

Enseñanza de Temas Avanzados de Mecánica de Fluidos usando Dinámica de Fluidos Computacional

Blas Zamora y Antonio S. Kaiser

Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos,
Dr. Fleming s/n, 30202 Cartagena-España (e-mail: blas.zamora@upct.es, antonio.kaiser@upct.es)

Resumen

Se presenta la experiencia obtenida en la docencia de la asignatura “Ampliación de Mecánica de Fluidos” en la carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena-España, usando métodos numéricos como elemento motivador para los alumnos. El principal objetivo del plan de estudios es que el alumno adquiera distintos conocimientos teóricos, numéricos y experimentales en algunos temas avanzados de Mecánica de Fluidos. Con el objeto de obtener una mejora general en la calidad de la docencia, se emplea un método pedagógico mixto basado en la utilización de herramientas de simulación numérica, así como en el sistema de aprendizaje de resolución de problemas. Como resultado, se consigue aumentar el interés, la motivación y el nivel de adquisición de los conocimientos por parte del alumno. Puede concluirse que el método es eficiente, consiguiendo aumentar el grado de satisfacción del alumnado.

Palabras clave: método de enseñanza, solución de problemas, mecánica de fluidos computacional

Teaching Experience on Selected Topics of Fluid Mechanics using Computational Fluid Dynamics

Abstract

The experience gained in a course on Selected Topics of Fluid Mechanics course for the Industrial Engineer degree, Polytechnic University of Cartagena-Spain employing numerical techniques as a motivating element for students. The main objectives of the course are to provide an understanding of the analytical methods employed for selected topics in Fluid Mechanics and to bring a familiarity with some experimental and numerical techniques. To improve teaching-learning a pedagogical method based on Problem-Solving Based Learning is applied, using Computational Fluid Dynamics. As a result, the motivation and the theoretical and technical abilities of the students have been improved. It can be concluded that now the method is efficient and has increase the satisfaction degree of the students.

Keywords: teaching method, problem-solving, computational fluid dynamics

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la Mecánica de Fluidos en Ingeniería ha merecido una atención limitada hasta el momento. No obstante, pueden encontrarse interesantes trabajos en la literatura científica, como los de Gad-el-Hak (1998), Cimbala (2006) y Campo et al. (2008), entre otros. La aplicación de la simulación numérica de los flujos de fluidos y de transferencia de calor (Computational Fluid Dynamics, CFD) en la enseñanza universitaria ha sido estudiada por ejemplo por Navaz et al. (2002) y Husain et al. (2005), principalmente para flujo compresible alrededor de perfiles aeronáuticos, y de forma más general por Hung et al. (2005) y Stern et al. (2004, 2006). Un interesante ejemplo de la utilización de laboratorios avanzados en la enseñanza ha sido descrito por Schwartz y Dunkin (2000). El impacto sobre el aprendizaje de los alumnos de la visualización de flujos de fluidos con ayuda de programas informáticos en el ordenador ha sido examinado por Gynnild et al. (2007).

El empleo por un lado de técnicas de CFD y por el otro de laboratorios de investigación para enseñar ciertos temas avanzados de flujos de fluidos y transmisión de calor se muestra especialmente interesante para mejorar el aprendizaje de los alumnos de grado y postgrado en Ingeniería. Centrando la atención en la materia en estudio, y en el contexto de la titulación de Ingeniería Industrial, los conocimientos básicos y aplicados sobre Mecánica de Fluidos se han impartido en los primeros años de la titulación, en asignaturas denominadas “Mecánica de Fluidos General”, y “Mecánica de Fluidos Aplicada” (Crespo, 2006). Las materias relacionadas con Hidráulica se imparten en los últimos años de la titulación, con un carácter muy aplicado y orientado al desempeño profesional. En estas condiciones, ciertos temas avanzados de Mecánica de Fluidos quedan ubicados en la asignatura optativa “Ampliación de Mecánica de Fluidos” (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, España), en un curso intermedio (tercer curso de un total de cinco). Esta ordenación de materias, impuesta por el Plan de Estudios en vigor, resulta contradictoria por el hecho de situar materias avanzadas, en principio destinadas a la profundización e investigación, en una situación meridiana de la trayectoria curricular del alumno. Quizá por esta razón, el número de alumnos interesados (y matriculados) en la asignatura en los cursos anteriores ha llegado a ser muy reducido. Por otra parte, se apreció un grado de consecución de los objetivos docentes establecidos poco satisfactorio.

En estas condiciones, se consideró necesario un replanteamiento de la metodología docente empleada en la asignatura. El perfil del alumno matriculado suele ser el de una persona interesada en Mecánica de Fluidos, que ha superado las materias básicas y aplicadas impartidas en segundo curso de la titulación, y que espera obtener de esta asignatura optativa los conocimientos y las habilidades necesarias para profundizar en una materia en la que los Ingenieros Industriales deben emplearse a menudo. A partir de encuestas y de conversaciones particulares con los alumnos, se dedujo que una de las motivaciones principales consistía precisamente en adquirir un cierto nivel de conocimientos, distintivo y diferenciador en el caso de poder optar a desarrollos profesionales vinculados con investigación, desarrollo e innovación.

Con las premisas anteriores, el nuevo tratamiento de la asignatura comenzó a plantearse en el curso 2006/07, desarrollándose completamente durante el curso 2007/08. La experiencia adquirida, en un momento en el que el sistema universitario español comienza a adaptarse a las directrices del Espacio Europeo de Educación Superior (fijadas por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, en el Real Decreto 1393/2007), puede servir como referencia en la docencia de materias avanzadas que deban impartirse en el nuevo sistema de titulaciones para la consecución del grado, e incluso en el postgrado o en los master. Como se verá más adelante, se confiere un especial protagonismo a las herramientas de simulación numérica como instrumentos de aprendizaje de la materia por parte del alumno (véase, por ejemplo, el texto de Çengel y Cimbala (2006), en el que se propone un destacable conjunto de ejemplos numéricos).

Los objetivos de la asignatura optativa bajo el presente estudio “Ampliación de Mecánica de Fluidos”, que aparecen oficialmente en el Plan de Estudios actual, son los siguientes: “dar a conocer al alumno distintos temas que no han podido ser recogidos en asignaturas anteriores de Mecánica de Fluidos, y que tienen un indudable interés en Ingeniería, apoyándose para un mejor entendimiento en un código de simulación numérica, como por ejemplo Fluent. Al término de la asignatura, el alumno

debe ser capaz de analizar e intentar resolver cualquier problema fluidomecánico de Ingeniería”. Los objetivos que se acaban de mencionar son precisamente los de este trabajo. Además, se añade el objetivo de mejora del grado de satisfacción del alumno como consecuencia de la implantación de una nueva metodología docente.

METODOLOGÍA UTILIZADA

Se intentó buscar la motivación del alumno por el estudio y el entendimiento de ciertos temas avanzados de Mecánica de Fluidos. Se indican a continuación los bloques en los que se dividió la materia, las lecciones en las que se subdivide cada bloque, la estrategia seguida para la motivación del alumnado, y los medios materiales disponibles en cada caso. A continuación, se aborda la metodología seguida en las experiencias de laboratorio, para seguir con la correspondiente a las simulaciones numéricas, y por último se exponen los criterios adoptados para la evaluación del alumnado.

Selección de las materias de interés

Parte 1 del Temario: Técnicas experimentales y numéricas

Lecciones: Medidas de magnitudes escalares. Medida de la velocidad, el caudal y el gasto másico. Técnicas de visualización. Introducción a la Mecánica de Fluidos Computacional.

Estrategia: La Mecánica de Fluidos moderna se asienta sobre tres grandes métodos de análisis: el teórico-analítico, el teórico-numérico y el experimental. Tendiendo en cuenta que en los años pasados los principales avances han venido como consecuencia de los desarrollos numéricos y experimentales, resulta muy interesante conocer los dos grandes campos de la materia a los que se les presta menos atención en asignaturas de carácter más básico: el campo experimental y el campo numérico. Con objeto de acercar los conocimientos impartidos a aquellos que probablemente exigirían las empresas dispuestas a contratar a un ingeniero con conocimientos avanzados de fluidomecánica, las experiencias deben impartirse en laboratorios de investigación, o con códigos de simulación numérica comerciales de alto nivel y elevada implantación.

Medios materiales: Laboratorios de investigación del Área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Códigos de simulación numérica Fluent (Fluent Users Guide, 2006) y Phoenix (Ludwing et al., 2005). Ambos códigos utilizan un procedimiento de discretización de volúmenes finitos. Cabe destacar que el método de volúmenes finitos, impuesto actualmente en la CFD, resulta especialmente apropiado para el aprendizaje del alumno, puesto que las ecuaciones generales de conservación de la Mecánica de Fluidos se aplican sobre cada uno de los volúmenes finitos (volúmenes de control) en los que se divide el dominio. Las experiencias de simulación numérica se planificaron y desarrollaron en su mayor parte en Fluent. Desde un punto de vista docente, Fluent presenta algunas ventajas sobre Phoenix: posee posibilidades de construcción de geometrías complejas y de mallado más ágiles; su entorno de ventanas se presta a una mayor interacción con el usuario; además, el postproceso de resultados ofrece mayores posibilidades, con facilidades para calcular variables promediadas, coeficientes de pérdida de presión o de ganancia de calor (números de Nusselt, Stanton), que pueden compararse de forma directa con los valores obtenidos a partir de las “fórmulas” clásicas. No obstante, el código Phoenix se ofrece como alternativa, y también permite comparar modos de trabajo y operación con dos códigos distintos.

Parte 2 del Temario: Flujo compresible y ondas de choque

Lecciones: Flujo compresible. Superficies de discontinuidad. Ondas de choque en gases perfectos.

Estrategia: Esta materia, tradicionalmente vinculada a Ingeniería Aeronáutica, se presenta como la necesaria para que un Ingeniero Industrial pueda desarrollar completamente sus competencias profesionales. Más adelante se apunta la vinculación de estos temas con la ciencia de la Aeronáutica, probablemente una de las de más empuje del siglo pasado. Para mejorar la comprensión de las lecciones, se desarrollan ejemplos de simulación numérica con el código Fluent. Los resultados numéricos obtenidos se comparan con los postulados teóricos.

Medios materiales: Códigos de simulación numérica Fluent y Phoenics.

Parte 3 del Temario: Capa límite

Lecciones: Introducción a la teoría de la capa límite. Capa límite laminar: soluciones exactas y métodos integrales. Capa límite térmica laminar. Capa límite turbulenta.

Estrategia: Para incentivar el estudio y el aprendizaje de estas lecciones por parte del alumno, se desarrolló una estrategia consistente en relacionar la historia de la Mecánica de Fluidos moderna con la Teoría de la Capa Límite. Puede decirse que el año 1904, con la publicación del artículo de Ludwig Prandtl (1875-1953) en el que se estableció dicha teoría, marcó el inicio de la Mecánica de Fluidos en la forma en la que la conocemos e impartimos actualmente. La discusión de los avances conseguidos en Mecánica de Fluidos a lo largo del siglo XX debe llevar al alumno a comprender la importancia por un lado de los métodos experimentales y de los métodos numéricos, y por el otro, de la Teoría de la Capa Límite y de la ciencia de la Aeronáutica. Los padres de la Mecánica de Fluidos moderna (véase por ejemplo el texto de Kundu, 1990), Ludwig Prandtl (1875-1953), Geoffrey Taylor (1886-1975) y Theodore von Kármán (1881-1975) estudiaron, entre otras muchas materias, problemas de capa límite (laminar, turbulenta, estabilidad), y de flujo compresible (ondas de choque, abanicos de expansión, teoría del ala de avión). Esta estrategia relacional justifica la inclusión en el temario de la asignatura de los bloques correspondientes a Flujo Compresible y Capa Límite. Como se ha apuntado antes, para mejorar el aprendizaje de las materias planteadas, se desarrollan ejemplos de simulación numérica con el código Fluent. Los resultados numéricos obtenidos se comparan con las expresiones teóricas y teórico-experimentales clásicas de la Teoría de la Capa Límite. Precisamente en este punto se sigue otra estrategia relacional: los modelos de turbulencia de dos ecuaciones de transporte tales como el $k-\epsilon$, o el $k-\omega$, establecidos para la simulación numérica, y muy utilizados para el estudio de muchos flujos de aplicación directa en ingeniería, sirven para asentar los conceptos fundamentales de la capa límite turbulenta.

Medios materiales: Códigos de simulación numérica Fluent y Phoenics.

Metodología de las experiencias de laboratorio

Como se ha indicado anteriormente, las instalaciones experimentales de laboratorio en las que los alumnos desarrollan prácticas docentes se han utilizado en tareas de investigación del Área de Mecánica de Fluidos. En cada una de las cuatro instalaciones experimentales se explica el interés científico de los ensayos experimentales que justifican el trabajo sobre la instalación, la vinculación del interés científico con las aplicaciones en ingeniería en general, y en ingeniería industrial en particular, y por último la relación de las experiencias en el laboratorio con los contenidos del programa de la asignatura. Lógicamente, se hizo necesaria la participación de varios profesores del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, puesto que cada uno de ellos se encontraba familiarizado con una determinada instalación experimental.

Una vez completada la formación sobre la instalación experimental, el alumno debe entregar un informe individual en el que se respondan una serie de cuestiones. Esto se explica a continuación, junto con una breve descripción de cada equipo.

Experiencia 1) Instalación experimental Banco de Flujo Compresible. Esta instalación experimental consta fundamentalmente de un sistema de generación y tratamiento de aire comprimido con el objeto de generar una corriente compresible de aire para estudiar el comportamiento del flujo en bifurcaciones y uniones en conductos como los que pueden aparecer en sistemas de admisión y de escape de los motores de combustión interna alternativos. Se ha utilizado en tareas de investigación del Área de Mecánica de Fluidos. Las cuestiones a las que debe responder el alumno consisten en la descripción del objetivo principal y del funcionamiento de la instalación, en la justificación de la necesidad de medir variables de interés tales como la temperatura y la presión del flujo, en el cálculo aproximado de los números de Mach que pueden alcanzarse en distintos puntos de la instalación, y finalmente en el estudio de los factores que pueden influir en una bifurcación tipo T.

Experiencia 2) Instalación experimental Banco de Ensayos Térmicos. La instalación de interés consiste en un banco que permite la realización de ensayos de transferencia de calor sobre tuberías de distintas formas y diámetros (se ensayan por ejemplo tubos lisos y tubos deformados mecánicamente, tanto en régimen laminar como en régimen turbulento), bajo condiciones de flujo de calor uniforme transmitido a las paredes de las conducciones. Las cuestiones a las que debe responder el alumno son la descripción del objetivo principal y del funcionamiento de la instalación, la explicación del procedimiento seguido para calcular el factor de pérdida de carga de Fanning, la descripción de las sondas utilizadas para la medida de la temperatura, así como de su principio de funcionamiento, y finalmente, llevar a cabo una reflexión sobre la longitud de desarrollo del flujo laminar (dependencia del número de Reynolds, y modo de determinarla experimentalmente).

Experiencia 3) Instalación experimental Sistema de Enfriamiento por Hielo Líquido. La instalación de interés está destinada a la producción de hielo líquido con una textura que lo haga capaz de transitar por las conducciones de sistemas que deban estar en frío, como en la industria agroalimentaria. Consta básicamente del sistema frigorífico necesario para bajar la temperatura del agua de entrada, y del sistema de producción del hielo propiamente dicho. El hielo producido se almacena y se hace circular por un circuito para medir sus características y por tanto poder optimizar el proceso. El alumno debe responder a las siguientes cuestiones: descripción del objetivo principal y del funcionamiento de la instalación, justificación del interés del equipo y de sus aplicaciones en la industria, y relación de los distintos factores que afectan al proceso, tales como la concentración de hielo.

Experiencia 4) Instalación experimental Túnel de Viento. El equipo consiste en un túnel de aspiración de flujo subsónico que incorpora un generador de humos para la visualización del flujo y un triple sistema para la medida de las variables del flujo: anemómetro de hilo caliente, tubo de Pitot, y sistema de manómetros diferenciales de columna inclinada. Aunque la instalación ha servido para distintas investigaciones, es quizás la más orientada para la docencia “tradicional”. Desde un punto de vista didáctico, la instalación ofrece indudables ventajas, lo que quedó demostrado durante las experiencias de los alumnos sobre el equipo. El alumno debe responder a las siguientes cuestiones: descripción del objetivo principal y del funcionamiento de la instalación, justificación de la forma de los elementos que componen el conducto principal por el que transita el aire, y descripción de los principios de funcionamiento de los sistemas de medida empleados, anemómetro de hilo caliente, manómetro diferencial inclinado y tubo de Pitot.

Metodología de las experiencias de simulación numérica

Las experiencias en simulación numérica de distintos problemas de Mecánica de Fluidos juegan un papel fundamental en la asignatura. El objetivo consistió en aprovechar la relativa facilidad del trabajo con códigos comerciales de simulación numérica para estudiar y comprender distintos problemas clásicos de Mecánica de Fluidos (pueden consultarse los principios de la llamada Computational Fluid Dynamics, CFD, en el texto de Anderson, 1995). Se llevaron a cabo distintos ensayos de realización de problemas didácticos con los códigos comerciales Phoenix y Fluent. Como se ha apuntado antes, se considera que el código Fluent presenta un entorno más amigable, con una mayor facilidad de acceder a los distintos modelos implementados en el código sin poseer un conocimiento previo profundo (véase el trabajo de Husain et al., 2005). No se trata entonces de realizar un número elevado de simulaciones con el código que permita adquirir una gran experiencia en su manejo. Por ejemplo, el código Fluent dispone de muchos “Tutoriales” con los que, de una forma guiada, un alumno puede realizar distintas simulaciones con un esfuerzo relativamente bajo; sin embargo, en nuestra experiencia con la asignatura, podría decirse que no resulta conveniente realizar más de dos o tres tutoriales, para una dedicación y un tiempo limitados.

De esta manera, resultó muy satisfactorio seguir una metodología basada en plantear distintos problemas, de forma que puede preverse la forma de la solución final. La exploración previa de las distintas posibilidades que ofrece el código debe conducir a una comprensión bastante ajustada del problema de interés con anterioridad al inicio de la propia simulación numérica delante de la pantalla del ordenador. La obtención de resultados que pueden compararse con ciertas soluciones analíticas particulares permite comparar el proceso de solución numérica con el planteamiento analítico clásico

planteado en la parte “teórica” de la asignatura. Por otro lado, las experiencias planteadas no son “cerradas”, es decir, se plantean al alumno distintas posibilidades de simulación, como por ejemplo: mallado estructurado o no estructurado; afinamientos locales de la malla (junto a las paredes y secciones de entrada y salida); distintos tamaños del dominio computacional (regiones de entrada, regiones de salida), y distintas posibilidades de simulación, como por ejemplo diferentes modelos de turbulencia en los casos de flujo turbulento.

Los problemas planteados se vinculan directamente con los temas teóricos de la asignatura, e incluso con las instalaciones experimentales, como se verá más adelante. Este método pedagógico deviene en proponer al alumno los trabajos finales descritos después (Alternativas 1 a 4), planteados como continuación y ampliación de la experiencia teórica, experimental y numérica obtenida.

A la vista de lo anterior, puede deducirse que se ha seguido la filosofía del modelo PBL, esto es, ‘Problem-solving Based Learning’ o aprendizaje basado en resolución de problemas (Mills y Treagust, 2003). Como es conocido, el método PBL requiere de un cierto grado de disciplina y responsabilidad por parte del alumnado (Sáez y Monsalve, 2008). En este sentido, la experiencia ha sido realmente satisfactoria, por un lado por el hecho de seguir un sistema de enseñanza mixto, es decir, aprovechando las ventajas el método PBL, pero con un especial seguimiento del estudio personal de cada alumno, y por el otro, gracias al número de alumnos relativamente reducido.

Experiencias programadas de simulación numérica. Son las siguientes:

Aprendizaje básico del código Fluent con ejemplos de simulaciones numéricas sencillas

Flujo en una tobera convergente-divergente

Ejemplo de onda de choque

Ejemplos de capa límite laminar. Flujo alrededor de cuerpos.

Ejemplos de capa límite laminar. Convección natural y convección forzada.

Ejemplos de capa límite turbulenta. Modelos de turbulencia.

Metodología empleada para la evaluación del alumno

Lógicamente, los trabajos propuestos varían de un curso académico a otro. Los que se relacionan a continuación son representativos de los propuestos durante el curso 2007/08.

Propuesta 1. Flujo compresible en el interior de una tobera convergente divergente, para distintos valores de la presión impuesta en la salida. Objetivo: caracterización del flujo en el interior de una tobera bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Puntos clave: ecuaciones que se resuelven; modelo de turbulencia a elegir; parámetros adimensionales relevantes; condiciones de contorno que se imponen.

Propuesta 2. Flujos laminar y turbulento en un tubo de sección circular, obteniendo flujo plenamente desarrollado, para distintos valores del número de Reynolds. Objetivo: determinación del coeficiente de pérdida de presión λ en régimen laminar y en régimen turbulento, en función del número de Reynolds, y comparación con soluciones analíticas para régimen laminar, con el diagrama de Moody, y la ecuación de Darcy-Colebrook, en régimen turbulento. Determinación de la influencia de y^+ en los resultados obtenidos en régimen turbulento. Puntos clave: ecuaciones que se resuelven en flujo laminar y en flujo turbulento; modelo de turbulencia $k-\varepsilon$; parámetros adimensionales relevantes; condiciones de contorno que se imponen en flujo laminar y en flujo turbulento; breve descripción de la ley de la pared y de las variables adimensionales y^+ , u^+ .

Propuesta 3: Flujos laminar y turbulento en un tubo liso de sección circular con un ensanchamiento brusco, para distintos valores del número de Reynolds, y con diferentes relaciones de aspecto geométricas. Objetivo: determinación del coeficiente de pérdida secundaria o localizada en régimen laminar y en régimen turbulento, en función del número de Reynolds, para distintos valores de la relación de diámetros y de la relación de aspecto longitud de tubo recto/diámetro. Puntos clave: ecuaciones que se resuelven en flujo laminar y en flujo turbulento; modelo de turbulencia $k-\varepsilon$; parámetros adimensionales relevantes; condiciones de contorno que se imponen en flujo laminar y en flujo turbulento.

Propuesta 4. Transferencia de calor por convección natural en un canal vertical isoterma, para distintos valores del número de Rayleigh y de la relación de aspecto del canal. Objetivo: caracterización del flujo en el interior del canal bajo diferentes condiciones de funcionamiento y determinación de la transferencia de calor (a través del número de Nusselt) en función del número de Rayleigh. Puntos clave: ecuaciones que se resuelven; aproximación de Boussinesq y variación de propiedades del aire; parámetros adimensionales relevantes; condiciones de contorno que se imponen.

Criterios de evaluación. Son los siguientes:

- A) Asistencia y aprovechamiento individual de las sesiones prácticas experimentales y numéricas, que supone un 10 %.
- B) Valoración de los informes individuales sobre las sesiones experimentales de laboratorio (20 %).
- C) Simulación numérica de problemas de Mecánica de Fluidos, con un informe detallado en el que consten los modelos matemático y numérico empleados y otros detalles computacionales, y una exposición pública (30 minutos) de los resultados, en la que se incluye una discusión de lo que se ha expuesto con los profesores y los compañeros de clase (70 %).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A modo ilustrativo, se muestran a continuación algunos de los resultados obtenidos a través de los códigos Phoenics y Fluent, en el caso de la Propuesta 4 del apartado anterior (el problema está definido de forma detallada en Hernández et al., 1994, por ejemplo). Puede observarse en las Figs. 1, 2 y 3 el valor pedagógico de este ejemplo: se trata de un caso de acoplamiento de los campos de velocidad con los campos de temperatura, en el que el movimiento se induce por las fuerzas de flotación motivadas por cambios de temperatura. El número adimensional que caracteriza básicamente el problema es el de Rayleigh (Ra), al que puede llegarse como $Ra = (Gr)(Pr)$, siendo Gr el número de Grashof, relación entre las fuerzas de flotación que inducen el flujo y las fuerzas viscosas que se oponen al desarrollo de la corriente, y Pr el número de Prandtl, que caracteriza al fluido de trabajo. La dependencia del problema de la relación de dimensiones entre la separación de las placas b y la longitud de las mismas L puede tenerse en cuenta definiendo el número de Rayleigh modificado como $Ra^* = Ra (b/L)$.

Los resultados obtenidos para distintos regímenes de funcionamiento dados por el valor de Ra^* permiten al alumno comparar con la solución asintótica de Elenbaas para valores de Ra^* suficientemente pequeños, cuando aparece un flujo plenamente desarrollado, sin gradiente de propiedades en la dirección del movimiento y con un perfil de velocidad transversal similar al dado por la solución de Hagen-Poiseuille (Crespo, 2006). Se comprueba entonces numéricamente la solución analítica para el número de Nusselt basado en la diferencia de temperatura característica ($T_w - T_\infty$), dada por $Nu = Ra^*/24$. A medida que aumenta Ra^* , se va originando una capa límite térmica claramente definida, como puede verse en la Fig. 1b, para los casos $Ra^* = 10^3$, 10^4 y 10^5 , que corresponden a los de mayor aplicación práctica de entre los planteados. De esta manera, para valores de Ra^* suficientemente altos, el régimen de funcionamiento cambia a capa límite, y las distribuciones de temperatura y los perfiles de velocidad toman el aspecto clásico que Phoenics reproduce perfectamente en la Fig. 1b y Fluent en la Fig. 2 (para $Ra^* = 10^5$, en este caso), respectivamente. Los resultados obtenidos con ambos códigos han sido prácticamente idénticos.

En la Fig. 2 puede observarse que por la condición de adherencia, la velocidad es nula junto a las paredes, luego el fluido se acelera a una distancia relativamente pequeña de la pared como consecuencia de las fuerzas de flotación inducidas por la alta temperatura de la pared, alcanzándose un cierto valor máximo, y posteriormente disminuye en la zona central, donde la mayor parte del fluido permanece frío. El flujo másico inducido en las proximidades de las paredes es tan alto que en ocasiones puede aparecer una zona de flujo hacia abajo desde la sección de salida del canal, supuesta a la presión ambiente, para cumplirse la ecuación de continuidad (esto produce una pequeña variación en las líneas isotermas adjuntas a las paredes, como puede verse en la parte superior de la Fig. 1b, para $Ra^* = 10^5$).

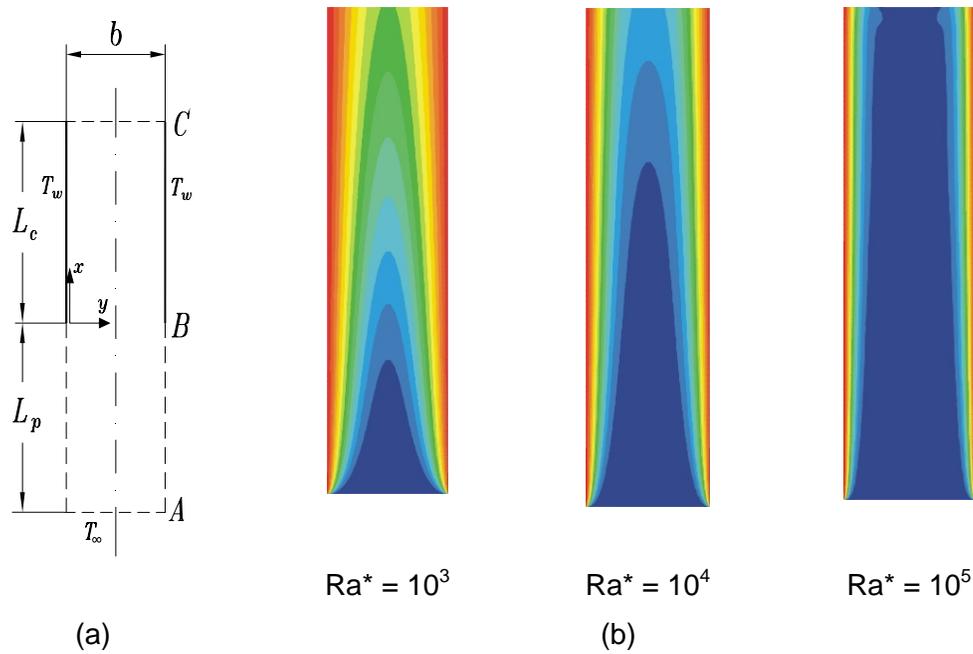


Fig. 1: Una de las propuestas de trabajos de simulación numérica: flujo inducido por convección natural en un canal vertical formado por dos placas calientes isoterma. a) Esquema de un canal con indicación de las condiciones de contorno y una región computacional de entrada. b) Distribución de temperatura obtenida con el código Phoenics para distintos valores del número de Rayleigh modificado Ra^* , relación de aspecto $b/L = 0,1$ y $L_p = 0$.

Como se ha indicado anteriormente, la mayoría de experiencias de simulación numérica con el alumnado se han llevado a cabo utilizando Fluent. Las facilidades del código permiten obtener parámetros adimensionales empleados en ingeniería como el número de Nusselt, para evaluar la eficiencia del proceso de transferencia de calor entre las placas calientes a T_w y el fluido frío a T_∞ , así como otros valores dimensionales globales obtenidos por integración, tales como el flujo másico o la velocidad transversal media. En la Fig. 3 se muestra la variación local de dicho número adimensional junto a una de las paredes calientes, para el caso correspondiente a $Ra^* = 10^5$, construido a partir de una longitud del canal $L = 1$ m, una separación entre placas $b = 0,1$ m, y un salto térmico de $T_w - T_\infty = 8,78$ K. El valor del número de Nusselt medio resultó de 9,901, valor muy satisfactorio si se compara con las correlaciones experimentales encontradas en la bibliografía. Puesto que el espesor de la capa límite térmica es reducido, se produce una disminución drástica del valor de Nu_x junto a la pared desde el valor máximo alcanzado junto a ella, manteniéndose prácticamente constante en el resto de la sección transversal.

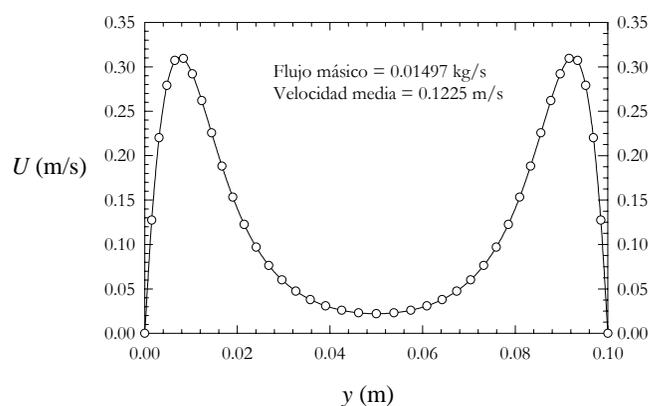


Fig. 2: Perfil de velocidad clásico de capa límite térmica en la sección de salida del canal, para el caso de la Fig. 1, con $Ra^* = 10^5$, obtenido con Fluent. La velocidad en dirección longitudinal es U , y la coordenada transversal al canal, y .

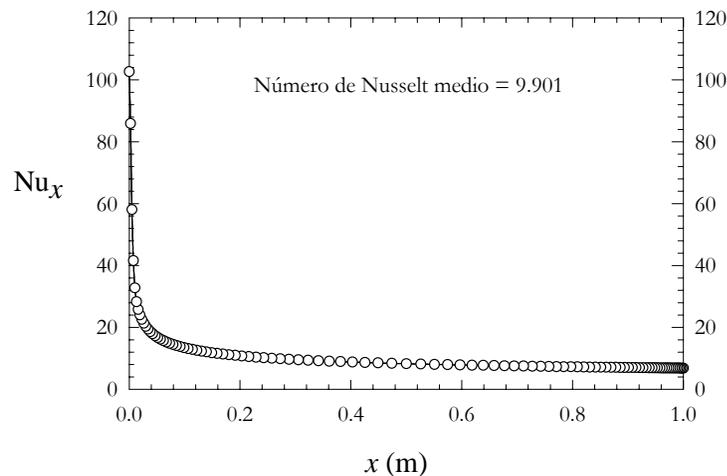


Fig. 3: Distribución del número de Nusselt local Nu_x a lo largo de la pared caliente (coordenada longitudinal x), obtenida con Fluent. Caso correspondiente a la Fig. 2, con $Ra^* = 10^5$.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la utilización de herramientas numéricas de simulación de flujos de fluidos contribuye a aumentar el interés y la motivación del alumno que cursa materias avanzadas de Mecánica de Fluidos, mejorando claramente su aprendizaje. Se ha empleado un método pedagógico mixto basado en la técnica del aprendizaje mediante la resolución de distintos problemas (en este caso, resueltos numéricamente sobre todo a través del código de volúmenes finitos Fluent, empleando las técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional). La metodología empleada, que también ha contado con experiencias en los laboratorios de investigación del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, se ha mostrado particularmente eficiente. A raíz del nuevo sistema establecido en los dos últimos cursos académicos, 2006/07 y 2007/08, el grado de satisfacción del alumnado a través de las encuestas anónimas para evaluar la calidad de la docencia ha sido muy alto. La calificación media conseguida por el alumnado se ha elevado a 8,5 sobre 10 puntos.

REFERENCIAS

Anderson, J.D.; *Computational Fluid Dynamics (the basics with applications)*, McGraw-Hill, New York, USA (1995).

Campo, A., G.A. Ledezma e I. Carvajal; *Prediction of friction factors and axial descent of convective coefficients in laminar flows through internally finned tubes by way of solving two-dimensional heat conduction equations*, International Journal of Mechanical Engineering Education: 36(1), 48-57 (2008).

Çengel, Y.A. y J.M. Cimbala; *Mecánica de Fluidos (Fundamentos y Aplicaciones)*, Capítulo 15, McGraw-Hill, México (2006).

Cimbala, J.; *The Role of CFD Undergraduate Fluid Mechanics Education*, 59th Annual Meeting of the APS (American Physical Society) Division of Fluid Dynamics, 19-21, Tampa Bay, Florida, USA (2006).

Crespo, A.; *Mecánica de Fluidos*, Thompson, Madrid, España (2006).

Fluent INC; *Fluent 6.3 Users Guide* (2006). <http://www.fluent.com>.

Gad-el-Hak, M.; *Fluid Mechanics from the Beginning to the Third Millenium*, International Journal of Engineering Education: 14(3), 177-185 (1998).

- Gynnild, V., D. Myrhaug y B. Pettersen; *Introducing Innovative Approaches to Learning in Fluid Mechanics: a Case Study*, European Journal of Engineering Education: 32(5), 503-516 (2007).
- Hernández, J., B. Zamora y A. Campo; *On the Effect of Prandtl Number and Aspect Ratio Upon Laminar Natural-Convection Flows in Vertical Channels*, Proceedings of the Tenth International Heat Transfer Conference 5, 483-488, Ed.: G.F. Hewitt, Brighton, Inglaterra (1994).
- Hung, T.C., S.K. Wang, S.W. Tai y C.T. Hung; *An Innovative Improvement of Engineering Learning System Using Computational Fluid Dynamics Concept*, Computer Applications in Engineering Education: 13(4), 306-315 (2005).
- Hussain, Z., M.Z. Adbullah y T.C. Yap; *Two-Dimensional Analysis of Tandem/Staggered Airfoils Using Computational Fluid Dynamics*, The International Journal of Mechanical Engineering Education 33(3): 195-207 (2005)
- Kundu, P.K.; *Fluid Mechanics*, Academic Press, 626-628, San Diego, USA (1990).
- Ludwing, J.C., M.R. Malin, D.B. Spalding y J.Z. Wu; *Phoenics Documentation*, CHAM TR100, Concentration, Heat and Momentum Ltd., London (2005). <http://www.cham.co.uk>.
- Mills, J., y D. Treagust; *Engineering Education – Is Problem-Based or Project-Based Learning the Answer?* *Australasian Journal of Engineering Education*, ISSN: 1324-5821 (en línea), 2003-04. http://www.aeee.com.au/journal/2003/mills_treagust03.pdf.
- Ministerio de Educación y Ciencia de España, Real Decreto 1393/2007, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, BOE nº 270 de 30 de Octubre de 2007, pp. 44037 a 44048. <http://www.boe.es/boe/dias/2007/10/30/pdfs/A44037-44048.pdf>.
- Navaz, H.K., B.S. Henderson, R.M. Berg y S.M.A. Nekcoei; *A New Approach to Teaching Undergraduate Thermal/Fluid Sciences-Courses in Applied Computational Fluid Dynamics and Compressible Flow*, The International Journal of Mechanical Engineering Education: 30(1), 35-49 (2002).
- Sáez, P.D. y C.E. Monsalve; *Aprendizaje Basado en Resolución de Problemas en Ingeniería Informática*, Formación Universitaria: 1(2), 3-8 (2008).
- Schwartz, T.L. y B.M. Dunkin; *Facilitating Interdisciplinary Hands-On Learning Using LabVIEW*, International Journal of Engineering Education: 16(3), 218-227 (2000).
- Stern, F., y otros 10 autores; *Development of Hands-On CFD Educational Interface for Undergraduate Engineering Courses and Laboratories*, ASEE Annual Conference Proceeding, 3719-3749, Salt Lake City, USA (2004).
- Stern, F., y otros 10 autores; *Hands-On CFD Educational Interface for Engineering Courses and Laboratories*, Journal of Engineering Education: 95(1), 63-83 (2006).