

CONVECCION MIXTA DEL AIRE EN UNA CAVIDAD TRAPEZOIDAL CALENTADA EN LA BASE

Antonio Carlos França

Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
Rodovia Itajubá - Lorena, km 74,5 – Lorena – SP – cep 12600-970
e-mail: franca@debas.fauenquil.br

Felipe Rinaldo Queiroz de Aquino

Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
Rodovia Itajubá - Lorena, km 74,5 – Lorena – SP – cep 12600-970
e-mail: felipe@debas.fauenquil.br

Luiz Roberto Carrocci

Faculdade de Engenharia Campus de Guaratinguetá – UNESP
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá – SP – cep 12516-410
e-mail: carrocci@feq.unesp.br

Janaína Ferreira Batista Leal

Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
Rodovia Itajubá - Lorena, km 74,5 – Lorena – SP – cep 12600-970
e-mail: janaina@debas.fauenquil.br

Resumo. *En este trabajo fue estudiada la convección natural mixta del aire en una cavidad trapezoidal con una entrada e una salida del fluido, estando la misma calentada en la base, con temperatura uniforme y constante, manteniendo-se la superficie superior inclinada fría e las superficies verticales laterales adiabáticas. Fue utilizado el método de los volúmenes de control de Patankar (1980) para resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad del movimiento e energía. El procedimiento numérico adoptado para el cálculo de la presión fue balseado en el algoritmo SIMPLE, de Patankar. Las isotermas, líneas de corrientes e perfiles de velocidades son presentadas para las simulaciones estudiadas. Las simulaciones fueran hechas con el número de Reynolds variando de 0 a 1500; número de Grashof variando de 10^3 a 10^7 , número de Prandtl igual a 0,72, para una cavidad con la superficie inclinada superior variando de 0 a 60 grados.*

Palabras Claves: *conveccion del aire, transferencia del calor, algorithmo simples.*

1. INTRODUCCIÓN

La naturaleza de un escurrimiento imposto conjuntamente con la convección natural y cambio de calor en cavidades ha sido estudiado y es bien conocido. También la geometría de las cavidades ha sido muy estudiada en cambio de calor por su fundamental importancia y muchas aplicaciones, incluyendo cambio de calor en sobrados y edificios domésticos, captación de energía solar, refrigeración de sistemas electrónicos y control de temperatura en ambientes residenciales. Con entrada y salida de aire, condiciones de convección forzada pueden ser impostas dentro de una cavidad.

La meta del trabajo es estudiar la interacción entre las fuerzas de convección partiendo de uno o más elementos calientes dentro de la cavidad y el flujo forzado.

Sparrow y Samic (1982) estudiaron numéricamente las aplicaciones de la convección mixta en cavidades en los problemas de ingeniería como la estufa de un fogón eléctrico y la convección natural en sobrados. Ellos estudiaron el flujo del fluido y la transferencia del calor en una cavidad cilíndrica vertical con orificios en las superficies circulares horizontales inferior e superior para el flujo forzado. Cha y Jaluria (1984) estudiaron numéricamente el efecto de las fuerzas de empuje sobre el flujo y los campos de temperaturas en reservorios rectangulares bajos como aplicaciones de captación de energía solar.

Kumar y Yuan (1989) también estudiaron el flujo de convección laminar bidimensional en una cavidad rectangular con una entrada y una salida de aire. Oosthuizen (1985) estudió la convección mixta de transferencia del calor en una cavidad. Papanicolaou y Jaluria (1990, 1992, 1993, 1995) estudiaron varios aspectos del flujo de convección mixta en cavidades adiabáticas semiabiertas con fuentes térmicas aisladas junto las superficies interiores.

Pérez-Segarra et al. (1995) estudiaron numéricamente algunos casos semejantes. Mohamad (1995) estudió la convección natural en cavidades y fisuras abiertas.

Hsu et al. (1997) estudiaron numéricamente la convección mixta en una cavidad rectangular parcialmente dividida. Angirasa (2000) presentó la investigación de una cavidad cuadrada con una de las paredes verticales con una temperatura constante. Las paredes horizontales y las otras verticales fueran asumidas adiabáticas. La entrada para el flujo de aire forzado es fijado abajo, y la diferencia de temperatura fue considerada negativa o positiva. Khanafer et al. (2002) estudió la convección mixta de la transferencia del calor en dos dimensiones en una cavidad abierta en la extremidad. En esta investigación fue considerado el flujo de convección mixta en una cavidad semiaperta trapezoidal, calentada en la superficie inferior con una temperatura constante, con las superficies laterales adiabáticas y la base resfriada con temperatura constante. El flujo de aire forzado es imposto por una entrada abajo en la pared izquierda y una salida arriba en la pared lateral derecha. Ambas tienen $H/10$ de largo. La interacción entre las fuerzas de empuje y el flujo forzado fue estudiado. Las ecuaciones bidimensionales de conservación de masa, cantidad de movimiento e energía, con la aproximación de Boussinesq, fueran numéricamente solucionadas. Las ecuaciones discretizadas fueran obtenidas a través de esquema "Power Law" de Patankar con una formulación implícita. El procedimiento numérico adoptado para el cálculo de la presión fue basado en el algoritmo SIMPLE. Los parámetros gobernantes usados fueran: número de Grashof variando de 10^3 a 10^7 ; número de Prandtl igual a 0.72; y número de Reynolds variando de 0 a 1500. La inclinación de la superficie superior de la cavidad fue variada de cero a sesenta grados.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Consideremos una cavidad prismática larga con la sección recta en forma de un trapecio, Fig.(1). La vector aceleración de la gravedad es perpendicular a la base. La convección natural del fluido en la cavidad es considerada como así: el flujo es bidimensional y laminar; los gradientes de temperatura son moderados de tal modo que la aproximación de Boussinesq es admitida; son despreciados la disipación viscosa y las propiedades físicas del fluido son constantes.

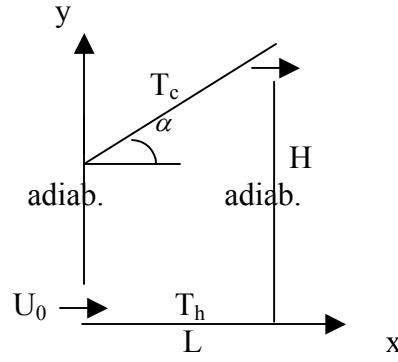


Fig. 1. Esquema de la cavidad estudiada

Con estas condiciones, las ecuaciones básicas pueden ser escritas, en forma adimensional:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{Gr}{\text{Re}^2} \theta - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Para la construcción de las cantidades adimensionales, Las siguientes variables no dimensionales fueran definidas, sendo que el súper-escrito ' indica variable adimensionales: para

$$x = \frac{x'}{L} \quad y = \frac{y'}{L} \quad u = \frac{u'}{U_0} \quad v = \frac{v'}{U_0} \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad t = \frac{U_0}{L} t' \quad (5)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad Gr = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{\nu^2} \quad \text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu} \quad (6)$$

donde t es el tiempo; x y y son las coordenadas cartesianas, u y v las velocidades en las direcciones x y y; p es la presión; θ es la temperatura; Pr es el número de Prandtl; Gr es el número de Grashof, α y ρ_0 son la difusividad térmica y densidad del fluid respectivamente.

Las condiciones iniciales y de contorno son:

$$\text{para } 0 \leq x \leq 1, \quad y = 1 + \frac{H-L}{L} x, \quad u = v = 0, \quad \theta = 1$$

$$\text{para } x = 0, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$$

$$\text{para } 0 \leq x \leq 1, \quad y = 0, \quad u = v = 0, \quad \theta = 0$$

$$\text{para } x = 1, \quad 0 \leq y \leq H/L, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\text{Las condiciones iniciales son: para } t = 0, \quad u = v = 0, \quad \theta = 0 \quad (8)$$

Cuando resolvimos el problema consideramos que $\rho = 0$ en el punto donde $x = y = 0$. Las condiciones iniciales asumidas son que el fluido está en reposo y que la temperatura de toda la región de convección es uniforme.

3. MÉTODO DE SOLUCIÓN

El método numérico utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales (1) a (4) es el método SIMPLE de Patankar (1980). Una vez que procuramos una solución permanente, las velocidades iniciales son tomadas iguales a cero. Una malla non uniforme fue utilizada. La independencia de las soluciones con relación a los tamaños de las mallas fue estudiada para varios valores de Gr y Re. El análisis mostró que la independencia de las mallas fue obtenida para una malla 60x120, presentando diferencias insignificantes en la transmisión de calor (menos que 0.15%). Para controlar mejor la convergencia, las soluciones permanentes fueran obtenidas de las ecuaciones transitorias. Los incrementos de tiempo fueron de 10^{-4} para números de Grashof mayores que 10^5 .

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Primeramente estudiamos la interacción de las fuerzas de empujo y el flujo de aire dentro de la cavidad. Figura 2 muestra (izquierda) las líneas de corrientes del aire y isotérmicas (derecha) para varios valores crecientes del número de Reynolds, para Gr=0 con la superficie superior inclinada de la cavidad de 30°. Póde se ver que con el crecimiento del número de Reynolds disminuye la temperatura en el interior de la cavidad por causa del aire frío que entra en ella. Inicialmente tenemos solamente células simples que ocupan casi toda la cavidad; siendo enseguida modificadas pelo flujo de aire.

Figura 3 muestra el mismo de la Fig. 2 para Gr=10⁵. Póde ser visto que el aumento de Gr causa un aumento en la convección, que póde ser bien notada cuando o número de Reynolds vale hasta el valor 100. Después de este valor, las isotermas toman el mismo aspecto de la Fig. 2.

Las Figuras 4 y 5 muestran el mismo de las anteriores pero con la superficie superior teniendo una inclinación de 45°, donde se póde notar casi el mismo comportamiento anterior. Las Figuras 6 a 9 muestran las componentes horizontales de las velocidades sobre la línea vertical media de la cavidad para Gr=0 o 10⁵, con una inclinación de la superficie superior de 30° o 45°, para varios valores de Re. Nota se que ha poca mutación en el valor de la velocidad con el aumento de la inclinación de la superficie superior.

Las Figuras 10 y 11 muestran las componentes verticales de las velocidades sobre la línea horizontal media de la cavidad para Gr=0 o 10⁵; notamos que ha poca mutación de un caso para otro.

Las Figuras 12 y 13 muestran los perfiles de temperaturas sobre la línea vertical media de la cavidad, para los valores de Gr=0 y 10⁵, para tres valores de la inclinación de la superficie superior: 30°, 45° y 60°. Póde se ver que con el aumento de la inclinación de la superficie superior las temperaturas tienden a cero mas rápidamente en función del aumento do número de Reynolds. El aumento del número de Grashof hace con que aya mutación de los perfiles de temperatura para el número de Reynolds hasta el valor 100; siendo el valor de la temperatura mas uniforme en este caso.

5. FIGURAS

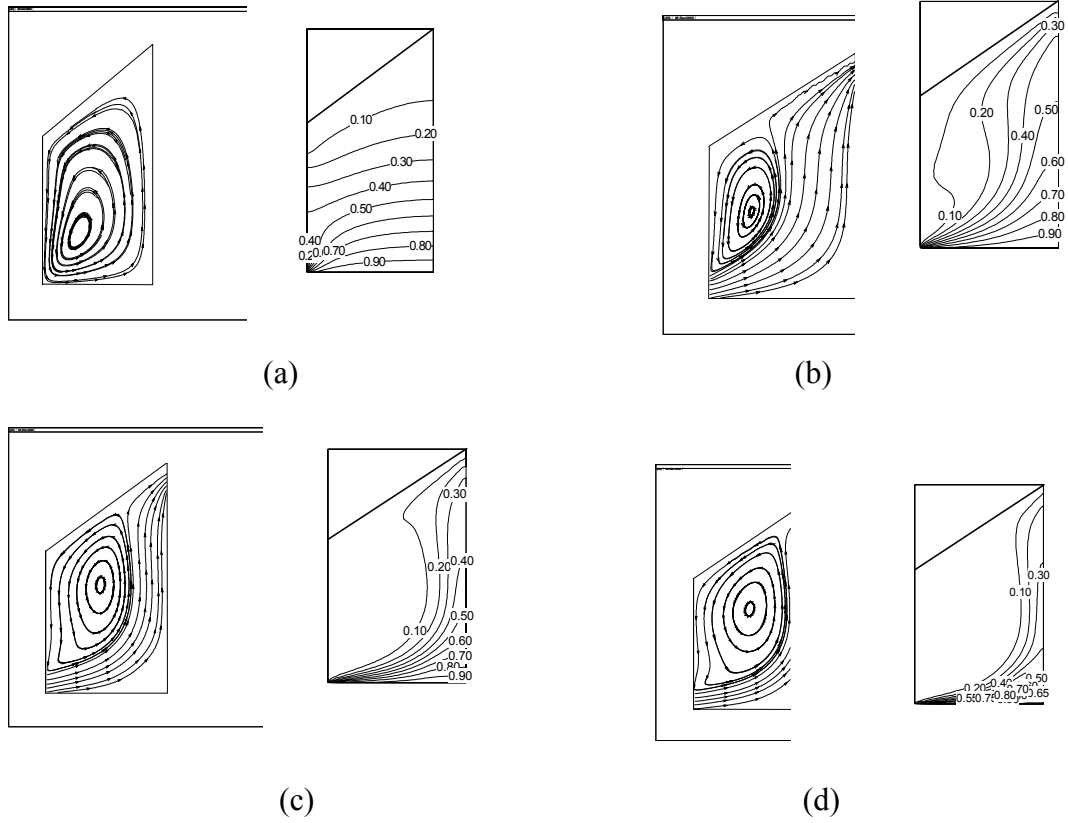


Fig. 2 – Líneas de corrientes (izquierda) y isothermas (derecha) para $Gr=0$; $\alpha = 30^\circ$ y $Re=0$ (a); 100 (b); 250 (c); 500 (d).

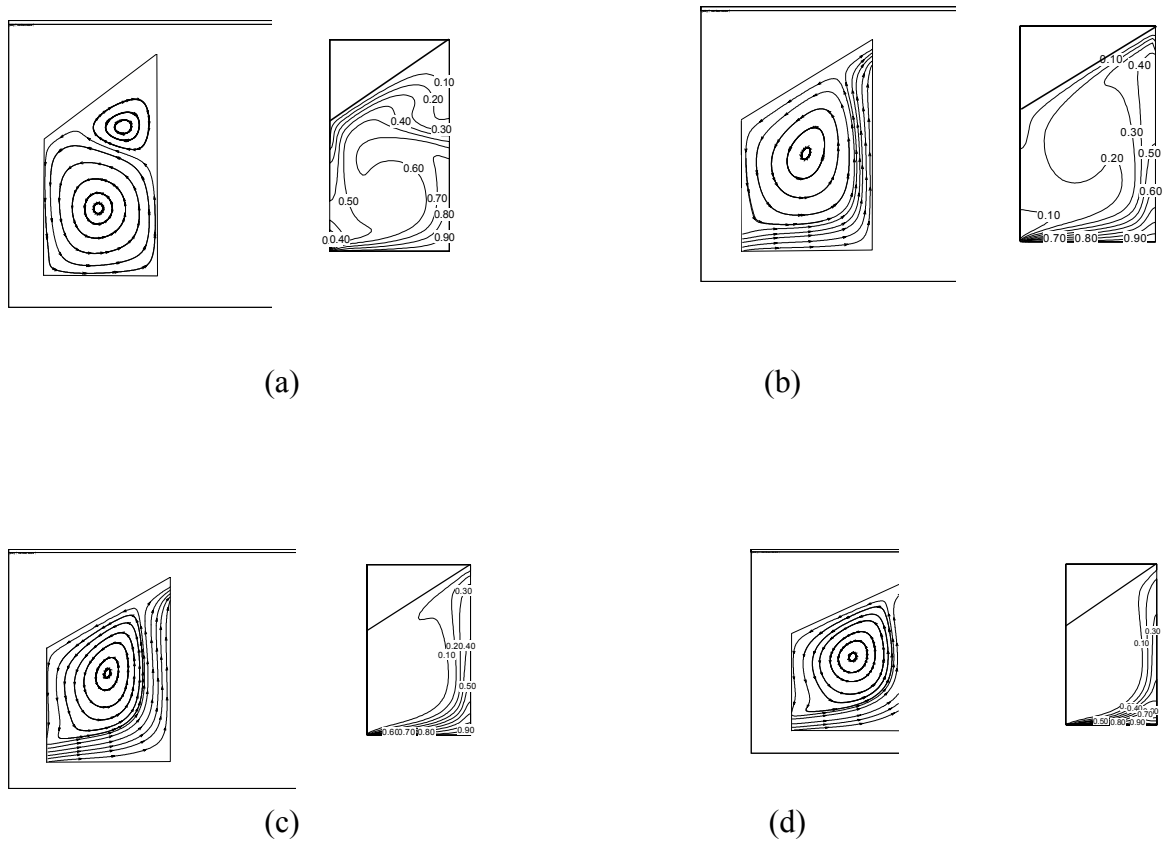
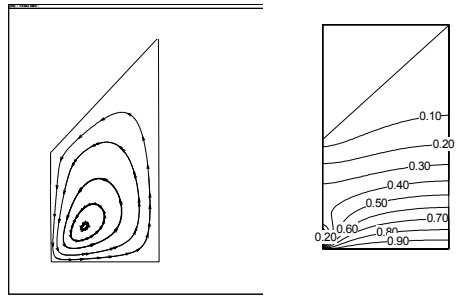
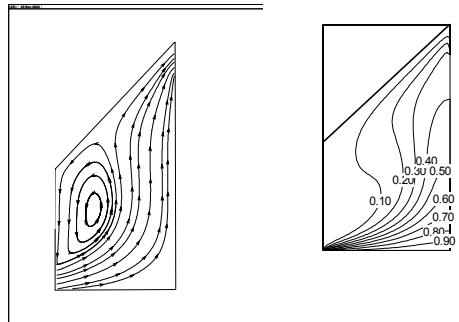


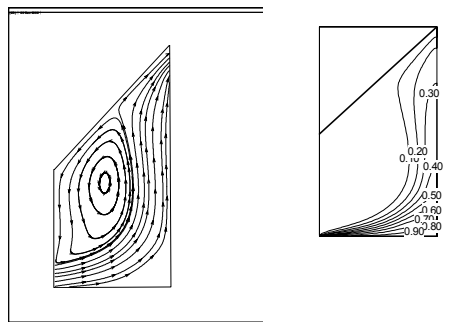
Fig. 3 – Líneas de corrientes (izquierda) y isothermas (derecha) para $Gr=10^5$; $\alpha = 30^\circ$ y $Re=0$ (a); 100 (b); 250 (c); 500 (d).



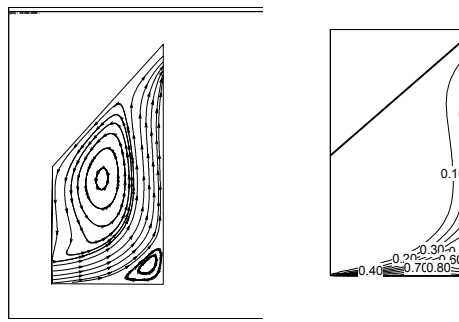
(a)



(b)

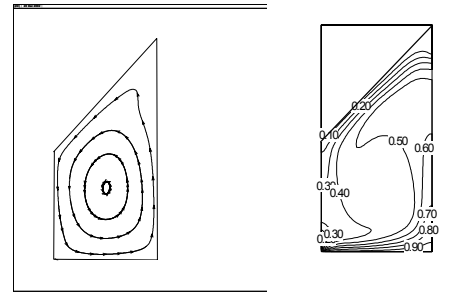


(c)

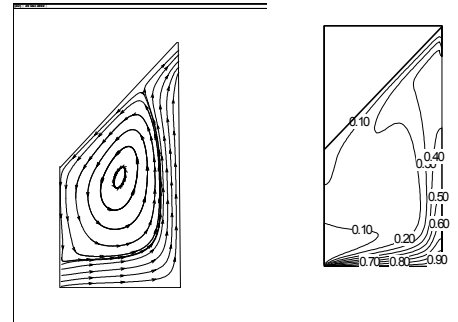


(d)

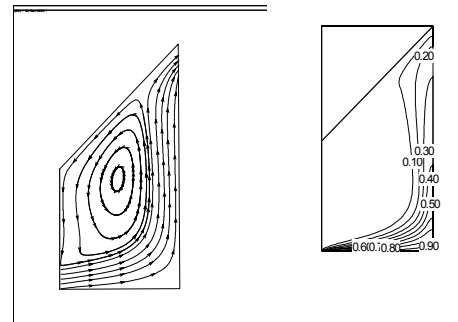
Fig. 4 – Líneas de corrientes (izquierda) y isothermas (derecha) para $Gr=0$; $\alpha = 45^\circ$ y $Re=0$ (a); 100 (b); 250 (c); 500 (d).



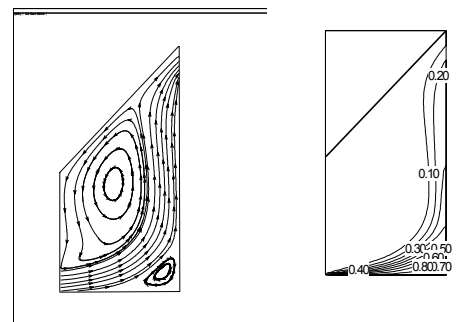
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 – Líneas de corrientes (izquierda) y isothermas (derecha) para $Gr=10^5$; $\alpha = 45^\circ$ y $Re=0$ (a); 100 (b); 250 (c); 500 (d).

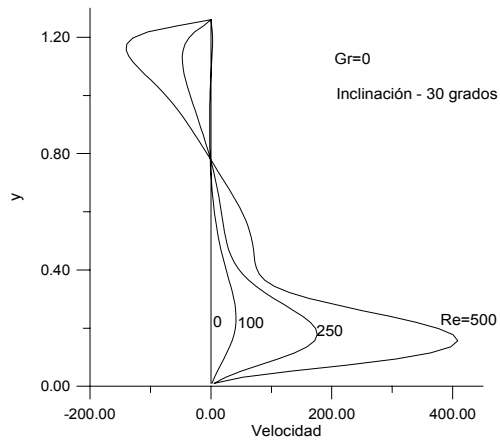


Fig. 6 – Componentes horizontales de la velocidad en la línea media vertical de la cavidad para $Gr=0$ e $\alpha = 30^\circ$.

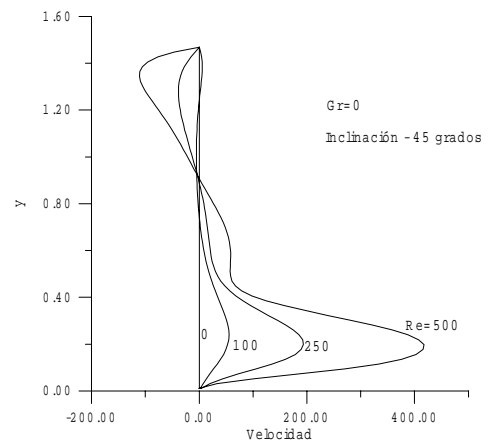


Fig. 7 – Componentes horizontales de la velocidad en la línea media vertical de la cavidad para $Gr=0$ e $\alpha = 45^\circ$.

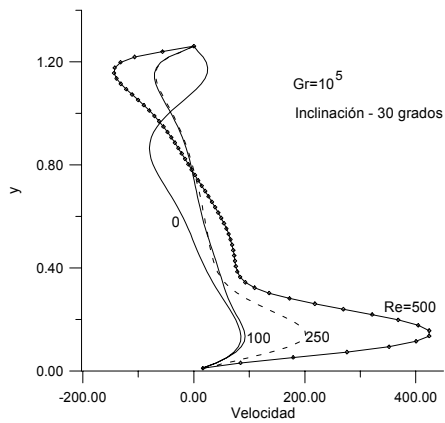


Fig. 8 – Componentes horizontales de la velocidad en la línea media vertical de la cavidad para $Gr=10^5$ e $\alpha = 30^\circ$.

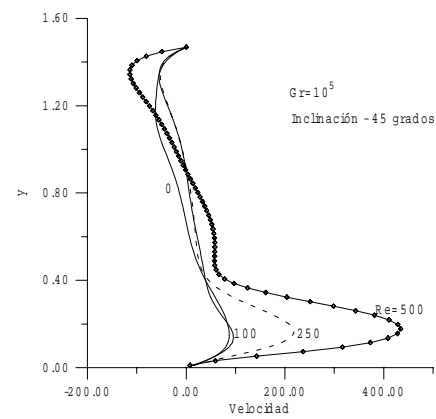


Fig. 9 – Componentes horizontales de la velocidad en la línea media vertical de la cavidad para $Gr=10^5$ e $\alpha = 45^\circ$.

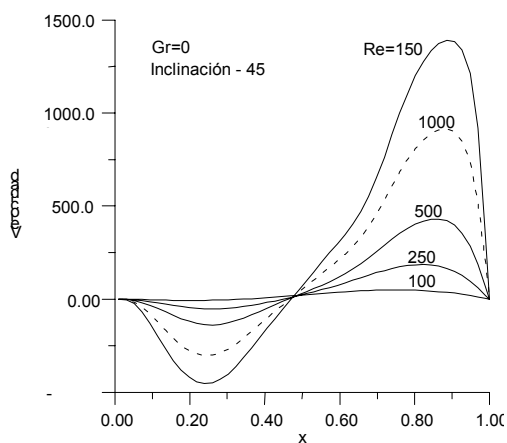


Fig. 10 – Componentes verticales de la velocidad en la línea horizontal media de la cavidad para $Gr=0$ e $\alpha = 45^\circ$.

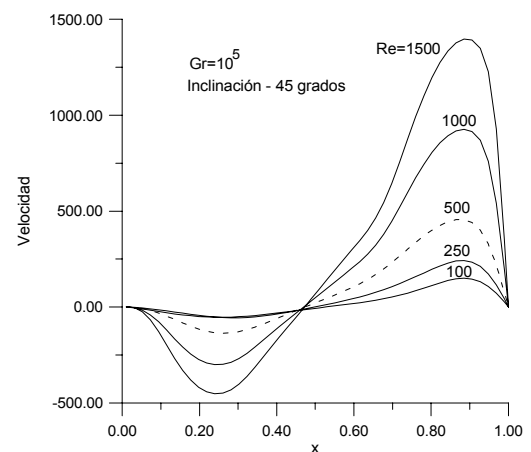
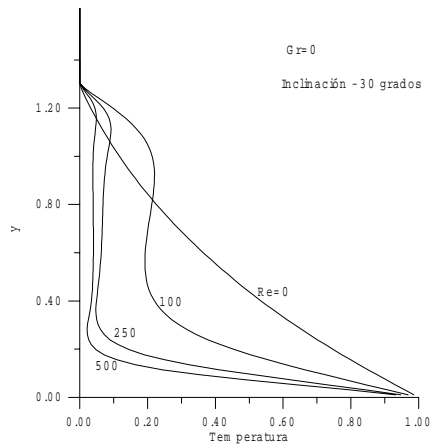
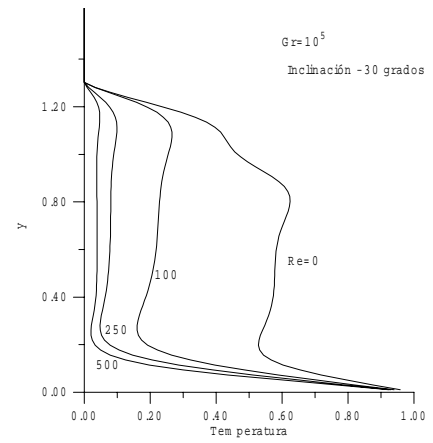


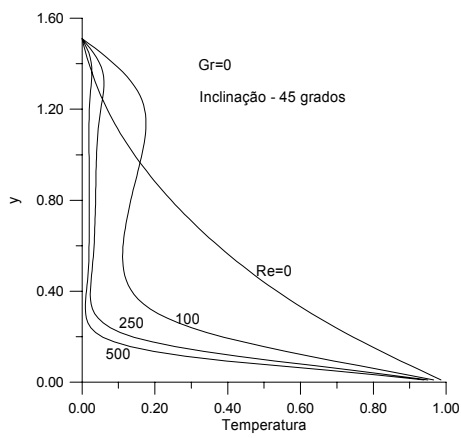
Fig. 11 – Componentes verticales de la velocidad en la línea horizontal media de la cavidad para $Gr=10^5$ e $\alpha = 45^\circ$.



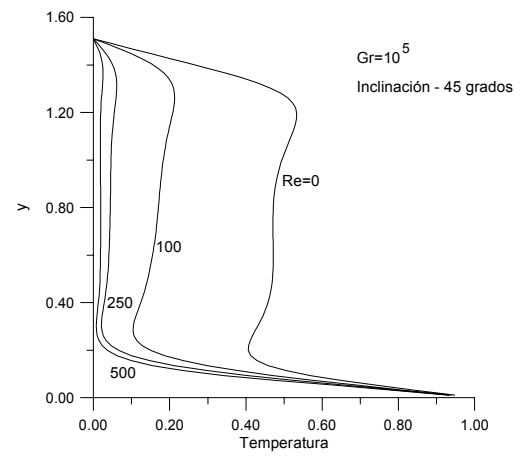
(a)



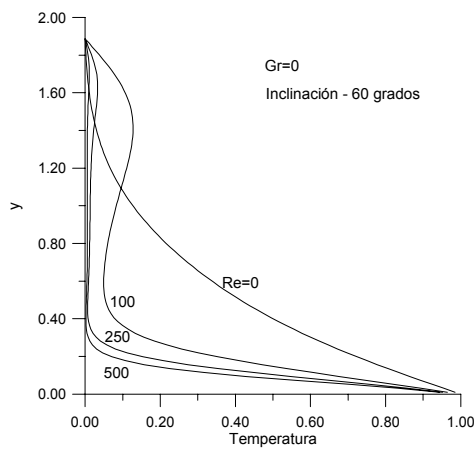
(d)



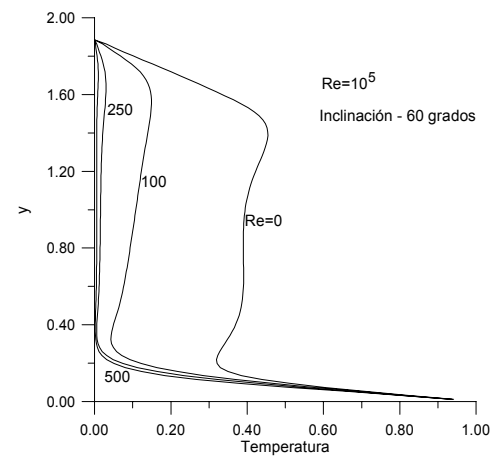
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 12. Perfiles de temperaturas para $Gr=0$ y varios valores de Re con:
 $\alpha = 30^\circ$ (a), 45° (b); 60° (c)

Fig. 13. Perfiles de temperaturas para $Gr=10^5$ y varios valores de Re con:
 $\alpha = 30^\circ$ (d), 45° (e); 60° (f)

6. CONCLUSIONES

En este trabajo fue estudiada la convección natural mixta del aire en una cavidad trapezoidal con una entrada e una salida del fluido, estando la misma calentada en la base, con temperatura uniforme y constante, manteniendo-se la superficie superior inclinada fría e las superficies verticales laterales adiabáticas. Las simulaciones fueran hechas con el número de Reynolds variando de 0 a 1500, para $10^3 < Gr < 10^7$, número de Prandtl igual a 0,72, para una cavidad con la superficie inclinada superior variando de 0 a 60 grados.

Para o número de Reynolds mayor que 100 temos o resfriamiento na parte central de la cavidad con pequena influencia del número de Grashof. E aumento de este número hace con que las temperaturas se tornen mas homogeneas en el interior de la cavidad.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado durante el pos doctorado de Aquino, F.R.Q., en lo Departamento de Ingenieria Mecanica de la Universidad Paulista "Julio de Mesquita Filho", São Paulo - Guaratinguetá, a quien los autores quieren dejar su agradecimiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Taylor & Francis, London.
2. Sparrow, E. M. and Samie, F., 1982, "Interaction between a stream which passes through an enclosure and natural convection within the enclosure". Int. Journal Heat Mass Transfer 25, 1489-1502.
3. Cha, C. K. and Jaluria, Y., 1984, "Effect of thermal buoyancy on the recirculating flow in a solar pond for energy extraction and heat rejection", ASME Journal Solar Eng. 106, 428-437.
4. Kumar, R. and Yuan, T.D., 1989, "Recirculating mixed convection flows in rectangular cavities", AIAA J. Thermophys. Heat Transfer 3, 321-329.
5. Oosthuizen, P.H., 1985, "Mixed Convective Heat Transfer in a Cavity", Proceedings of 23th National Heat Transfer Conference, Denver, U.S.A, pp. 159-169.
6. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y., 1990, "Mixed convection from an isolated heat source in a rectangular enclosure". Numer. Heat Transfer, Part A 18, 427-461.
7. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y., 1992, "Transition to a periodic regime in mixed convection in a square cavity", Journal Fluid Mech. 239, 489-509.
8. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y., 1993, "Mixed convection from a localized heat source in a cavity with conducting walls: a numerical study", Numer. Heat Transfer Part A 23, 463-484.
9. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y., 1995, "Computation on a turbulent flow in mixed convection in a cavity with a localized heat source", J. Heat Transfer 117, 649-658.
10. Pérez-Segarra, C.C., Oliva, A., Costa, M., Escanes, F., 1995. "Numerical experiments in turbulent natural and mixed convection in internal flows". Int. J. Numer. Meth. Heat Fluid Flow 5, 13-33.
11. Mohamad, A. A., 1995, "Natural convection in open cavities and slots", Numer. Heat Transfer 27, 705-716.
12. Hsu, T. H. and Hsu, S. P., 1997, "Mixed convection in a partially divided rectangular enclosure", Numer. Heat Transfer Part A 18, 427-461.
13. Angirasa, D., 2000, "Mixed convection in a vented enclosure with an isothermal vertical surface", Fluid Dynamics Research, Volume 26, Issue 4, 219-233.
14. Khanafer, K., Vafai, K. and Lightstone, M., 2002, "Mixed convection heat transfer in two-dimensional open-ended enclosures", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, 5171-5190.

9. DERECHOS AUTORALES

Los autores son los únicos responsables por el contenido del material impreso incluido en su trabajo

Abstract. *In this work the natural mixed convection of the air was studied in a trapezoidal cavity with an entrance and an exit of the fluid, the same one heated in the base being, with uniform and constant temperature, maintain the cold inclined superior surface and the lateral vertical surfaces adiabáticas. The method of the volumes was used of control of Patankar (1980) to solve the mass conservation equations, cantidad of the movement and energy. The numeric procedure adopted for the calculation of the pressure was balseado in the SIMPLE algorithm, of Patankar. The isotherms, the currents lines and speeds profiles are presented for the studied simulations. The simulations were made with the number of Reynolds varying from 0 to 1500; number of Grashof varying from 103 to 107, number of Prandtl similar to 0,72, for a cavity with the inclined surface superior varying from 0 to 60 degrees.*

Keywords. *Air convection, heat transfer, simple algoritmes.*