

# MEDICIÓN EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ONDAS SOLITARIAS EN FLUIDOS DE DISTINTA REOLOGÍA

Carlos Calvo Cortés-Monroy<sup>1</sup>, Aldo Tamburrino Tavantzis<sup>1,2</sup> y Claudio Falcón Beas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile - Tel: +56957311992

<sup>2</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

<sup>3</sup>Departamento de Física, Universidad de Chile, Blanco Encalada 2008, Santiago, Chile.  
E-mail: carlos.calvo@ug.uchile.cl, atamburr@ing.uchile.cl, cfalcon@cec.uchile.cl

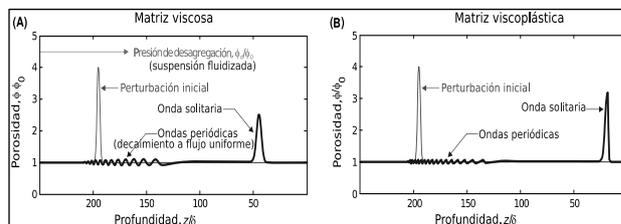
## Introducción

El estudio de las ondas de gravedad en fluidos dentro del régimen de aguas someras, en el cual se enfoca este trabajo, resulta de especial interés desde el punto de vista ingeniería de costas, dado que describe el estado del mar más cercano al litoral, lugar donde suceden las principales actividades productivas de esta área relevantes para Chile.

Por otro lado, los fluidos no newtonianos se caracterizan por su ley constitutiva, en la cual su tasa de deformación ante un esfuerzo de corte difiere de una recta. Su estudio es de especial relevancia en ingeniería hidráulica y geofísica (flujos detríticos y magmáticos), la industria de alimentos (pulpas y gelatina), la industria farmacéutica (gel y cremas) y la minería (relaves). La propagación de ondas sobre fluidos no newtonianos se ha utilizado en reometría de alta frecuencia, para medir el comportamiento de fluidos fuera de los rangos de frecuencia convencionales ( $10^{-3} - 10^{-2}$  Hz) con el fin de caracterizar fluidos a bajas tasas de deformación (Chhabra y Richardson, 1999). Dichas vibraciones son aplicables en procesos industriales, como el curado de polímeros, con el fin de ligar sus cadenas a altas frecuencias (Chhabra y Richardson, 1999). Un caso particular de las ondas no lineales lo constituyen las ondas solitarias propagativas en fluidos, perturbaciones singulares en que la aceleración advectiva compensa la dispersión de la onda y disipación viscosa. Este fenómeno se observa en la naturaleza tanto en agua (Winckler y Liu, 2015), como en fluidos no newtonianos (Gleeson y Ingebritsen, 2016; Richard et al. 2012; Connolly y Podladchikov 2015). En el primer caso, estas perturbaciones se generan producto de variaciones súbitas de presión como deslizamientos de tierra sobre la superficie del agua, que luego se manifiestan como onda larga, (Winckler y Liu, 2015). El rol de la viscosidad en la propagación de ondas solitarias es de especial relevancia en casos como el derrame de petróleo desde barcos en aguas someras (Mohapatra y Soares, 2015).

Su contraparte no newtoniana se encuentra en la naturaleza principalmente dentro de la corteza terrestre inferior, donde la mezcla entre fluidos devolatilizados (agua y  $CO_2$  con roca metamórfica fundida) o la liberación de estos fluidos mezclados con partículas muy finas confinados durante largos períodos dentro de cuencas sedimentarias, en presencia de bruscas subpresiones como lo es el proceso de hidrofractura (Connolly y Podladchikov 2015), originan ondas solitarias unidimensionales en la porosidad de esta mezcla (Figura 1). En esta región de la corteza terrestre, la respuesta viscosa de la matriz de roca fundida se espera que sea no lineal de acuerdo a Richard et al. (2012), y como fue demostrado experimentalmente por Kohlstedt et al. (1995).

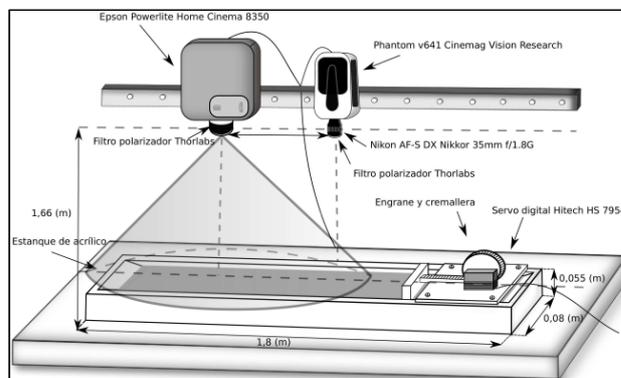
El presente estudio tiene como objetivo estudiar experimentalmente y mediante simulaciones numéricas 2D la propagación de ondas solitarias en fluidos newtonianos (agua y una solución de glicerina) y no newtonianos de tipo pseudoplásticos (solución de carboximetilcelulosa).



**Figura 1.-** (A) Solitones en fluidos Newtonianos y (B) Viscoplasticos. Modificada de (Connolly y Podladchikov 2015).

## Metodología experimental

La instalación experimental se presenta en la Figura 2 y consiste en un estanque prismático de acrílico de 0,001m de espesor y de 1,8 m de largo; 0,08 m de ancho y 0,055 m de alto. La superficie libre es perturbada mediante un mecanismo compuesto por un servomotor digital programable Hitec HS-7954HS ensamblado de un engranaje mecánico fabricado en una impresora 3D Makerbot Replicator 2. El motor se alimenta a 6,5V y se conecta a través de USB a una placa Teensy 3.1 programable en Arduino. El método utilizado para obtener ondas solitarias a escala de laboratorio es el generador de ondas por movimiento controlado de pistón Malek-Mohammadi y Testik (2010).



**Figura 2.-** Montaje experimental.

La superficie de las perturbaciones se registra mediante la perfilometría por transformada de Fourier (Takeda et al., 1982), técnica óptica no intrusiva de alta resolución la cual mide la elevación de superficies en 2D a lo largo del tiempo con una precisión entre 0,1 – 1 mm (Laloš et al., 2015). La evolución temporal de las ondas se registra con una cámara Phantom v641 Cinemag Vision Research, de 12-bits de color y resolución de 4 Megapíxeles, a 250 cuadros por segundo.

## Modelo numérico

Se realizan simulaciones numéricas mediante un modelo

bidimensional de volúmenes finitos en OpenFOAM, utilizando la librería de OLAFOAM (Higuera et al., 2015), actualización del mismo creador de IHFOAM. OLAFOAM se basa en el la librería de interFOAM, la cual resuelve la fase líquida y gaseosa implementando esquemas en el estado del arte de generación y absorción de ondas. Las perturbaciones se generan con una malla dinámica (olaDyMFOam) en régimen laminar.

## Resultados

Se comparan los perfiles de la superficie  $\eta$  de la onda solitaria generada experimentalmente en agua con la solución teórica de Grimshaw, (2007), además se contrastan dichos resultados de la onda medida con los resultados numéricos obtenidos para el agua, la solución de glicerina y la de carboximetilcelulosa, respectivamente. En las Figuras 3, 4 y 5 se comparan los resultados de las simulaciones numéricas y las mediciones, graficando la elevación  $1 + \epsilon$ , donde  $\epsilon = \eta/h$ , en función del tiempo adimensional donde  $h$  es la profundidad de fluido.

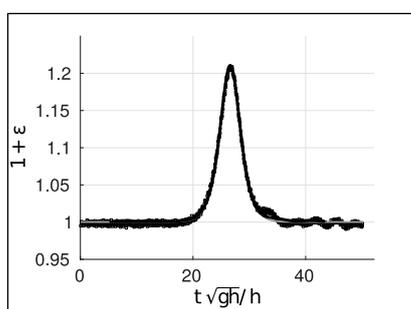


Figura 3.- □ Onda experimental en agua, — simulación numérica, — solución teórica.  $h=0.040\text{m}$ .

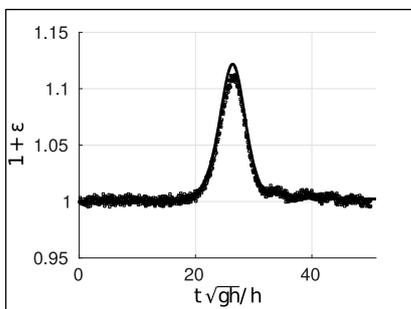


Figura 4.- □ Onda experimental en solución de glicerina, — simulación numérica.  $h=0.038\text{m}$ .

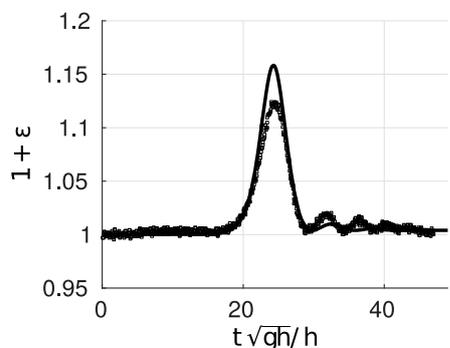


Figura 5.- □ Onda experimental en solución de CMC, — simulación numérica.  $h=0.040\text{m}$ .

## Conclusiones y desafíos futuros

La simulación numérica se valida mediante la solución analítica y las mediciones experimentales por FTP para ondas solitarias

en agua. Se obtiene una ligera diferencia en la simulación numérica de fluidos no newtonianos con respecto a los otros casos, debido a que la simulación es bidimensional, por consiguiente la pérdida friccional queda dada completamente a la fricción del fondo del estanque, por lo que se están despreciando las pérdidas friccionales asociadas a las paredes del canal, como sí ocurre en las mediciones en laboratorio. Dicho esto, para obtener mejores resultados se aconseja implementar un modelo numérico tridimensional con malla dinámica, capaz de incorporar los esfuerzos viscosos en la superficie de las paredes.

## Agradecimientos

Se agradece el financiamiento otorgado por la beca CONICYT-PCHA/MagisterNacional/2016 22161261 (Chile), el apoyo entregado al Departamento de Postgrado y Postítulo de la Universidad de Chile, la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02) (Chile) y el financiamiento del proyecto FONDECYT número 1161751 (Chile).

## Referencias

- Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (1999). *Non-Newtonian Flow: Fundamentals and Engineering Applications*. Butterworth-Heinemann.
- Connolly, J. A. & Podladchikov, Y. Y. (2015). "An analytical solution for solitary porosity waves: dynamic permeability and fluidization of nonlinear viscous and viscoplastic rock". *Geofluids*, 15(1-2), 269–292.
- Gleeson, T., & Ingebritsen, S. (2016). *Crustal permeability*. John Wiley & Sons.
- Grimshaw, R. (2007). *Solitary waves in fluids*, volume 47. WIT Press.
- Higuera, P., Losada, I. J., & Lara, J. L. (2015). "Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries". *Coastal Engineering*, 101, 35–47.
- Kohlstedt, D., Evans, B., & Mackwell, S. (1995). "Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B9), 17587–17602.
- Laloš, J., Mrak, M., Pavlovčič, U., & Jezeršek, M. (2015). "Handheld optical system for skin topography measurement using fourier transform profilometry". *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(5), 285–291.
- Malek-Mohammadi, S. & Testik, F. Y. (2010). "New methodology for laboratory generation of solitary waves". *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(5), 286–294.
- Mohapatra, S. C., & Soares, C. G. (2015). "Comparing solutions of the coupled Boussinesq equations in shallow water." *Maritime Technology and Engineering*. London: Taylor & Francis, 947-954.
- Richard, G. C., Kanjilal, S., & Schmeling, H. (2012). "Solitary-waves in geophysical two-phase viscous media: a semi-analytical solution". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 198, 61–66.
- Roenby, J., Bredmose, H., & Jasak, H. (2016). "A computational method for sharp interface advection". *Royal Society open science*, 3(11), 160405.
- Takeda, M., Ina, H., & Kobayashi, S. (1982). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 72(1), 156–160.
- Winckler, P., & Liu, P. L. F. (2015). "Long waves in a straight channel with non-uniform cross-section". *Journal of Fluid Mechanics*, 770, 156-188.