

Simulación en GiD del problema de flujo de cavidad en 2D

GiD simulation of 2D cavity flow problem

Gabriela Pedraza Jiménez^{1*} , Miguel Ángel Rodríguez Velazquez² , Ricardo Román Gutiérrez¹ ,
Francisco Javier Domínguez Mota³ 

¹ Doctorado en Ingeniería Física. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N Edificio B, planta baja, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

² Doctorado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

³ Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Avenida Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán.

Historial

Manuscrito recibido: 7 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 11 de octubre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre de 2024

*Autor para correspondencia

Gabriela Pedraza Jiménez

e-mail: 2220157h@umich.mx

ORCID: 0009-0002-8118-0260

Resumen

En este trabajo se presenta la solución numérica al problema de flujo laminar bidimensional en una cavidad con la frontera superior móvil. Utilizando el software *GiD Simulation* se realiza el preprocesamiento y postprocesamiento de las simulaciones numéricas, el cual permite establecer la geometría del problema y analizar los resultados. Además, se emplea el software *Kratos Multiphysics* para el procesamiento del problema mediante elementos finitos. Los resultados demuestran la eficiencia de *GiD* como herramienta para resolver problemas de flujo y la integración con *Kratos Multiphysics* proporciona una solución confiable.

Palabras clave: Flujo en cavidades, solución numérica, *GiD Simulation*, *Kratos Multiphysics*.

Introducción

Los problemas de flujo en recintos cerrados, también denominados cavidades, con tapa móvil han sido de gran interés y ampliamente estudiados debido a la interacción fluido-estructura que se presenta. El flujo laminar incompresible en una cavidad rectangular, cuya pared superior se mueve con una velocidad constante es uno de los más analizados y ha servido con frecuencia como un problema modelo para probar y evaluar técnicas numéricas, de ahí que se han producido soluciones de referencia para el mismo.

Uno de los trabajos más interesantes fue presentado

Abstract

In this work, the numerical solution of the two-dimensional laminar flow problem in a cavity with a moving upper boundary is presented. Using *GiD Simulation* software, preprocessing and post-processing of the numerical simulations are carried out, allowing for the establishment of geometry and analysis of the results. Additionally, *Kratos Multiphysics* software is employed for processing the problem using finite elements. The results demonstrate *GiD*'s efficiency as a tool for solving flow problems, and the integration with *Kratos Multiphysics* provides a reliable solution.

Keywords: Cavity flow, numerical solution, *GiD Simulation*, *Kratos Multiphysics*.

por Kawaguti (1961), quien realizó un estudio de la dinámica de un fluido viscoso en una cavidad rectangular bidimensional, asumiendo que la misma está delimitada por tres paredes planas rígidas, en las cuales la velocidad del fluido es cero, y por una placa plana que se mueve a una velocidad constante (**Figura 1**). Kawaguti consideró tres casos de las relaciones entre las longitudes de los lados de la sección transversal rectangular: 2:1, 1:1, 1:2. El número de Reynolds del flujo varía entre 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. Para estos casos, las ecuaciones de Navier-Stokes las resolvió utilizando la metodología de diferencias finitas (LeVeque, 2007). Los resultados

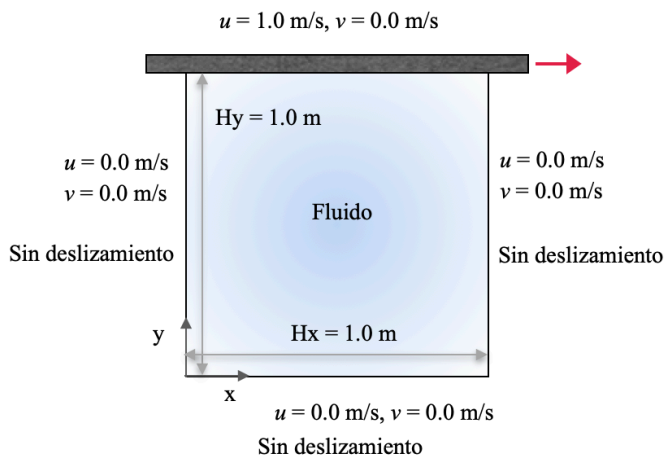


Figura 1. Modelo físico de un flujo en una cavidad con tapa móvil.

mostraron que existe un flujo circulante que se extiende a lo largo de la longitud de la cavidad y que la presión en la pared lateral izquierda es más alta que la presión en la pared derecha. Botella y Peyret (1998) presentaron el estudio del flujo en cavidades cuadradas con una frontera móvil considerando un número de Reynolds de 1000, obteniendo su solución mediante el método de proyección (Chorin, 1969), que mostró resultados altamente precisos ($\epsilon = 1 \times 10^{-8}$) para el flujo en cavidades. Bruneau y Saad (2006), llevaron a cabo simulaciones numéricas del flujo en la cavidad cuadrada con una tapa móvil considerando varios números de Reynolds. Los resultados utilizando la metodología de diferencias finitas fueron confiables comparados con aquellos presentados en la literatura de su momento. Marchi *et al.* (2009), resolvieron el problema de flujo en una cavidad cuadrada cuya tapa tiene una velocidad constante, mediante la metodología de volumen finito (Versteeg y Malalasekera, 2007), con aproximaciones de segundo orden de precisión llegando a resultados precisos, hasta alcanzar el error de redondeo de la máquina. Adicionales a estos, se han realizado estudios sobre la solución de problemas de flujo en cavidades cuadradas usando diferentes metodologías de solución.

Los estudios de flujo en cavidades con tapa móvil se han utilizado en el diseño de sistemas de refrigeración, procesos de fabricación con flujos controlados. Alruwaele y Gajjar (2024) demostraron que el uso de nanofluidos, como agua con nanopartículas de óxido de aluminio, mejora la transferencia de calor al aumentar la concentración de partículas y disminuir el número de Richardson, reduciendo las regiones de recirculación en las esquinas. Bhuiyan *et al.* (2017) simularon el flujo y

la transferencia de calor en una cavidad bidimensional con fuentes y sumideros discretos, encontrando que la transferencia de calor disminuye con la reducción del número de Darcy. Estos estudios muestran que investigar sobre el flujo en cavidades con tapa móvil aporta conocimientos clave para mejorar la eficiencia de sistemas térmicos.

Tomando en cuenta diversas referencias bibliográficas que abordan el problema de flujo laminar en cavidades con tapa móvil, se aprecian diferentes metodologías de solución, como diferencias finitas, métodos de proyección y volúmenes finitos, y logran obtener soluciones precisas para este problema modelo. En este trabajo, se llevó a cabo un análisis detallado del problema *benchmark* del flujo en cavidades bidimensionales, utilizando el software *GiD Simulation* para el preprocesamiento y postprocesamiento e integrado con *Kratos Multiphysics* para el procesamiento, con el objetivo de evaluar su eficiencia y confiabilidad en la solución de este tipo de problemas.

Metodología

El método de estudio se basa en resolver el problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada cuya frontera superior tiene una velocidad constante. En esta sección, se plantea el problema presentando el modelo físico y matemático. Enseguida, se presenta la metodología de solución donde se muestran los software utilizados para la solución del problema así como la metodología que estos utilizan. Finalmente, se presenta la solución numérica al problema planteado.

Modelo físico

El dominio es una cavidad rectangular bidimensional de longitud unitaria por lado $H_x=H_y=1.0\text{ m}$. Esta cavidad está delimitada por tres paredes planas fijas, en las cuales la velocidad del flujo es cero, y una placa plana móvil en la frontera superior con una velocidad constante de 1 m/s en dirección del eje x . La **Figura 1** muestra el modelo físico del problema, donde u y v son las componentes del vector de velocidad en las direcciones x y y , respectivamente y p es la presión. Los parámetros del fluido se consideran tal que el número de Reynold (Re) es de 100, la densidad (ρ) es de 1.0 kg/m^3 y la viscosidad cinemática (ν) es de $0.1\text{ m}^2/\text{s}$.

Modelo matemático

El modelo matemático del problema se define a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, siendo las dos más importantes la ecuación de conservación de masa y la

ecuación de conservación de momentum. Para establecer el modelo matemático se toma en cuenta las siguientes simplificaciones:

- El problema se examina en estado estacionario,
- Existe flujo laminar bidimensional en las direcciones x y y ,
- El fluido es incompresible,
- Propiedades constantes (ρ , μ),
- Disipación viscosa despreciable.
- De esta manera, el modelo matemático en forma conservativa resultante se expresa en las Ecuaciones (1), (2) y (3).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u^2}{\partial x} + \rho \frac{\partial uv}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial uv}{\partial x} + \rho \frac{\partial v^2}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

Para resolver las ecuaciones gobernantes se especifican las condiciones de frontera, tendiendo condiciones de frontera tipo Dirichlet para las velocidades en todos los lados y de Neumann para la presión, como se expresa en las Ecuaciones (4), (5), (6) y (7).

$$\left. \begin{aligned} u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad x = 0 \\ u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad x = Hx \end{aligned} \right\} 0 \leq y \leq Hy, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u = 0.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad y = 0 \\ u = 1.0m/s \quad ; \quad v = 0.0m/s \quad y = Hy \end{aligned} \right\} 0 < x < Hx, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad x = Hx \end{aligned} \right\} 0 < y < Hy, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad y = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad y = Hy \end{aligned} \right\} 0 < x < Hx. \quad (7)$$

Método de solución

Para solucionar este problema se utiliza el software *GiD Simulation (GiD)* (Ribó *et al.*, 2022), acoplado con *Kratos Multiphysics (Kratos)* (Dadvand *et al.*, 2010; 2013; Mataix Ferrándiz *et al.*, 2022); ambos desarrollados por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). *Kratos* es un entorno de trabajo enfocado a la implementación de métodos numéricos para la resolución de problemas de ingeniería.

Así, las herramientas o procedimientos estándar como bases de datos, álgebra lineal o estructuras de búsqueda vienen como parte del núcleo de *Kratos* y están disponibles como bloques de construcción en el desarrollo de aplicaciones, las cuales se enfocan en la solución del problema de interés (Zorrilla, 2016); en este caso las ecuaciones de flujo, o ecuaciones de Navier-Stokes. Por su parte, *GiD* permite definir geometrías complejas, configurar condiciones de contorno, asignar propiedades al fluido, parámetros numéricos necesarios para resolver el problema y visualizar y procesar los resultados. El proceso de simulación con *Kratos* en *GiD Simulation* sigue una serie de pasos definidos.

Paso 1: Definición de la geometría.

En el software *GiD Simulation*, se inicia definiendo la geometría del dominio del problema, que en este caso corresponde a un cuadrado con lados de longitud $Hx=Hy=1.0$ m. Mediante las opciones de *Geometry > Line*, se crea un cuadrado con su esquina inferior izquierda en el punto (0,0) sobre el plano xy . Luego, mediante *Geometry > NURBS surface*, se define la superficie correspondiente al cuadrado. Esta etapa permite establecer la forma y tamaño del dominio donde se resolverán las ecuaciones de flujo.

Paso 2: Asignación de condiciones de frontera y propiedades del fluido.

Utilizando la interfaz de *Kratos* acoplada como problema

tipo con *GiD*, se especifican las condiciones de frontera para el problema de flujo en la cavidad. En este caso, las fronteras, derecha, izquierda e inferior tienen velocidades nulas en ambas direcciones $u=0.0$ m/s y $v=0.0$ m/s. La frontera superior tiene una velocidad constante de $u=1.0$ m/s y $v=0.0$ m/s, siendo u y v las componentes de la velocidad en dirección x y y , respectivamente. Además, se asignan las propiedades físicas del fluido, la densidad de 1.0 kg/m³, viscosidad dinámica de 0.001 kg/ms, como se muestra en la **Figura 2**.

Paso 3: Configuración de los parámetros numéricos y metodología de solución.

Se establecen los parámetros numéricos necesarios para la simulación. Esto incluye el criterio de convergencia, tomando en cuenta que el error relativo en el cambio de la velocidad es de 1×10^{-3} , el error absoluto en el cambio de la velocidad es de 1×10^{-5} , el error relativo en el cambio de la presión es de 1×10^{-3} y el error absoluto en el cambio de la presión es de 1×10^{-5} . El número máximo de iteraciones se consideró de 500, el tipo de resolvidor lineal fue mediante LU disperso, con pasos de tiempo de 0.01 s alcanzando el estado estacionario en 10 s.

Paso 4: Generación del mallado.

Una vez configurados los aspectos anteriores, se procede a generar un mallado estructurado del dominio. *GiD Simulation* proporciona opciones para personalizar el tamaño y tipo de malla. La generación de la malla se realiza mediante *Mesh > Element type > Quadrilateral* y se selecciona el dominio a mallar. Seguido, se genera el mallado estructurado a través de *Mesh > Structure > Surfaces > Assign number of divisions to surface lines*, asignando así el número de divisiones por lado. La **Figura 3** muestra el mallado de 40×40 , siendo un mallado estructurado conformado por cuadriláteros.

Paso 5: Ejecución de la simulación y visualización de resultados.

Finalmente, se ejecuta la simulación haciendo clic en el botón de inicio (o *Calculate > Calculate*). *Kratos Multiphysics* resuelve las ecuaciones de flujo en la cavidad y genera los resultados numéricos. Los resultados se pueden visualizar y analizar utilizando las herramientas de postprocesamiento de *GiD Simulation*, como gráficos y contornos.

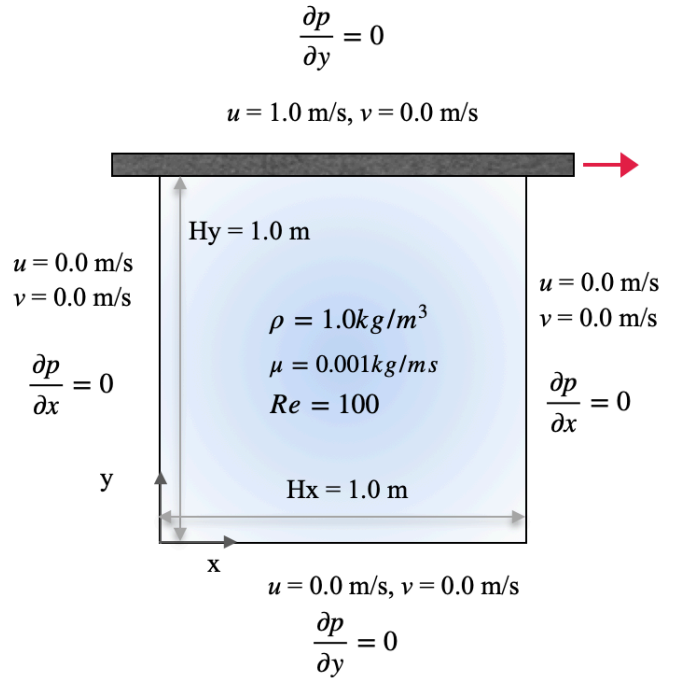


Figura 2. Modelo con condiciones de frontera y propiedades del fluido.

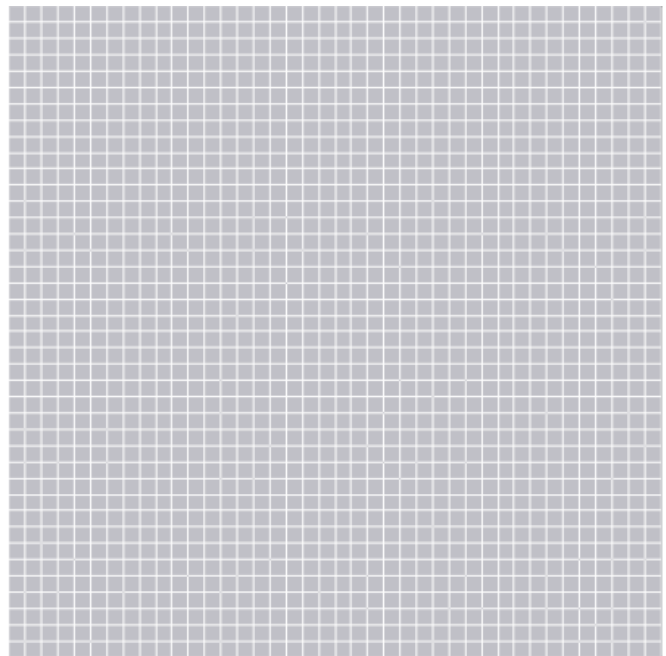


Figura 3. Mallado estructurado de 40×40 .

Resultados y discusión

La calidad de la malla juega un papel importante en la estabilidad y exactitud de cálculos numéricos. Algunas de las propiedades asociadas a la malla es la densidad, relación de aspecto, distribución de nodos, entre otros.

Para este análisis se realiza el estudio de independencia de malla considerando que el mallado es el adecuado cuando se tiene una diferencia porcentual de la suma de velocidades u en $x=0.5$ m menor del 0.3%, como se muestra en la **Tabla 1**. Se utiliza un mallado estructurado con cuadriláteros evaluando mallas de 20x20, 30x30, 40x40.

El análisis de independencia de malla resulta fundamental para determinar el tamaño óptimo del mallado. Después de analizar cualitativamente los resultados obtenidos para los diferentes mallados, se observó que, a partir de la malla de 40x40, los valores obtenidos en los resultados ya no variaban, con errores menores a la tolerancia, en comparación con los obtenidos con mallas más refinadas, como se observa en la **Figura 4**. Esto indica que utilizar una malla más fina no aportaría un aumento significativo en la precisión de los resultados y solo agregaría una mayor carga de tiempo computacional al análisis. Por lo tanto, se toma como base la malla de 40x40 para el análisis de resultados, asegurando así un equilibrio adecuado entre precisión y eficiencia computacional.

Al comparar los perfiles de velocidad obtenidos por la simulación con los datos presentados en la literatura, se observó una notable similitud en los perfiles de velocidad de u en $x=0.5$ m y de v en $y=0.5$ m, como se observa en la **Figura 5**.

Lo anterior sugiere que el uso del software *GiD Simulation* acoplado con *Kratos* ha sido capaz de capturar con precisión los patrones de flujo característicos de esta cavidad cuadrada bajo las condiciones de frontera específicas. Estos resultados validan la efectividad del enfoque de simulación implementado y brindan confianza en la interpretación de los datos. Además, se examinaron detalladamente otros aspectos del flujo, como la formación de vórtices. Se observó una clara formación de vórtices cerca de la tapa superior móvil, lo que concuerda con los resultados de la literatura (**Figuras 6 y 7**). Otro aspecto relevante es la visualización de líneas de corriente, que permitió comprender mejor la

estructura general del flujo en la cavidad. Las líneas de corriente revelaron patrones de recirculación y flujos de aceleración alrededor de los bordes y esquinas, lo cual es

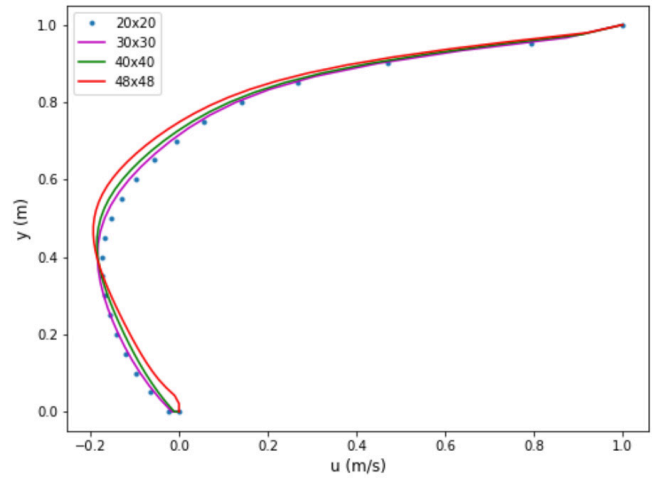


Figura 4. Perfil de velocidades u en $x=0.5$ m para diferentes mallados.

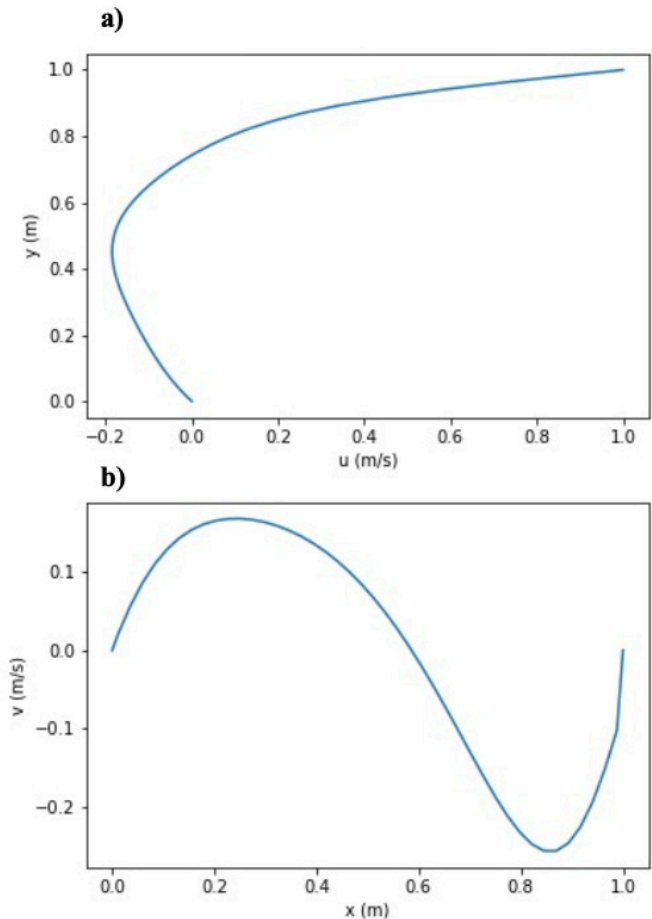


Figura 5. Perfil de velocidad a) u en $x=0.5$ m y b) v en $y=0.5$ m.

Tabla 1. Análisis de independencia de malla.

Malla	Velocidad u (m/s)	Diferencia porcentual
20x20	1.001639	
30x30	1.001674	0.003494
40x40	1.001414	0.025956

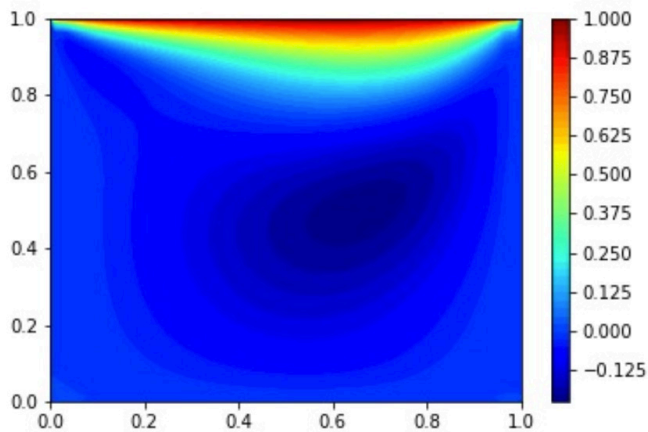


Figura 6. Contorno de velocidades u .

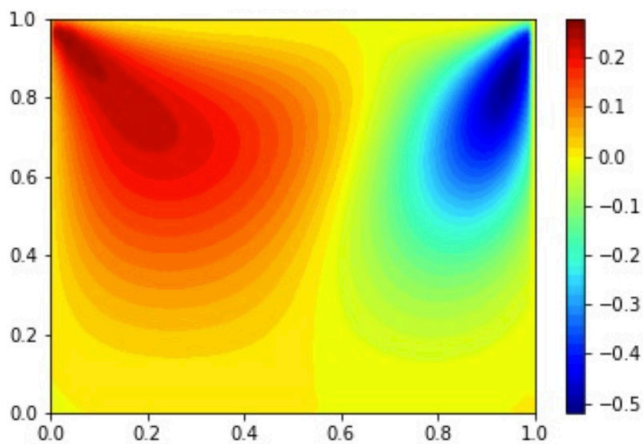


Figura 7. Contorno de velocidades v .

consistente con el comportamiento típico de este tipo de flujo confinado en cavidades.

En cuanto a la eficiencia computacional, el uso de un mallado de 40×40 demostró ser una buena elección, ya que proporcionó resultados precisos y se ejecutó en un tiempo razonable. Se realizaron pruebas con mallados más finos, pero la ganancia en precisión fue insignificante en comparación con el aumento significativo en tiempo de cálculo.

En resumen, la evaluación del flujo en la cavidad cuadrada con tapa superior móvil a velocidad constante arrojó resultados altamente satisfactorios. La elección de un mallado de 40×40 resultó ser adecuada, permitiendo obtener resultados confiables y eficientes. La similitud encontrada entre los perfiles de velocidad obtenidos y los presentados en la literatura respalda la precisión del modelo numérico utilizado. Estos resultados proporcionan una base sólida para el análisis y la

interpretación futura del flujo en condiciones similares.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado la eficiencia y confiabilidad del software *GiD Simulation* en la resolución del problema de flujo laminar bidimensional en una cavidad. La utilización de *GiD* para el preprocesamiento y postprocesamiento de las simulaciones numéricas permitió establecer la geometría del problema de manera precisa y sencilla. Además, la integración de *GiD* con el software *Kratos Multiphysics* para el procesamiento mediante elementos finitos brindó una solución robusta y precisa para el análisis del flujo en la cavidad. Algunas de las ventajas que se tienen al usar este software son:

- Cuenta con una interfaz gráfica fácil e intuitiva de usar que facilita la creación de modelos y la visualización de resultados.
- Ofrece diversos métodos de solución numéricos para el análisis de fluidos.
- Fácil visualización de resultados gracias al esquema de postprocesamiento.
- Además de análisis de fluidos, *GiD Simulation* puede resolver problemas de una variedad de disciplinas de simulación, como análisis estructural, transferencia de calor, entre otras.

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los datos presentados en la literatura, lo que valida la precisión del enfoque utilizado. Esta combinación de herramientas proporciona una solución eficiente, confiable y precisa para el estudio de fenómenos de flujo en diversas aplicaciones de ciencias e ingeniería.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por su apoyo invaluable a través de la beca de posgrado que nos ha sido otorgada. Esta beca ha sido una parte fundamental en nuestros estudios de posgrado, brindándonos la oportunidad de continuar con nuestra formación académica y avanzar en nuestra carrera profesional. Asimismo, agradecemos el apoyo y financiamiento de CIMNE a través de la red de Aulas CIMNE y otorgarnos la licencia profesional del software *GiD Simulation*. Esta licencia nos permitió acceder a

todas las características y funcionalidades avanzadas que ofrece, lo que impulsó las capacidades de modelado y simulación.

Referencias

- Alruwaele WHR, Gajjar JSB (2024). Lid-driven cavity flow containing a nanofluid. *Dynamics* 4:671-697.
- Bhuiyan AH, Alam MS, Alim MA (2017). Numerical simulation of heat transfer and fluid flow with lid-driven square cavity and discrete source-sink pairs. *AIP Conference Proceedings* 1851(1):020044.
- Botella O, Peyret R (1998). Benchmark spectral results on the lid-driven cavity flow. *Computers & Fluids* 27(4):421-433.
- Bruneau C, Saad M (2006). The 2D lid-driven cavity problem revisited. *Computers & Fluids* 35:326-348.
- Chorin AJ (1969). On the convergence of discrete approximations to the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation* 23:341-353.
- Coll A, Ribó R, Pasenau M, Escolano E, Perez JS, Melendo A, Monros A, Gárate J (2020). “GiD v.14 Reference Manual [pdf]”, www.gidsimulation.com [consultado el 25 de mayo de 2020].
- Dadvand P, Rossi R, Oñate E (2010). An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications. *Arch. Computat. Methods Eng.* 17:253-297.
- Dadvand P, Rossi R, Gil M, Martorell X, Cotela J, Juanpere E, Idelsohn S, Oñate E (2013). Migration of a generic multi-physics framework to HPC environments. *Computers & Fluids* 80:301-309.
- Kawaguti M (1961). Numerical solution of the Navier-Stokes equations for the flow in a two-dimensional cavity. *Journal of the Physical Society* 16, 2301-2315.
- LeVeque R (2007). Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: steady-state and time-dependent problems. Society for Industrial & Applied Mathematics.
- Marchi C, Roberta S, Araki L (2009). The lid-driven square cavity flow: Numerical solution with a 1024 x 1024 Grid. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 31(3):186-198.
- Ribó R, Pasenau M, Escolano E, Coll A, Melendo A, Monros A, Gárate J, Peyrau M (2022). GiD reference manual. Technical 474 report, CIMNE, Barcelona, España.
- Mataix Ferrándiz V, Bucher P, Zorrilla R *et al.* (2022). Kratos Multiphysics/Kratos: Release 9.2 (v9.2). Zenodo.
- Versteeg HK, Malalasekera W (2007). An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. Prentice-Hall.
- Zorrilla Martínez R (2016). FSI procedures for civil engineering applications. Universitat Politècnica de Catalunya: Tesis de Maestría.