

ESTUDIO DE 3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA SIMULAR OLAS PRODUCIDAS POR DERRUMBES EN EMBALSES Y ESFUERZOS EN COMPUERTAS

Harold Alvarez y John Wendelbo

Flow Science Latin America, Colombia.

Flow Science Inc., Estados Unidos.

E-mail: harold.alvarez@flow3d.co, john.wendelbo@flow3d.com

Resumen:

En el presente trabajo se estudian tres modelos matemáticos para simular olas producidas en un embalse por un derrumbe lateral de los cuerpos que lo conforman, analizando los esfuerzos inducidos en una compuerta radial de un vertedero el cual es un caso de estudio hipotético de un derrumbe sobre la *Presa Agua del Toro* ubicada en la provincia de Mendoza, Argentina. Las simulaciones numéricas se realizaron con el software CFD FLOW-3D y la extensión FLOW-DEM.

Metodología:

Los modelos matemáticos describen un fenómeno físico mediante una ecuación que establezca las variables específicas de un evento. En este trabajo se realizará la descripción matemática y física de tres modelos mediante los cuales se simularán eventos de deslizamientos de masas de tierra o roca, bien sea húmedas o secas. Se realizarán 3 simulaciones de un derrumbe en la Presa Agua del Toro empleando los siguientes modelos matemáticos: General Moving Object (GMO) para el Caso A, Granular Flow (Slurry: Lodo) para el Caso B y Partículas Discretas (DEM) para el Caso C. Una vez generado el evento de derrumbe sobre el embalse, se analizará la presión dinámica y las velocidades de las olas hasta que éstas impacten contra la compuerta radial del vertedero para, de esta manera, calcular los esfuerzos inducidos mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM). Todas las simulaciones se realizarán en 3 dimensiones (topografía y batimetría con datos tipo raster .ASC y estructuras con datos CAD tipo .STL) y en estado transitorio.

Objeto móvil rígido (General Moving Object)

Una de las formas de modelar el fenómeno de derrumbes de rocas es considerando toda la masa de tierra y rocas como un único cuerpo rígido que se desliza sobre un plano inclinado de una ladera y golpea el agua produciendo un efecto de olas a través del cuerpo de agua. El modelo matemático que cumple con estas características es el modelo GMO: General Moving Object. Dicho modelo posee, dentro de sus características principales, la capacidad de simular el objeto móvil con hasta 6 grados de libertad en un sistema de coordenadas cartesianas y acoplarse al flujo del fluido (Wei, 2005). Este modelo permite incluir múltiples objetos móviles independientes con sus correspondientes propiedades físicas, tales como: masa, tamaño, densidad, coeficiente de fricción estático, coeficiente de restitución, y momento de inercia entre otros. Como adición a dicho modelo, se encuentra la integración del modelo de colisión de objetos, el cual permite simular todos los efectos generados por un objeto en el espacio y tiempo. El General Moving Object integra una metodología llamada FAVOR[®] la cual permite representar gráficamente y numéricamente el objeto dentro del dominio computacional y simular en cada time-step la localización y los movimientos asociados del objeto. En este modelo se usa una malla cartesiana fija y constante para representar y calcular los movimientos del objeto durante todo el tiempo de simulación. Con respecto a las ecuaciones fundamentales de los fluidos, este modelo modifica tanto la ecuación de continuidad como de cantidad de

momentum (Ecuaciones de Navier-Stokes) para incluir la transferencia de energía del objeto rígido móvil hacia el fluido.

Lodo de alta densidad (Granular Flow)

Otra forma de modelar el deslizamiento de grandes masas de tierra o rocas, es considerando dicha masa como un cuerpo flexible, que se adapte a las irregularidades de la superficie por donde se desliza, que sea de alta densidad pero que se pueda mover fácilmente y que tenga propiedades de cuerpo continuo, es decir que se muevan todos sus sub-componentes como una unidad. Adicional a esto, se podría considerar que la masa de tierra contiene humedad, la cual le permite adoptar las propiedades elásticas de los fluidos, o bien sea por el hecho de que el derrumbe fue causado por los efectos asociados a lluvias intensas. El modelo que cumple con las mencionadas características y que integra estas propiedades a una simulación numérica, es el modelo matemático Granular Flow, mediante el cual se pueden incluir propiedades de material particulado mezclado de un fluido cuyo resultado final nos dará un fluido continuo de alta densidad Hirt C. W. (2010).

Partículas discretas (DEM)

Otra forma de simular un deslizamiento es considerando la masa móvil como un conjunto de varias partículas que interactúan entre sí y con el fluido. El modelo matemático que cumple con estas características es el Método de Elementos Discretos, mediante el cual se simula el comportamiento de dichas partículas durante la colisión entre ellas usando propiedades como la *densidad*, *diámetro*, *constante del resorte*, *Coficiente de Restitución* etc. y simula la interacción con el fluido usando propiedades como el *Coficiente de Arrastre Viscoso* entre otras. La geometría comprendida en el dominio computacional es reconocida por las partículas mediante el uso de la metodología FAVOR[®] detectando la colisión y aplicando una fuerza contraria, todo esto al interior de cada celda computacional, lo que hace que sea un método sub-grilla y las partículas no puedan ser de mayor tamaño que las celdas. En el presente trabajo se realizó una simulación de un conjunto de rocas (85.000 unidades) de diámetro uniforme (diámetro=1.8m) con una densidad de 2.745 kg/m³, las cuales conformaban el mismo volumen de los dos anteriores métodos mencionadas en el presente trabajo.

Caso de estudio: prueba de validación

Con el fin de validar el modelo que será utilizado, se muestra en la Figura 1 los resultados parciales de un estudio de validación, en el cual se comparan los resultados de un ensayo de laboratorio realizado por Heller (2007) con los resultados de la validación numérica realizados por Alvarez et al. (2018):

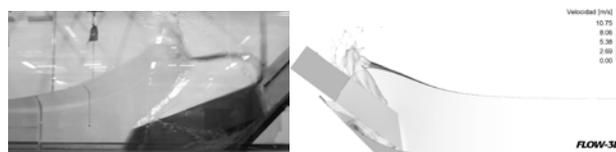


Figura 1.- Prueba de Laboratorio (Izq) y Simulación Numérica (Der).

Caso de estudio práctico: Presa Agua del Toro

Se realizó la simulación de un derrumbe hipotético en la represa Agua del Toro localizada en la Provincia de Mendoza en la República Argentina y se utilizó el modelo *Fluid-Structure Interaction* para calcular los esfuerzos en la compuerta radial, ver Figura 2 y el perfil de velocidades se muestra en la Figura 3.

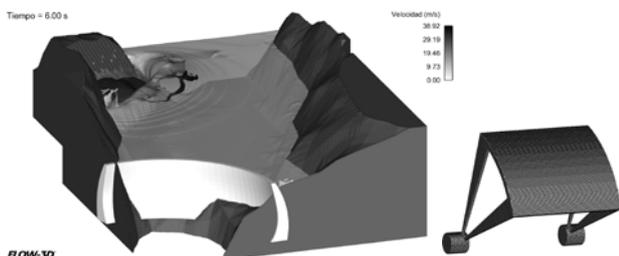


Figura 2.- Simulación 3D Presa Agua del Toro (Izquierda) y Compuerta Radial del Vertedero con malla FEM (Derecha).

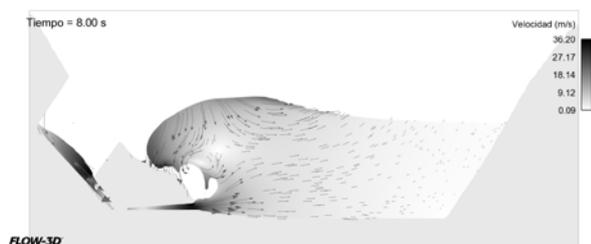


Figura 3.- Simulación del perfil de velocidades para el caso A.

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el sensor 1, el cual está ubicado en la zona central del embalse en dirección perpendicular al lugar del derrumbe:

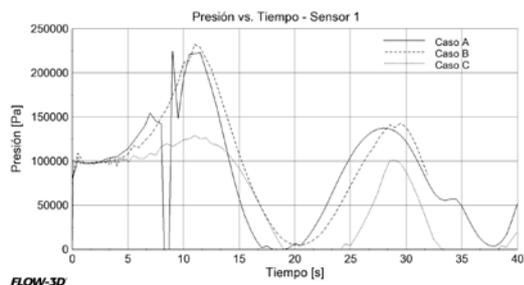


Figura 4.- Gráfica de Presión vs. Tiempo en el Sensor 1.

Se observan comportamientos similares del valor de la presión en el sensor 1, ver Figura 4, para el Caso A y B (Sólido y Slurry). Por otro lado, el Caso C presenta una presión de tan sólo el 55% con respecto a la presión registrada en el Caso B; sin embargo esta presión aumenta en el instante $t=28s$ cuando se genera la segunda ola inducida, alcanzando valores hasta el 75% con respecto al valor de la presión del Caso B. También se observan comportamientos similares con respecto al tiempo de alcance de los picos en cada uno de los casos: $t=12s$ y $t=28s$.

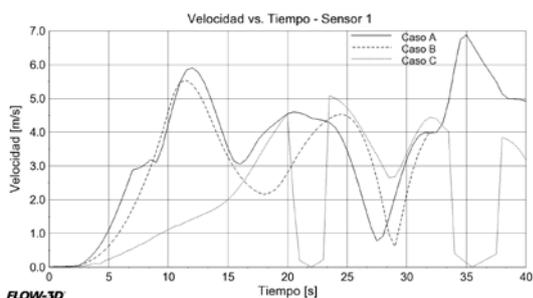


Figura 5.- Gráfica de Velocidad vs. Tiempo en el Sensor 1.

Se observan similitudes en las velocidades e instantes del primer punto máximo de las olas generadas para el Caso A y B, ver Figura 5, obteniendo valores entre $V=5.5$ y $V=6.0$ [m/s] cercanos al instante $t=12s$; difiriendo así por su parte el Caso C que tarda hasta $t=20s$ en llegar a su valor inicial máximo de $V=4.5$ [m/s]. La diferencia absoluta existe en la segunda ola generada por el Caso A (Sólido) el cual genera un valor máximo de $V=6.9$ [m/s] en el instante $t=35s$, demostrando su alto nivel de energía en comparación con los demás casos de estudio.

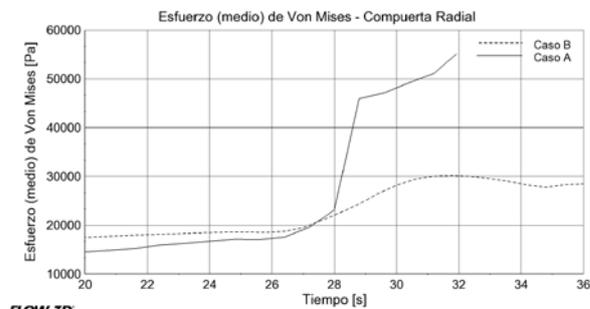


Figura 6.- Gráfica de Esfuerzos sobre la Compuerta Radial.

Se observa un pico de los esfuerzos inducidos sobre la compuerta en el instante $t=34.0$ y con un incremento del 66% aprox. con respecto a su estado normal de operación. Ver Figura 6. También se observa una diferencia de un 80% aprox. en los esfuerzos, según el método de esfuerzos de Von Mises, el cual ocurre en el instante $t=31.5s$. Siendo los esfuerzos mayores producidos por el caso de estudio del sólido rígido.

Conclusiones

1. El modelo numérico del cuerpo rígido como generador de olas es el que mayor cantidad de energía transfiere al cuerpo de agua haciendo que los esfuerzos inducidos en la compuerta del vertedero sean los mayores.
2. El modelo de partículas DEM generó olas con menor magnitud en velocidad y presión sobre el cuerpo de agua del embalse, debido a los vacíos entre partículas, lo cual conlleva a tener menor área de transferencia de energía cinética sobre el cuerpo de agua.
3. La presión dinámica y posteriores esfuerzos inducidos sobre la compuerta alcanzaron magnitudes de hasta 3 veces mayores a las inducidas por presión hidrostática, por lo cual debe ser considerada a plenitud durante la fase de diseño para cargas estáticas y dinámicas, con el fin de prevenir fallas cuando sucedan este tipo de eventos en las presas.
4. Teniendo en cuenta la variedad de modelos capaces de simular deslizamientos de masas sobre un cuerpo de agua, es importante una correcta caracterización geo-morfológica del derrumbe, lo que permitirá seleccionar el modelo numérico adecuado para simular el fenómeno con precisión.

Referencias

- Alvarez H. Wendelbo J. (2018), "Validación CFD de olas producidas por un cuerpo rígido en un plano inclinado usando FLOW-3D", Flow Science Latin America, Bogotá.
- Ashayer P. (2007) "Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to rockfall simulation", PhD Thesis, University of Toronto.
- Heller V. (2007), "Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics", Dissertation: ETH No. 17531, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- Hirt C. W. (2010). "A Continuum Model for High Concentration Granular Media". Flow Science Technical Note, FSI-10-TN88, Dec. 2010.
- Weï, Gengsheng. (2006). "Three-Dimensional Collision Modeling for Rigid Bodies and its Coupling with Fluid Flow Computation," Flow Science Technical Note #75, FSI-06-TN75, © Flow Science.