

# Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional

José María Carrillo Sánchez, Luis Gerardo Castillo Elstidí  
 Grupo de investigación Hidr@m - Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental  
 Escuela de Ingeniería de Caminos y de Minas  
 Paseo Alfonso XIII, N° 52, 30203 Cartagena (España)  
 Teléfono: 968327012  
 E-mail: jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es

**Resumen.** Cuando se realizan simulaciones con software de dinámica de fluidos computacional (denominados genéricamente CFD), el primer paso es generar un mallado de la zona de estudio (dominio fluido). La necesidad de partir de un mallado de gran calidad es tanto más importante cuanto mayor es la turbulencia en la zona de estudio. En la simulación de fenómenos bifásicos agua-aire con software CFD aumentan las exigencias del mallado. En este artículo se va analiza la variabilidad de resultados que se obtienen con el software comercial ANSYS CFX, aplicado a un aliviadero de vertido libre, cuando se emplean distintos tipos de mallado a una misma situación de flujo. Posteriormente los resultados se comparan con los medidos en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.

## 1 Consideraciones generales

Los software CFD obtienen la solución de los problemas de Mecánica de Fluidos resolviendo de forma numérica las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds:

- Conservación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

- Conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M$$

- Conservación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) &= \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mu \left( \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \\ h_{tot} &= h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \end{aligned}$$

Donde  $p$  es la presión,  $\rho$  la densidad del fluido,  $\mathbf{U}$  el vector velocidad,  $\boldsymbol{\tau}$  el tensor de tensiones turbulentas,  $h$  la energía,  $\mathbf{S}_M$  el término de las fuerzas másicas,  $\mathbf{S}_E$  el término fuente,  $\lambda$  la viscosidad volumétrica,  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $\delta$  el delta de Kronecker.

Para resolver el problema de clausura (sistema con más incógnitas que ecuaciones) se han desarrollado diferentes algoritmos que tienen en cuenta modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, que van desde los modelos algebraicos de vorticidad para la viscosidad ( $k-\epsilon$ ,  $RNG$ ,  $k-\omega$ ), hasta los modelos de tensión de Reynolds ( $RMS$ ).

## 2 Tipos de elementos de mallado

El dominio fluido del área de estudio se divide en volúmenes de control, en los cuales se deben satisfacer el equilibrio de las ecuaciones que rigen el fenómeno. Por tanto, las características y el número de estos elementos influye considerablemente en el proceso de resolución numérica.

ANSYS CFX (2006) ofrece la posibilidad de emplear diferentes tipologías de elementos para realizar el mallado del dominio fluido (Fig. 1). De este modo es capaz de poder adaptar el mallado a cualquier contorno de los sólidos que limitan el dominio fluido.

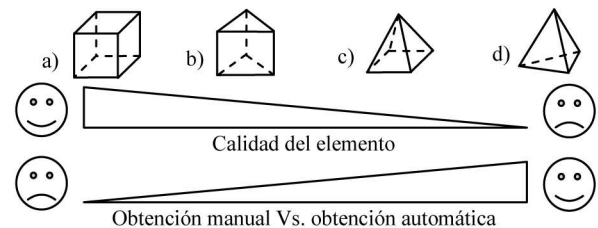


Figura 1. Tipologías de elementos. a) hexaédrico; b) prisma; c) pirámide; d) tetraedro.

La característica principal que diferencia a los distintos elementos es el número de nodos con el que resuelven las ecuaciones dentro de su volumen de control. A mayor número de nodos por elemento, más precisa será su resolución interna. En la Tabla 1 se expone un resumen de los datos.

Forma del elemento	Nodo por volumen de control
Tetraedro	4
Pirámide	5
Cuña o prisma	6
Hexaedro	8

Tabla 1. Tipología de elementos.

ANSYS incorpora un módulo de mallado semiautomático exclusivo para el campo de la dinámica de fluidos computacional (denominado CFX-Mesh), con el cual resulta rápido generar una malla híbrida de prismas y tetraedros.

En una fase avanzada, empleando el módulo para mallado manual de ANSYS, se puede seleccionar la opción "Hexa Core". Con esta opción se genera una malla predominantemente hexaédrica.

Entre las ventajas del mallado hexaédrico destacan la reducción del número de elementos del dominio fluido y la mejora de la convergencia de la solución, lo que origina como consecuencia menores tiempos de ejecución.

Por otro lado, se debe tener en cuenta a la hora de lanzar la simulación que una malla predominantemente tetraédrica requiere en torno a 1 GHz de memoria RAM por millón de elementos, mientras que la malla hexaédrica requiere aproximadamente 1 GHz por cada cien mil elementos.

### 3 Comparación de resultados

En este estudio, se ha realizado un cálculo transitorio de 60 segundos, usando un intervalo de paso de 0.05 segundos. En la Figura 2, se puede considerar que ya se han alcanzado condiciones permanentes a partir del segundo 20 de la simulación.

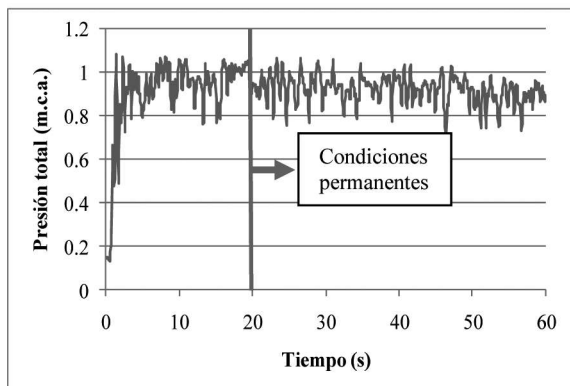


Figura 2. Simulación de la presión total en un punto del fondo del cuenco de disipación.

Se han analizado dos mallados con distinto grado de complejidad. Para realizar una comparativa más acertada, se realizó el mallado con elementos del mismo tamaño en cada una de las zonas:

A. Una única malla realizada con el mallador semiautomático del dominio fluido, CFX-Mesh, en la que existe predominio de elementos tetraédricos.

B. Mallado manual, dividiendo el dominio fluido en 17 partes conectadas, con predominio de elementos hexaédricos.

En la Tabla 2 se compara la distribución de las distintas tipologías de elementos para cada una de las dos mallas, así como el tiempo computacional requerido para realizar la simulación.

	Mallado	
	A	B
Nº Elementos	3.852.769	414.370
% Tetraedros	96.38	3.21
% Pirámides	0.00	6.74
% Prismas	3.62	0.69
% Hexaedros	0.00	89.36
Tiempo de computación (s)	3.081E+6	1.330E+06

Tabla 2. Número de elementos de las simulaciones y tiempo requerido de cálculo.

En la Figura 3 puede observarse, según el tipo de mallado, la diferencia en la resolución de la lámina del vertido libre. En la Figura 4 se grafican los perfiles de la lámina vertiente simulados con los dos tipos de mallado, junto a la solución teórico-práctica de Scimeni (1930).

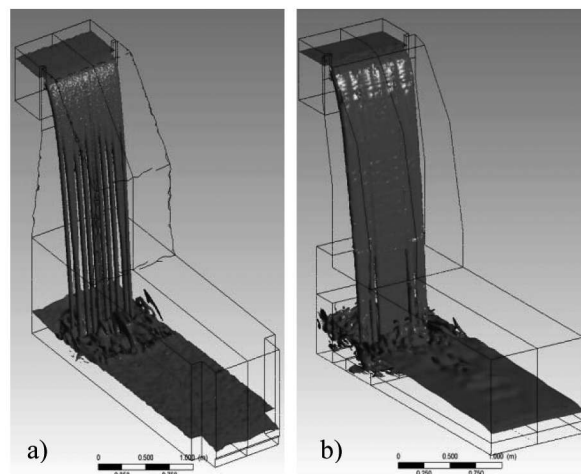


Figura 3. Simulación de lámina de vertido libre: a) mallado tetraédrico, b) mallado hexaédrico.

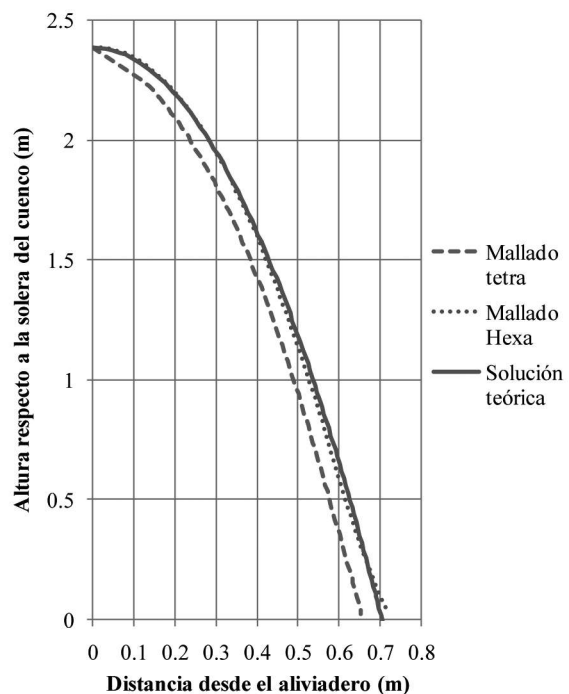


Figura 4. Perfiles de lámina de vertido libre con diferentes procedimientos de cálculo.

Teniendo en cuenta la teoría paramétrica propuesta por Castillo (2006) para la evaluación de acciones hidrodinámicas a pie de presa y revisada en Castillo y Carrillo (2011), en la Tabla 3 se comparan algunos de los parámetros que caracterizan el problema.

Para dar validez a la solución numérica, se tomarán como datos de partida los valores obtenidos en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Las variables a comparar son:

$h$	Calado en el embalse, medido a partir de la cota del aliviadero
$y_b$	Calado del flujo a su paso sobre el labio del aliviadero
$X_{imp}$	Distancia horizontal del aliviadero al punto de impacto
$P_m$	Presión media obtenida en el punto de impacto
$Y$	Calado en el cuenco de disipación
$C_p$	Coefficiente de presión dinámica media:

$$C_p = \frac{P_m - Y}{V^2/2g}$$

siendo

$V$	Velocidad incidente en el cuenco de amortiguamiento
$g$	Aceleración de la gravedad

	Mallado		Laboratorio
	A	B	
$h$ (m)	0.087	0.095	0.087
$y_b$ (m)	0.070	0.086	0.082
$X_{imp}$ (m)	0.68	0.74	0.74
$P_m$ (m.c.a.)	1.15	0.92	1.01
$Y$ (m)	0.17	0.15	0.14
$C_p$	0.35	0.28	0.31

Tabla 3. Comparativa de parámetros representativos de la teoría de vertido libre.

### 3 Análisis de resultados

En la Tabla 2 se puede comprobar cómo al emplear elementos hexaédricos del mismo tamaño que los tetraédricos, el número de elementos se reduce considerablemente. Otra de las ventajas es que el tiempo de cálculo requerido para resolver la simulación se reduce a la mitad.

Como puede apreciarse en la Figura 4 y en la Tabla 3, mediante un mallado hexaédrico, se obtiene un valor de distancia de vuelo,  $X_{imp}$ , similar al observado en laboratorio, mientras que el mallado tetraédrico no es capaz de reproducir adecuadamente el despegue de la lámina de agua que se produce en el aliviadero en vertido libre.

Por otro lado, tal como se aprecia en la Figura 3, durante la caída de la lámina vertiente, éste se concentra en tubos, alejándose de la situación real observada en laboratorio. Sin embargo, al emplear un

mallado con elementos hexaédricos éste fenómeno tiende a reducirse y desaparecer.

Estos dos fenómenos resultan de suma importancia a la hora de analizar la variación del espesor del chorro aireado respecto a la distancia de caída.

### 4 Conclusiones

En la mayoría de las aplicaciones de CFD, los elementos tetraédricos resultan adecuados para la resolución del problema de estudio.

Sin embargo, tras analizar el caso de un aliviadero de vertido libre se ha comprobado que, debido al efecto de despegue de los contactos de pared y a la alta turbulencia que se genera en el cálculo bifásico (aire-agua), para una adecuada resolución es necesario emplear mallados de elementos hexaédricos y que, aunque complica la fase de preproceso de las simulaciones, resulta necesario para obtener una caracterización adecuada del fenómeno.

### Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido de la Consejería de Universidades, Empresa e Investigación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, así como también al Centro de Supercomputación de la Fundación Parque Científico de Murcia por el acceso a los servicios del Centro de Cálculo.

### Referencias

- [1] ANSYS CFX (2006). "ANSYS CFX. Reference Guide". Release 11.0.
- [2] Benzley, S.E., Perry E., Merkley, K. and Clark, B. (1995). "A comparison of all-Hexahedra and all Tetrahedral Finite Element Meshes for elastic & elastoplastic analysis". Proc. 4th Int. Meshing. Sandia National Labs, pp 179-181.
- [3] Castillo, L.G. (2006). "Areated jets and pressure fluctuation in plunge pools". The 7<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience and Engineering. September, Philadelphia, USA.
- [4] Castillo, L.G. and Carrillo, J.M. (2011). "Numerical simulation and validation of hydrodynamics actions in energy dissipation devices". World Congress International Association of Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). Brisbane, Australia.
- [5] Scimeni, E. (1930). "Sulla forma delle vene tracimanti. L'Energia Elettrica, Aprile, pp.293-305.
- [6] Wang, E., Nelson, T. and Rauch, R. (2004). "Back to Elements - Tetrahedra vs. Hexaedra". International ANSYS Conference Proceedings.
- [7] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Nithiarasu, P. (2005). "The Finite Element Method for Fluid Dynamics", Elsevier Butterworth-Heinemann. ISBN: 0 7506 6322 7.