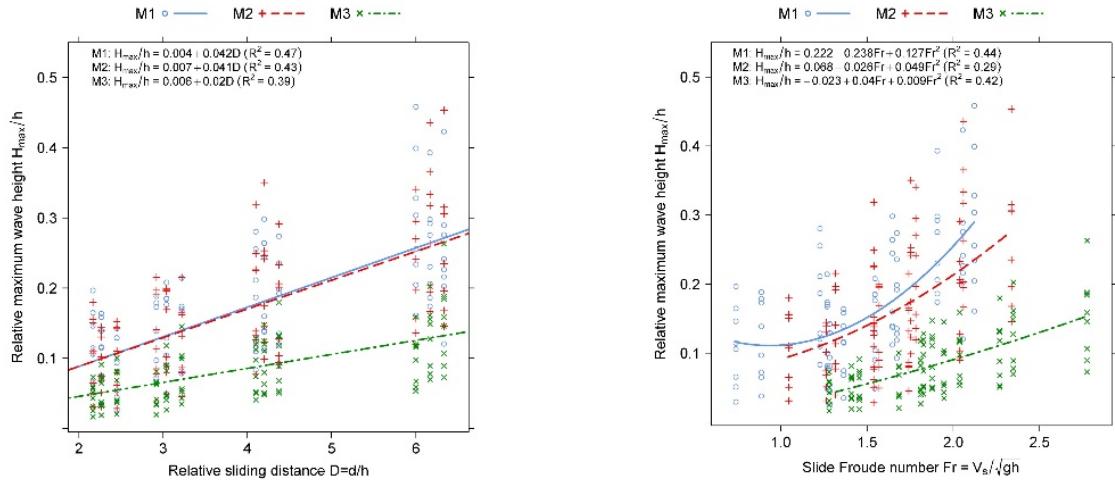


Figure 14. Relationship of the maximum wave height with D (left) and Fr (right).

With respect to the relative sliding distance, data fits to a positive linear regression. The best fit is obtained for M1 ($R^2=0.47$) while the worst is for M3 ($R^2=0.39$). The tendency is positive what

means that for longer sliding distances, the wave relative maximum height are greater. As to the relationship with the slide Froude number, data are better adjusted to a second degree polynomial. The best fit is observed for material M1 ($R^2=0.44$) and the worst for M2 ($R^2=0.29$). In this case, models for M2 and M3 could be adjusted to a linear regression without any change of the coefficient of determination. On the other hand, for M1 a similar change would imply a drop of about 7% of the same coefficient. Tendency is also positive, so the higher Fr values the higher the relative maximum wave heights.

Linear correlation factors between the governing parameters are shown in Table 3. The higher correlation was obtained between D and Fr (0.78) and the lower between α and β (0.05). Other important correlation factors were observed between D and X (0.59) and between X and Fr (0.41). These high values of correlation were obtained because during the test campaign these parameters were not totally independent. For example, increasing the still water depth, increased the stream water distance and decreased de sliding distance and the sliding velocity. This occurred because both the wave probes and the gate were in fixed positions.

Table 3. Correlation factors between variables.

Variables	α	β	X	Fr	D
α	1	0.053	-0.091	0.430	0.083
β		1	-0.241	0.072	0.070
X			1	0.412	0.588
Fr				1	0.781
D	Sym				1

3.2.2 Wave amplitudes and maximum wave height assessment

A direct analysis of the wave amplitudes of each test, i.e., the amplitudes measured for each material and for the same sliding angle and still water depth, allowed to observe that all three wave amplitudes analyzed and registered for M1 and M2 were fairly similar, once a linear regression fitted to the correspondent scatterplot approaches to a 45° straight line (Figure 15, left). These two materials tendentially gave similar results. Nevertheless, some observations gave higher amplitudes experimenting with material M1 then M2 and, in other occasions, M2 resulted in higher amplitudes than M1 as can be seen in Figure 15 (left).

Comparing materials M1 versus M3 (Figure 15, center) and M2 versus M3 (Figure 15, right), the majority of amplitudes were higher for M1 and M2 than for M3. Amplitudes obtained for M1 and M2 were around 60% and 80% higher, respectively, than those obtained for M3. However, an outlier (identified with a circle in the center image of Figure 15) was registered for M1 versus M3 where the last gave a significant higher amplitude than M1 (0.133>0.023 in relative amplitudes). This result was observed in the test $\alpha=45^\circ$ and $h=30$ cm (probe G1R2). In this case results may be affected by the splash produced by the impact of M1.

Figure 16 (left) shows the relative second wave crest against the maximum of the first two crests. It is clear from that figure that the height of the second crest exceeded most of the times that of the leading crest (about 88% of the observations). Relationship between first and second crest amplitudes is plotted in Figure 16 (center). A quadratic regression in a log-log plot with $R^2=0.60$ was established, with the following expression:

$$\frac{a_{c2}}{h} = 0.031 \cdot \left(\frac{a_{c1}}{h} \right)^{-1.869} \quad [7]$$

Relationship between the maximum height and the maximum crest amplitude was also assessed and is showed in Figure 16 (right). Data fits with a coefficient of determination $R^2=0.94$ to a linear regression in a log-log plot, expressed in simplified form as follows:

$$\frac{H_{\max}}{h} = 1.842 \cdot \left(\frac{a_{c\max}}{h} \right)^{0.996} \quad [8]$$

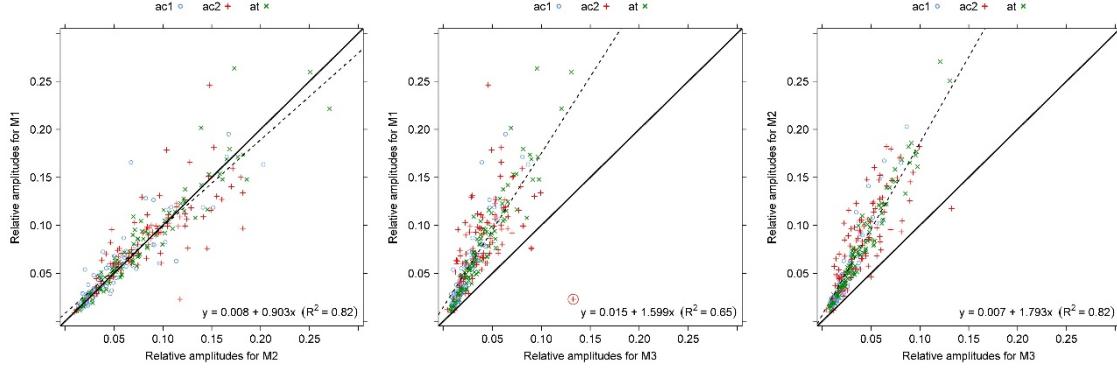


Figure 15. Comparison between relative wave amplitudes for material M1 and M2 (left), M1 and M3 (center) and M2 and M3 (right). The wave amplitudes are identified in the graphs in different series, ac1 (o), ac2 (+) and at (x).

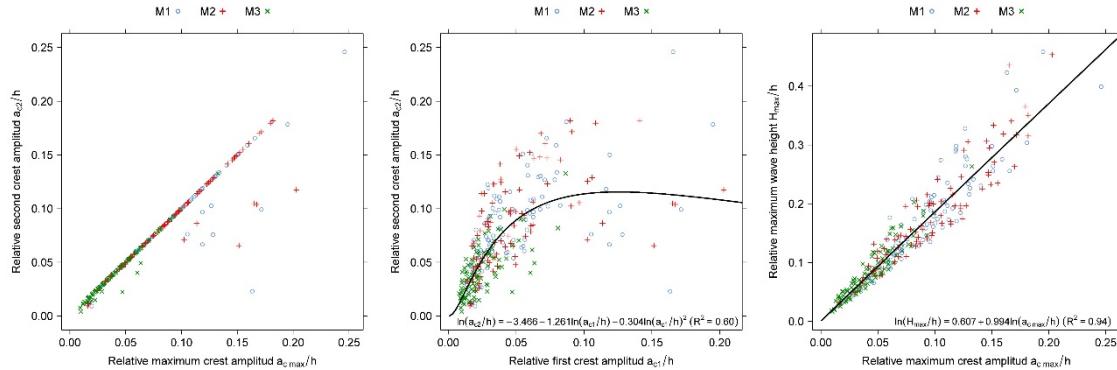


Figure 16. Assessment of the maximum wave crest amplitude and maximum wave height. Materials are identified in the graphs in different series, M1 (o), M2 (+) and M3 (x). Material M3 falls in the lower range of all spectrum covered by materials M1 and M2. Differences between materials M1 and M2 are not appreciated in this graphs.

The maximum wave height prediction model was defined using the geometric parameters X and β and the relative sliding distance D . In order to compare between materials, three predictive models were developed, expressed as follows:

$$\left(\frac{H_{\max}}{h} \right)_{M1} = -0.284 - 0.034 \cdot \left(\frac{x}{h} \right) + 0.390 \cdot \cos \left(\frac{\beta\pi}{180} \right) + 0.073 \cdot \left(\frac{d}{h} \right) \quad [9]$$

$$\left(\frac{H_{\max}}{h} \right)_{M2} = -0.369 - 0.036 \cdot \left(\frac{x}{h} \right) + 0.487 \cdot \cos \left(\frac{\beta\pi}{180} \right) + 0.074 \cdot \left(\frac{d}{h} \right) \quad [10]$$

$$\left(\frac{H_{\max}}{h} \right)_{M3} = -0.229 - 0.019 \cdot \left(\frac{x}{h} \right) + 0.294 \cdot \cos \left(\frac{\beta\pi}{180} \right) + 0.037 \cdot \left(\frac{d}{h} \right) \quad [11]$$

Coefficients of determination are respectively 0.85, 0.87 and 0.89. The p-values testing the null hypothesis that the variables are not relevant (two-sided analysis) gave very low results, all below $6.55 \cdot 10^{-10}$, meaning therefore that all variables are relevant. The confidence intervals for each variable coefficients are showed in Table 4. Comparing all materials using the maximum values of the stream wise distance and angle and the sliding distance, M1 gives about 3% higher waves than M2 and 55% than M3.

Introducing a numerical variable expressing the material setup used in the test campaign, in this case the specific surface given in $m^2 \cdot kg^{-1}$, [9], [10] and [11] can be condensed in the following expression:

$$\left(\frac{H_{\max}}{h}\right) = 0.279 \cdot \frac{\cos\left(\frac{\beta\pi}{180}\right)^{2.020} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1.635}}{(ss \cdot \rho_w \cdot h)^{0.243} \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{1.323}} \quad [12]$$

The coefficient of determination obtained is $R^2=0.84$ and all variables of the new model are relevant with p-values under $2 \cdot 10^{-16}$. The specific surface area has a little effect on the relative maximum wave height and negative tendency what means that for higher degrees of fragmentation the wave heights are lower. This tendency still remains if the relative distance is exchanged by the Froude number, but its effect on the relative maximum wave height increases. Except for the intercept coefficient that increases its influence on this new predictive model, the rest of variables decrease its influence. This new relation lows R^2 in 18% yielding the linear regression to $R^2=0.66$ and is expressed as follows:

$$\left(\frac{H_{\max}}{h}\right) = 0.679 \cdot \frac{\cos\left(\frac{\beta\pi}{180}\right)^{1.582} \cdot \left(\frac{v_s}{gh}\right)^{1.591}}{(ss \cdot \rho_w \cdot h)^{0.387} \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{0.840}} \quad [13]$$

The maximum wave crest can be estimated using Eq.2 and Eq.6, resulting the following expression:

$$\left(\frac{a_{c\max}}{h}\right) = 0.151 \cdot \left(\frac{\cos\left(\frac{\beta\pi}{180}\right)^{2.020} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1.635}}{(ss \cdot \rho_w \cdot h)^{0.243} \cdot \left(\frac{x}{h}\right)^{1.323}} \right)^{1/0.996} \quad [14]$$

The maximum wave height was studied in the triangle ac1, at and ac2. Nevertheless, the leading trough was not always observed to be deeper than the second wave trough. In fact, the second trough exceeded the first 36% of the times (104 from 288 observations) and from those cases, about 88% were observed between radii R4 and R6. M1, M2 and M3 represent about 36.5%, 36.5% and 26.9% of the observations, respectively. Figure 17 (left) shows the relationship between the maximum wave height defined in chapter 3.1 and the new maximum height defined as follows:

$$H_{\text{new max}} = \max\{[\max(a_{c1}, a_{c2}) + a_t]; [a_{c2} + a_{t2}]\} \quad [15]$$

where a_{t2} is the second wave trough amplitude. The solid line represents the observations where $H_{\text{new max}}$ equals H_{\max} and is where 64% of the data fall. The dashed line represents the quadratic fit between these variables with a $R^2=0.96$. This figure shows that for higher maximum wave heights, observed to occur near the impact zone (Figure 13, left), the new heights are lower. On the other hand, for lower maximum wave heights, observed to occur far from the impact zone, the new heights take higher values. Eq.12 would not yield better coefficient of determination if the new maximum wave height were used to set the linear multiple regression model. Nevertheless, its coefficients would change as expected. Except for the relative stream wise distance variable, all new coefficients fall inside the confidence intervals detailed in Table 4. The new coefficients would be $e^{-1.319}$ for the intercept coefficient and -0.249, -0.887, 2.066 and 1.191 for the relative specific surface, the relative stream wise distance, the stream wise angle and the relative sliding distance, respectively.

Table 4. Confidence intervals for the coefficients of the predictive models gave by equations [3], [4], [5] and [6].

Variable	Intercept		x/h		cos($\beta\pi/180$)		d/h		ss· p_w ·h	
Eq.	2.5%	97.5%	2.5%	97.5%	2.5%	97.5%	2.5%	97.5%	2.5%	97.5%
9	-0.366	-0.202	-0.039	-0.030	0.304	0.477	0.067	0.079	-	-
10	-0.448	-0.290	-0.041	-0.032	0.404	0.571	0.067	0.080	-	-
11	-0.265	-0.192	-0.021	-0.017	0.256	0.333	0.035	0.040	-	-
12	$e^{-1.465}$	$e^{-1.090}$	-1.441	-1.205	1.690	2.351	1.523	1.745	-0.267	-0.219

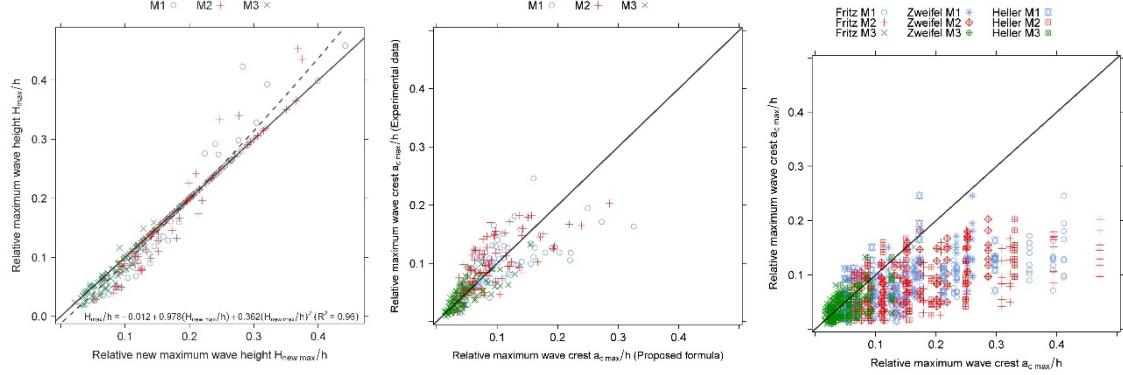


Figure 17. Relationship between the maximum wave height defined in chapter 3.1 and the new maximum height (left). Experimental maximum wave crest versus the model proposed in this work (center). Experimental maximum wave crest versus the models proposed by Fritz et al. (2004), Zweifel et al. (2006) and Heller and Hager (2010) (right), where the blue, red and green data stands for M1, M2 and M3, respectively.

4 Discussion

The center picture of Figure 17 contrasts the experimental results with predictive model proposed in this work and the right picture contrasts the maximum wave crest obtained experimentally with formulations proposed by Fritz et al. (2004), Zweifel et al. (2006) and Heller and Hager (2010) to estimate the same wave feature. The models proposed by the previous authors were set for granular landslides and input the dimensionless slide thickness in the impact. During the test campaign this variable was not controlled for M3 but, by visual observation (Figure 5, right) was assumed to be roughly equal to the gravel D_{50} .

In general, the Fritz, Zweifel and Heller predictive models fits better for M3 than for the other two types of materials, overestimating the relative maximum wave amplitude for M1 and M2. Forcing to pass a linear regression through the origin for each type of material, data obtained with the Fritz model resulted in slopes of 0.392, 0.354 and 1.037 for M1, M2 and M3, respectively. The Zweifel model gave better results than the Fritz model, especially for M1 and M2, and slightly worst for M3. A linear regression for each material passing through the origin gave slopes of 0.585, 0.537 and 0.899 for M1, M2 and M3, respectively. Comparing the Heller and Hager with the previous two, this fits better than the Fritz model for M1 and M2 and worst for M3. A linear regression passing through the origin and each material type gave slopes of 0.532, 0.459 and 0.656 for M1, M2 and M3, respectively. With respect to the Zweifel model this gives worst results for all materials.

A possible source for the observed errors given by these models with respect to the experimental data managed in this work may be in the fact that these were generated based on two-dimensional physical models. On the other hand, used granular type material in their creation and the worst results refers to the maximum wave crest generated by sliding blocks (M1 and M2), not comparable to gravel. It should be referred that if higher dimensionless slide thickness would

have been assumed for material M3 that would tendentiously overestimate the results given by the three formulations.

The formulation proposed in this work fits better than the previous three for all material types, since it was adjusted with the experimental data. Forcing to pass a linear regression through the origin, the slopes obtained for M1, M2 and M3 would be, respectively, 0.839, 0.972 and 0.883 with R^2 of 0.87, 0.89 and 0.89. This formulation is in principal applicable to wave in the nonlinear range, especially to Stokes waves, since this profile was the mostly common observed. Application to solitary and bore like waves should not give good results because for these profiles the maximum wave height coincide with the maximum wave amplitude what was not observed during this experimental campaign (Figure 16, right).

5 Conclusions

The main conclusions of this work are:

- The degree of fragmentation affects the shape of the landslide and, as expected, the level of interference of the sliding with the surface of the water during the impact. Lower degrees of fragmentation have grater interferes with the water surface and a more abrupt impact. During the experimental campaign, the impact of material M3 resulted much more smoother than materials M1 and M2.
- Higher degrees of fragmentation tends to generate smaller impulse waves and, therefore, smaller wave amplitudes and heights. During the experimental campaign, results obtained with materials M1 and M2 were fairly similar and this effect was not that clear. Nevertheless, comparing these two materials by means of Eqs. 9 and 10 and using the maximum values of the stream wise distance and angle and the sliding distance, the relative maximum wave height results slightly higher for material M1 than for M2 (about 3% higher). Comparing materials M1 and M3, the first material results in higher wave heights than M3, about 55% higher.
- The second wave crest exceeded the leading crest in height and coincided with the maximum wave crest in 88% of the observations.
- A predictive model is proposed in this work to estimate the *relative maximum wave height* as a function of the *relative stream wise distance*, the *stream wise angle*, the *sliding distance* and a numerical variable characterizing the degree of fragmentation of the sliding mass, the *relative specific surface*. The achieved formula indicates that for higher values of D the wave height tends to grow while for higher values of X and β the wave heights tends to decrease. With respect to ss , higher values means higher degree of fragmentation and results in smaller impulse waves according to the predictive model. This multiple regression model yields with a coefficient of determination $R^2=0.84$.
- Comparing the test results with those obtained with the proposed formulation and forcing to pass a linear regression through the origin, the slopes obtained for materials M1, M2 and M3 were respectively 0.839, 0.972 and 0.883 with coefficients of determination of 0.87, 0.89 and 0.89.
- The majority of the observed waves are in the range of the nonlinear profiles defined by $H/h \geq 0.03$ and $H/L \geq 0.006$. From the nonlinear waves, 86% of the observations fall in the range $U < 10$ explained by the Stokes theory and approximately 9% in the range $10 \leq U \leq 25$ explained by both cnoidal and Stokes wave profile theories. Therefore, validity of the predictive model is bounded to these profiles.

Acknowledgments

This research was supported by the project XLIDE (IPT-2011-1287-370000) included in the subprogram INNPACTO of the R&D National Program financed by the Ministry of Economy and Competitiveness (MINECO).

References

- Ataie-Ashtiani, B. & Najafi-Jilani, A., 2008. Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide. *Coastal Engineering*, 55(12), pp.989–1004.
- Ataie-Ashtiani, B. & Nik-Khah, A., 2008. Impulsive waves caused by subaerial landslides. *Environmental Fluid Mechanics*, 8(3), pp.263–280.
- Bregoli, F. et al., 2013. Experimental studies on 3d impulse waves generated by rapid landslides and debris flows. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 6, pp.115–122.
- Carvalho, R.F. & Carmo, J.S.A., 2007. Landslides into reservoirs and their impacts on banks. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(6), pp.481–493.
- Enet, F. & Grilli, S.T., 2007. Experimental Study of Tsunami Generation by Three-Dimensional Rigid Underwater Landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 133(6), pp.442–454.
- Fritz, H.M., 2002. *Initial phase of landslide generated impulse waves*. Swiss Federal Institute of Technology Zürich.
- Fritz, H.M., Hager, W.H. & Minor, H.-E., 2004. Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of Waterway, Port, Costal and Ocean Engineering*, 130(6), pp.287–302.
- Garrote, L. & Laguna, F., 2007. Generación de olas por deslizamiento. In *Jornadas Técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses*. Zaragoza.
- Heller, V., 2008. Landslide generated impulse waves - Experimental results. In *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*. Hamburg, Germany: World Scientific, pp. 1313–1325.
- Heller, V., 2007. *Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich.
- Heller, V. & Hager, W.H., 2010. Impulse Product Parameter in Landslide Generated Impulse Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(3), pp.145–155.
- Heller, V. & Hager, W.H., 2011. Wave types of landslide generated impulse waves. *Ocean Engineering*, 38(4), pp.630–640.
- Kamphuis, J.W. & Bowering, R.J., 1972. Impulse waves generated by landslides. In *Proceedings of the 12th International Conference on Coastal Engineering*. Washington D.C.: ASCE, pp. 575–588.
- Keulegan, G.H., 1950. *Wave motion. Engineering hydraulics*, New York: Wiley.
- Le Méhauté, B., 1976. *An introduction to hydrodynamics and water waves*, New York: Springer.
- Panizzo, A., 2004. *Physical and numerical modelling of subaerial landslide generated waves*. Università degli studi di L'Aquila.
- Panizzo, A., De Girolamo, P. & Petaccia, A., 2005. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(12), pp.1–23.
- Sælevik, G., Jensen, A. & Pedersen, G., 2009. Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide, Western Norway. *Coastal Engineering*, 56(9), pp.897–906.
- Santamarina, J.C. et al., 2002. Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1), pp.233–241.
- Sorensen, R.M., 1993. *Basic wave mechanics: for coastal and ocean engineers*, John Wiley & Sons.
- Zweifel, A., Hager, W.H. & Minor, H.-E., 2006. Plane Impulse Waves in Reservoirs. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132(5), pp.358–368.