

2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción

A continuación se realiza un breve repaso a las opciones disponibles en la actualidad a la hora de llevar a cabo una simulación mediante modelación matemática del flujo en lámina libre.

Estas opciones están en continuo desarrollo y en este apartado se desarrolla una descripción que intenta ser también un pequeño repaso histórico del desarrollo de la modelación matemática que se ha producido en los últimos años y que ha sido posible gracias a la creciente capacidad de los ordenadores para procesar datos de una manera cada vez más rápida.

2.2 Modelos unidimensionales

2.2.1 Modelos 1D en régimen permanente

Estos modelos permiten el cálculo en régimen gradualmente variado y fondo fijo. Están hoy en día en plena vigencia ya que para estimación de cotas de lámina de agua en caso de avenida en las que el factor tiempo no es importante son perfectamente válidos.

Para el análisis de la inundación que crearía la rotura de una presa estos modelos no son suficientes ya que no tienen en cuenta el factor tiempo, imprescindible para poder prever afecciones de la onda de rotura a poblaciones, etc.

Se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces, pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación, singularidades como puentes, azudes, pasos bajo vía, etc.

El esquema numérico más utilizado es el denominado *paso a paso*.

Para la gran mayoría de simulaciones fluviales que se llevan a cabo hoy en día se utilizan este tipo de modelos ya que para delimitación de zonas inundables, dimensionamiento de infraestructuras tales como puentes, etc son perfectamente válidos.

Los modelos comerciales de este tipo más utilizados son HEC-RAS (USACE) y MIKE 11 (DHI).

2.2.2 Modelos 1D en régimen variable

Para simular el régimen variable, necesario por ejemplo para la simulación de la rotura de una presa, hay que solucionar las ecuaciones de Saint-Venant. Los modelos existentes se dividen en dos tipos en función de si resuelven las ecuaciones de Saint-Venant completas o si realizan alguna simplificación.

1. Esquemas de resolución para las ecuaciones completas de Saint-Venant:

I. Método de las características.

Puede servir para canales prismáticos, pero su aplicación para canales no prismáticos y de geometría irregular es de una enorme complejidad y resultados poco fiables, por lo que no son adecuados, ni han sido utilizados, para cauces fluviales.

II. Diferencias finitas explícitas.

Dentro de este grupo encontramos los siguientes esquemas numéricos:

- Difusivo o esquema de Lax
- Leap-Frog
- McCormack
- Lamba

Los esquemas explícitos presentan el inconveniente de requerir pasos de tiempo muy pequeños durante el cálculo para que resulten estables y por tanto son caros computacionalmente.

III. Diferencias finitas implícitas.

Esquemas destacados:

- Preissmann
- Beam and Warming
- Vasiliev

En general los esquemas implícitos son más eficientes computacionalmente que los explícitos, aunque esta ventaja deja serlo en cuanto se ha de modelizar flujo en régimen rápidamente variable (p.e rotura de una presa) ya que entonces el paso de tiempo de cálculo debe reducirse hasta valores similares a los de los esquemas explícitos para ser capaces de representar discontinuidades.

La mayoría de modelos comerciales que se usan en la actualidad resuelven el esquema de Preissmann o alguna variante de éste. Algunos de estos modelos son: HEC-RAS, MIKE-11, SOBEK y DAMBRK.

IV. Elementos finitos.

Este método da óptimos resultados para ecuaciones elípticas o parabólicas, mientras que las ecuaciones de Saint-Venant forman un sistema hiperbólico, esto hace que el método de los elementos finitos requiera mucha complejidad y mucho tiempo de cálculo para llegar a unos resultados que no mejoran considerablemente los obtenidos mediante las diferencias finitas.

Todos los esquemas de resolución de las ecuaciones completas de Saint-Venant presentados tienen problemas de estabilidad cuando el flujo es rápidamente variable.

Este problema puede abordarse de dos maneras: métodos de aislamiento o métodos directos.

- Métodos de aislamiento: Se trata de aislar la discontinuidad y tratarla como un contorno, a la práctica es inviable porque no conocemos donde estará la discontinuidad.
- Métodos directos: Se dividen en dos grupos, los que añaden un término artificial en las ecuaciones para aumentar la difusión (viscosidad artificial) y por tanto suavizan la discontinuidad con la consecuente pérdida de rigor en la solución y los que no añaden ningún término artificial. Los métodos que no añaden viscosidad artificial son claramente deseables. Dentro de estos métodos se encuentra el Local Partial Inertia (LPI), que añade un término a las ecuaciones para reducir los términos de inercia cuando el número de Froude se acerca a la unidad (por tanto habrá un cambio de régimen y una posible discontinuidad).

2. Esquemas de resolución para las ecuaciones de Saint-Venant simplificadas:

a) Métodos hidrológicos

Desprecian completamente la ecuación del movimiento. De entre ellos destaca el método de Muskingum.

Estos esquemas se usan hoy en día en modelos para el cálculo de caudales en función de precipitaciones en diferentes cuencas donde se hace necesaria la propagación de hidrogramas tales como HEC-HMS.

b) Método de la onda cinemática

Sólo considera el término de fricción y de pendiente de la solera en la ecuación del movimiento.

c) Método de la onda difusiva

Incluye además respecto al método de la onda cinemática los términos de presión.

d) Método de la onda dinámica cuasi-permanente

Tan solo desprecia la aceleración local.

Estos métodos simplificados tenían sentido cuando la capacidad y velocidad de los ordenadores era limitada, pero por lo general lo han ido perdiendo a lo largo del tiempo, tan solo los métodos de Muskingum y la onda cinemática siguen utilizándose ampliamente en estudios hidrológicos.

2.3 Modelos cuasi-bidimensionales

Para describir muchos fenómenos naturales como puede ser la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación unidimensional deja de ser adecuada y por ello se desarrollaron primero los esquemas cuasi-bidimensionales y luego los esquemas bidimensionales propiamente dichos.

En los esquemas cuasi-bidimensionales se aplican las ecuaciones de Saint-Venant unidimensionales en un cauce principal, mientras que la llanura de inundación se representa mediante un recinto de almacenamiento de agua conectado al cauce.

2.4 Modelos bidimensionales

Se pueden dividir en esquemas clásicos y esquemas de alta resolución. Los esquemas clásicos se han utilizado con buenos resultados para flujo gradualmente variable, pero no sirven en general para rápidamente variable.

Igual que en el caso unidimensional, para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones se ha utilizado el método de las características, métodos en diferencias finitas y métodos en elementos finitos, pero en el caso bidimensional además se ha utilizado la técnica de discretización en volúmenes finitos. Se ha comprobado que la técnica de los volúmenes finitos es especialmente adecuada para estos casos.

Los esquemas bidimensionales de alta resolución se encuentran todavía en pleno desarrollo y no existen modelos comerciales que puedan utilizarse de forma generalizada, reduciéndose los modelos existentes a universidades o otros centros de investigación.

2.5 Elección del modelo a utilizar

Con todo lo expuesto hasta ahora el escenario en la actualidad nos da a elegir a la hora de realizar una simulación de rotura de una presa entre las siguientes

opciones reales, una vez descartados los modelos bidimensionales de alta resolución por no estar disponibles comercialmente:

- Modelos unidimensionales en régimen variable
- Modelos cuasi-bidimensionales
- Modelos bidimensionales

La selección del tipo de modelo estará en función varios factores, por ejemplo en un valle abrupto sin llanuras de inundación un modelo unidimensional será adecuado.

En cambio si tenemos zonas con un comportamiento claramente bidimensional (llanuras de inundación) deberemos de recurrir a modelos cuasi-bidimensionales o modelos bidimensionales. El primer caso requiere habilidad y experiencia en este tipo de situaciones y el segundo requiere una topografía muy detallada para dar resultados fiables.

Por otro lado estudios recientes (Soares & Alcrudo (1998), Soares & Testa (1999)) han revelado que generalmente los modelos unidimensionales sobreestiman la velocidad del frente de onda, mientras que los bidimensionales la subestiman. Por tanto en este aspecto los unidimensionales dejarían del lado de la seguridad.

Como se ha expuesto no es fácil dar a priori un tipo de modelos por bueno para utilizarlo en todas las simulaciones ya que depende de la calidad de la topografía que tengamos, el tipo de régimen (si esperamos régimen rápidamente variable los 2D no darán buen resultado), etc.

2.6 Modelos unidimensionales comerciales

Los modelos unidimensionales comerciales que permiten el cálculo en régimen variable más extendidos en la actualidad son DAMBRK (USA National Weather Service), MIKE-11 (DHI), HEC-RAS (USACE) y SOBEK (Delf Hydraulics).

En este apartado se presenta una comparativa entre DAMBRK -modelo de referencia que más se ha usado en los últimos años para la simulación de rotura de presas- y HEC-RAS que debe su interés a los argumentos expuestos en el apartado 1 de este trabajo (entorno amigable, modelo muy extendido para simulaciones hidráulicas, modelo gratuito, etc).

2.6.1 Comparativa HEC-RAS con DAMBRK

La Asociación de Presas de Canadá (Canadian Dam Association-CDA), en su congreso anual celebrado en octubre de 2005, incluyó un estudio [9] cuyo objetivo era comparar HEC-RAS con FLDWAV y DAMBRK y evaluar las ventajas y desventajas de cada modelo.

FLDWAV es una evolución de DAMBRK que incorpora algunas mejoras en aspectos como la simulación de estructuras, pero el esquema numérico utilizado es el mismo en los dos modelos. La comparativa que a continuación se resume se ha realizado entre HEC-RAS y FLDWAV.

Las conclusiones de dicho estudio, donde se incluía la comparación de ambos modelos mediante un caso real de rotura de presa, se pueden resumir en:

1. Los dos modelos tienen la misma base teórica y usan las mismas técnicas numéricas para la mayoría de casos. El uso de los dos modelos conduce a los mismos resultados cuando todos los parámetros introducidos son idénticos.
2. FLDWAV tiene más opciones computacionales en relación con condiciones de contorno y capacidad para tratar flujo no newtoniano y fuerzas de viento. En cambio HEC-RAS presenta más opciones para el cálculo de flujos laterales.
3. La experiencia en el uso de los dos modelos revela que el tiempo computacional requerido por FLDWAV es inferior al de HEC-RAS. Mientras que en el primero la simulación del avance de la onda de avenida producto de la rotura de una presa se realiza normalmente en menos de un minuto, la misma simulación realizada con HEC-RAS puede tomarse entre 20 y 30 minutos. Cabe destacar que este aumento de tiempo se debe en parte a la parte de post procesamiento en la cual HEC-RAS crea unos archivos para ver los resultados de forma gráfica de los cuales FLDWAV no dispone. Por otro lado en FLDWAV el modelo automáticamente usa un menor paso de tiempo cuando éste no converge, en cambio HEC-RAS usa un paso de tiempo fijo para toda la simulación. Además de reducir el tiempo esta ventaja hace que llegar a una solución estable con FLDWAV sea más fácil que con HEC-RAS.
4. HEC-RAS proporciona resultados equivalentes cuando los parámetros usados en la simulación de una rotura de presa son los mismos.
5. HEC-RAS tiene un mejores funciones de pre y post procesamiento. Los datos son más fáciles de editar, modificar y visualizar en pantalla. Esto se debe en gran parte a que HEC-RAS es un programa en entorno Windows mientras que la versión actual de FLDWAV todavía trabaja con sistema operativo DOS. Hay una aplicación que todavía se encuentra en fase de prueba beta, FLDAT, que servirá para introducir los datos en entorno Windows para que luego ésta los convierta en formato FLDWAV y haga funcionar el modelo. FLDAT también será capaz de importar archivos de HEC-RAS y convertirlos al formato de FLDWAV. En la misma línea existe otra herramienta, FLDGRF, que permite ver gráficamente los resultados de las simulaciones realizadas con FLDWAV.
En resumen puede decirse que la combinación de FLDAT y FLDGRF permite a FLDWAV funcionar de manera similar a HEC-RAS. De todas maneras, el resultado del “paquete” FLDWAV no es tan conveniente de usar como HEC-RAS.
6. Los dos modelos tienen capacidad para interactuar con modelos digitales de terreno (DEM o TIN) mediante entorno GIS.

Para trabajar con HEC-RAS existe una aplicación, HEC-GeoRAS, que trabaja en entorno GIS (ArcInfo, ArcView o ArcGIS). A partir de un modelo digital del terreno puede crearse un archivo para importar a HEC-RAS la información geométrica necesaria para llevar a cabo una simulación (cauce, secciones, etc.). De la misma forma después de haber realizado una simulación con HEC-RAS se pueden pasar los resultados al entorno GIS para realizar mapas de inundación.

Aplicaciones similares se han desarrollado para FLDWAV: FLDXS y FLDVIEW permiten trabajar con GIS para preparar datos y posteriormente realizar mapas de inundación. Estos programas se encuentran todavía en fase de prueba beta.