



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**LABORATORIO N°5: CONVECCIÓN NATURAL 2D**

PROFESOR: Carlos Zambra

ALUMNOS: Luis Barrientos

Claudio Moya

Joaquín Pinto

**CURICÓ -CHILE**

2025

## **1. Índice**

1. Índice .....	1
2. Introducción y objetivos .....	2
3. Aspectos teóricos .....	3
4. Metodología .....	5
5. Desarrollo y resultados .....	6
6. Conclusión .....	7
7. Bibliografía .....	8

## 2. Introducción y Objetivos

### Introducción

La convección natural es un fenómeno que ocurre constantemente en nuestro entorno y tiene un papel fundamental en la transferencia de calor. Se genera cuando existen diferencias de temperatura dentro de un fluido, lo que produce variaciones de densidad y, por consecuencia, movimiento.

En este laboratorio se estudia la convección natural en un recinto cuadrado cerrado, con las paredes superior e inferior adiabáticas (sin intercambio de calor), mientras que las paredes laterales presentan temperaturas distintas: la izquierda es más **caliente** y la derecha más fría. Este gradiente térmico genera el movimiento del fluido en el interior.

El análisis se realiza mediante un programa computacional en FORTRAN, que resuelve de forma acoplada las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía, en un formato adimensional. A partir de ello, se observan las distribuciones de velocidad, temperatura y líneas de corriente para diferentes fluidos, representados por distintos números de Prandtl (Pr).

Este estudio permite comprender de forma visual y práctica cómo la viscosidad y la capacidad de difusión térmica del fluido afectan su comportamiento, aplicando los conceptos teóricos vistos en clases a un sistema realista que se puede relacionar con aplicaciones como el enfriamiento de reactores, el diseño de hornos o el transporte de contaminantes.

### Objetivos

- Comprender cómo se produce la convección natural en sistemas cerrados y qué condiciones la generan.
- Analizar cómo se comportan las velocidades y temperaturas del fluido dentro del recinto.
- Evaluar cómo varía la transferencia de calor por convección natural en función del número de Prandtl.
- Aplicar los resultados obtenidos a situaciones reales de ingeniería donde exista convección natural.

### 3. Aspectos teóricos

La convección natural ocurre cuando el movimiento de un fluido se genera de manera espontánea por diferencias de temperatura, sin que haya una fuerza externa. Al calentarse, una parte del fluido disminuye su densidad y asciende, mientras que el fluido más frío y denso desciende, generando un movimiento continuo.

Este fenómeno es clave en muchos procesos naturales e industriales: desde el calentamiento del aire en una habitación, hasta la circulación del magma o la transferencia de calor en equipos eléctricos.

#### Ley de enfriamiento de Newton

La cantidad de calor que se transfiere entre una superficie y un fluido se calcula mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = h \times A \times (T_s - T_f)$$

Donde:

- $\dot{Q}$ : flujo de calor (W)
- $h$ : coeficiente de convección ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )
- $A$ : área de transferencia ( $\text{m}^2$ )
- $T_s, T_f$ : temperaturas de la superficie y del fluido (K o °C)

#### Número de Nusselt

El Número de Nusselt ( $Nu$ ) relaciona la convección con la conducción dentro del fluido. Se define como:

$$Nu = \frac{h \times L}{k}$$

Donde:

- $L$ : es la longitud característica
- $k$ : la conductividad térmica

## Número de Prandtl

El número de Prandtl ( $Pr$ ) es uno de los parámetros más importantes en este laboratorio. Representa la relación entre la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) y la difusividad térmica ( $\alpha$ ) del fluido:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

## Número de Grashof

El número de Grashof ( $Gr$ ) Indica la razón entre las fuerzas de flotación (que impulsan el movimiento del fluido) y las fuerzas viscosas (que se oponen al movimiento).

$$Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3}{\nu^2}$$

## Número de Rayleigh

El número de Rayleigh ( $Ra$ ) Este número combina los efectos térmicos y de viscosidad, determinando la intensidad global de la convección natural.

En este laboratorio se trabajó con  $Ra = 10^5$ , valor suficientemente alto para observar un flujo convectivo bien definido.

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3}{\nu\alpha}$$

## 4. Metodología

En este laboratorio se analizó la convección natural dentro de un recinto cuadrado cerrado, donde el fluido se mueve libremente debido a las diferencias de temperatura. Las paredes superior e inferior fueron consideradas adiabáticas (sin intercambio de calor), mientras que las paredes laterales se mantuvieron a temperaturas distintas: la izquierda más caliente y la derecha más fría.

Estas condiciones provocan que el fluido más caliente (menos denso) ascienda por el costado izquierdo, mientras que el fluido frío (más denso) descienda por el derecho, generando un movimiento circular dentro del recinto.

Para el análisis se utilizó un programa computacional desarrollado en FORTRAN, el que resuelve las ecuaciones de energía y cantidad de movimiento en forma adimensional.

El modelo considera:

- Paredes adiabáticas en la parte superior e inferior.
- Pared izquierda a temperatura constante y mayor (pared caliente).
- Pared derecha a temperatura constante y menor (pared fría).
- Número de Rayleigh fijo:  $Ra = 10^5$ .
- Variación del número de Prandtl (Pr) para representar distintos fluidos.

## 5. Desarrollo y resultados

### Tarea 1: Análisis del efecto del número de Prandtl en la fluido-dinámica al interior de la cámara por convección natural

Se utilizó el programa entregado en el laboratorio para analizar cómo cambia la convección natural cuando varía el número de Prandtl, manteniendo el número de Rayleigh constante en  $Ra = 10^5$ , temperatura de paredes  $Thot = 1$ --- $Tcool = 0$ .

Los casos simulados fueron:

		Nº volúmenes	Nº prandlt
Caso 1	Aire	50x50	0,7
Caso 2	Aqua	50x50	6,13
Caso 3	Miel	50x50	100
Caso 4	Magma	50x50	100000

Durante las simulaciones, se observó la evolución temporal de las velocidades  $U$ y  $V$ , y de la temperatura en el nodo central del recinto. Los gráficos obtenidos en Tecplot mostraron que:

- A medida que aumenta el número de Prandtl, la difusión de calor se vuelve más lenta, lo que provoca una mayor acumulación de temperatura cerca de la pared caliente.
- En los fluidos con  $Pr$  pequeños, como el aire, la convección es más activa y el fluido se mueve con mayor intensidad.
- En cambio, con  $Pr$  muy altos, como en el caso del magma, el movimiento del fluido es muy lento y la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción.

Este comportamiento se traduce en una capa límite térmica más delgada cuando  $Pr > 1$ , y una más gruesa cuando  $Pr < 1$ .

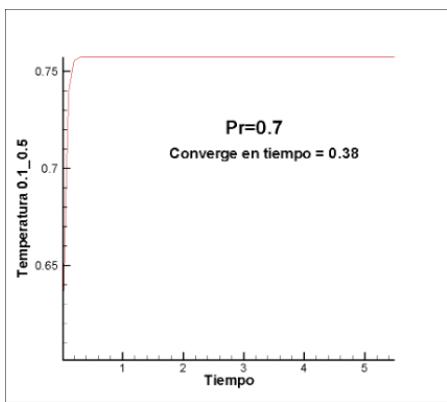


Figura 1: Convergencia Pr = 0.7

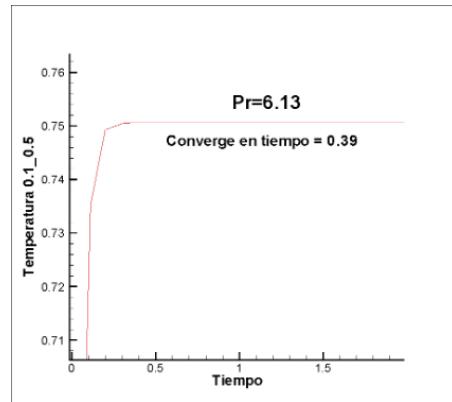


Figura 2: Convergencia 6.13

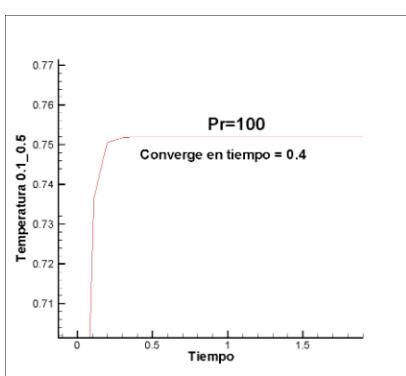


Figura 3: Convergencia Pr = 100

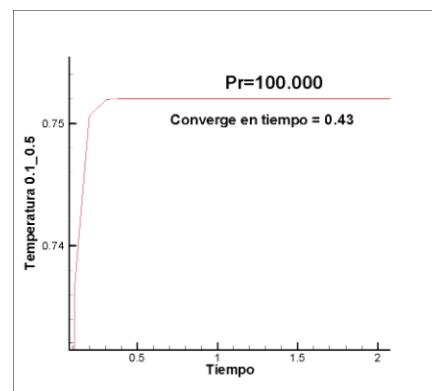


Figura 4: Convergencia Pr = 100.000

### 3) Resultados volumen de control central velocidades y temperatura

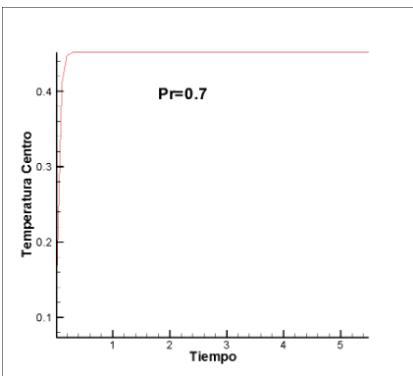


Figura 5: Temperatura vs tiempo Caso 1

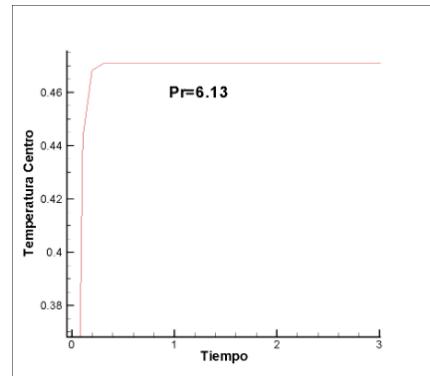


Figura 6: Temperatura vs tiempo Caso 2

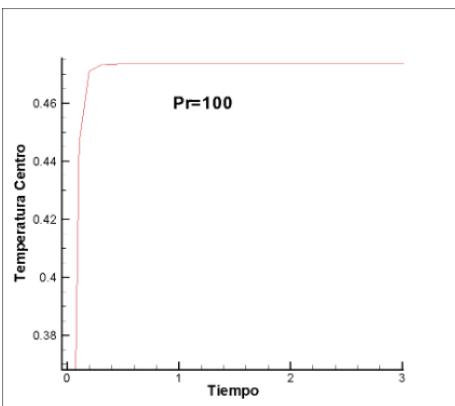


Figura 8: Temperatura vs tiempo Caso 3

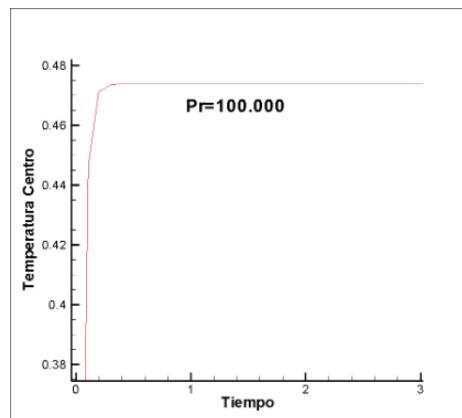


Figura 9: Temperatura vs tiempo caso 4

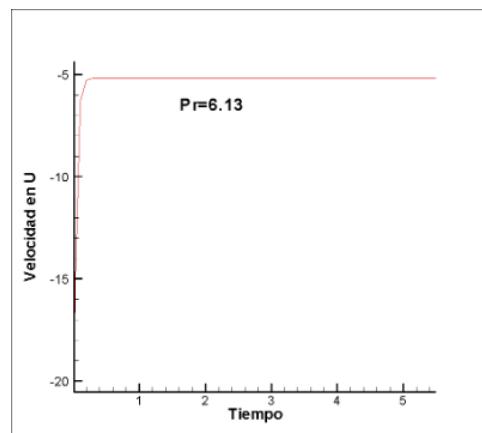
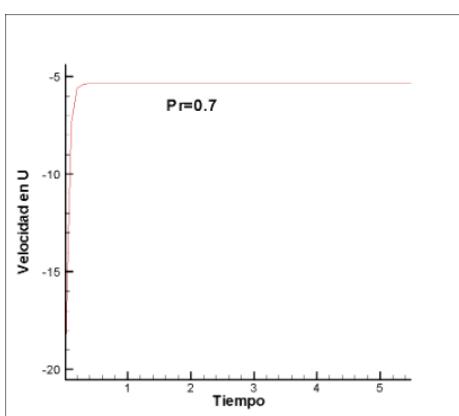


Figura 10: Velocidad u vs tiempo caso 1

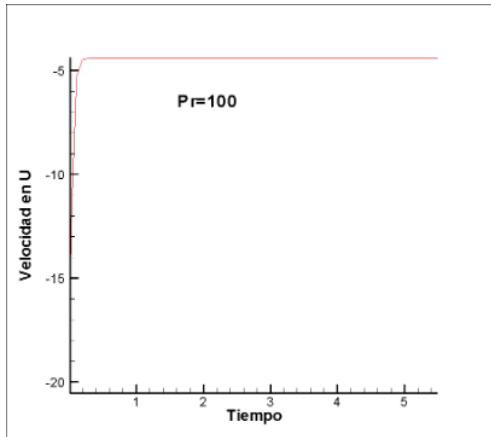


Figura 11: Velocidad u vs tiempo caso 2

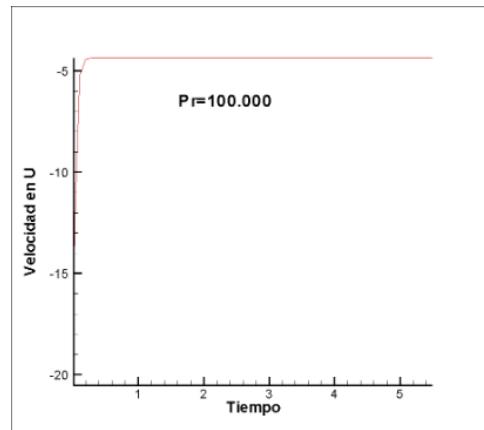


Figura 12: Velocidad u vs tiempo caso 3

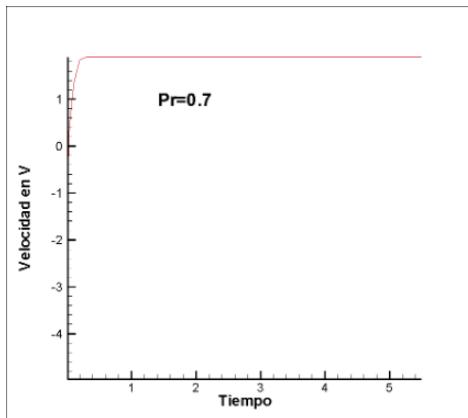


Figura 13: Velocidad u vs tiempo caso 4

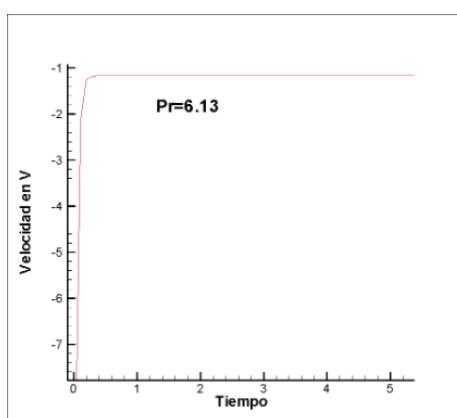


Figura 14: velocidad V vs tiempo caso 1

Figura 15: velocidad V vs tiempo caso 2

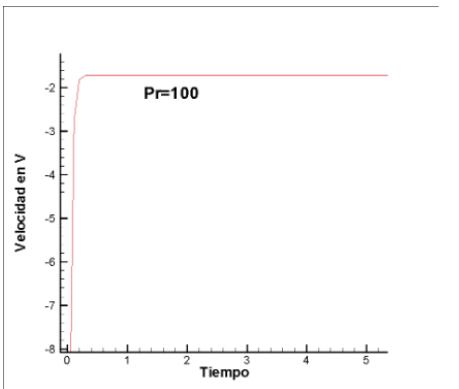


Figura 16: velocidad V vs tiempo caso 3

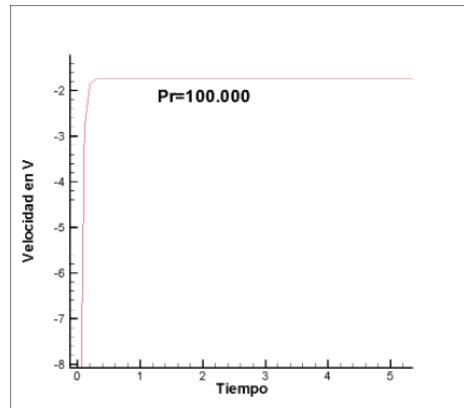


Figura 16: velocidad V vs tiempo caso 4

#### 4) perfiles en $y=0.5$

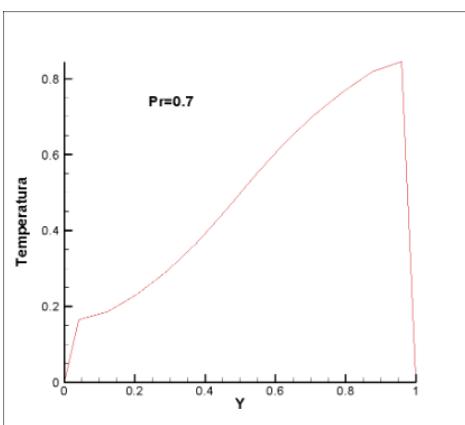


Figura 17: Perfil de temperatura - caso 1

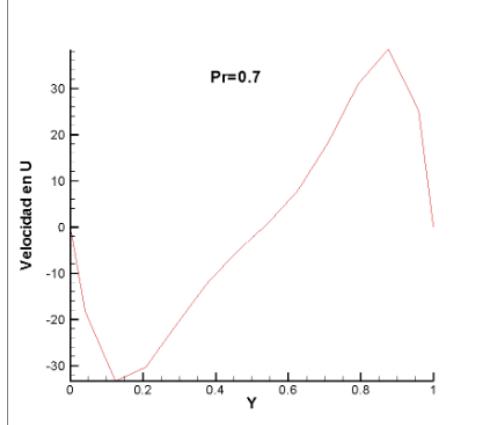


Figura 18: Perfil de velocidad en U - caso 1

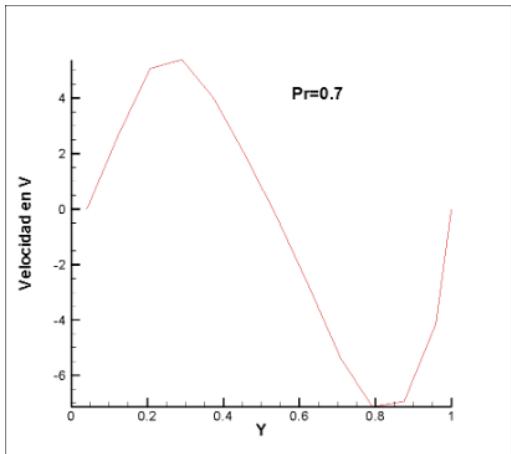


Figura 19: Perfil de velocidad en V - caso 1

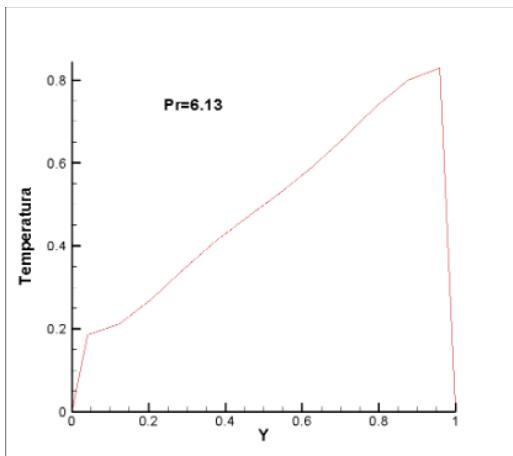
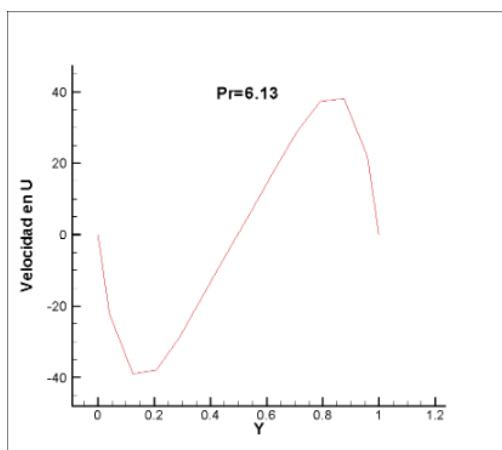


Figura 20: Perfil de temperatura – caso 2



Figuro 21: Perfil de Velocidad en U – caso 2

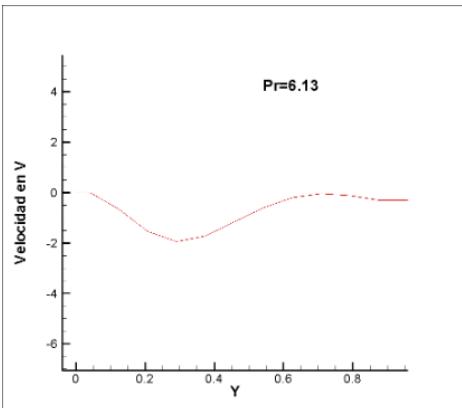


Figura 22: Perfil de velocidad en V – caso 2

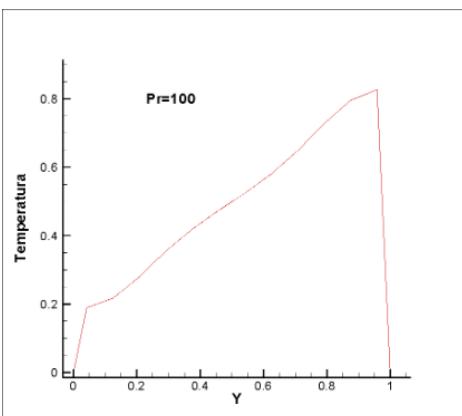


Figura 23: Perfil de temperatura – caso 3

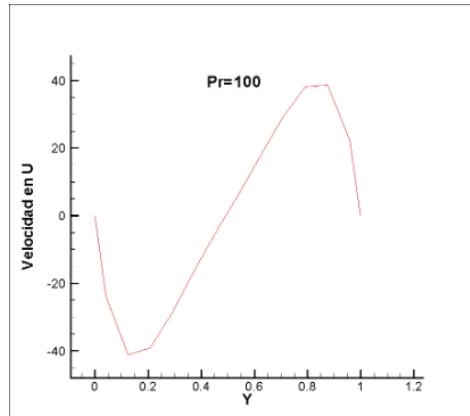


Figura 24: Perfil de velocidad en U – caso 3

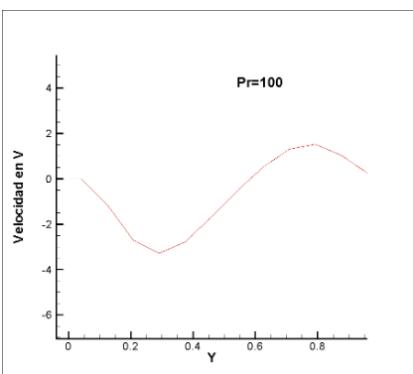


Figura 25: Perfil de velocidad en V – caso 3

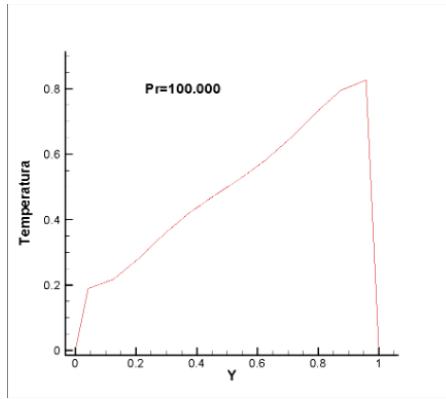


Figura 26: Perfil de temperatura – caso 4

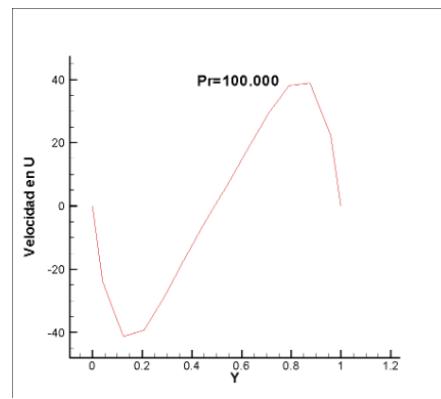


Figura 27: Perfil de velocidad en U – caso 4

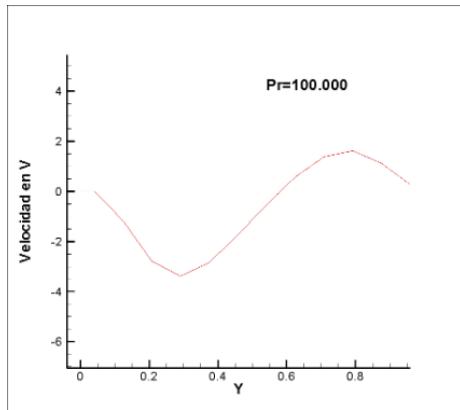


Figura 28: Perfil de velocidad en V – caso 4

5) Presente para cada número de Prandlt (cada caso estudiado) los gráficos en 2D (contornos) a un tiempo intermedio y a tiempo final para: 1) la temperatura (isotermas), 2) velocidades (isovelocidades) en U en V y 3) las líneas de corriente. Las líneas de corriente las puede superponer en algunos de los datos 2D de velocidad. Serían en total 3 figuras.

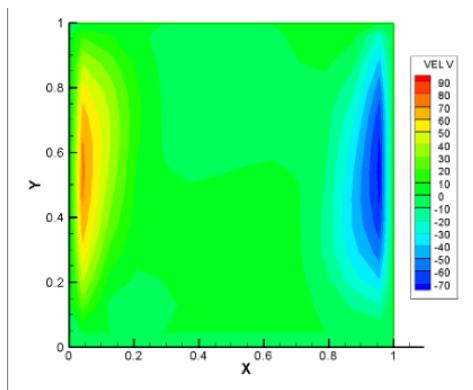


Figura 29: Contorno de temperatura – caso 1

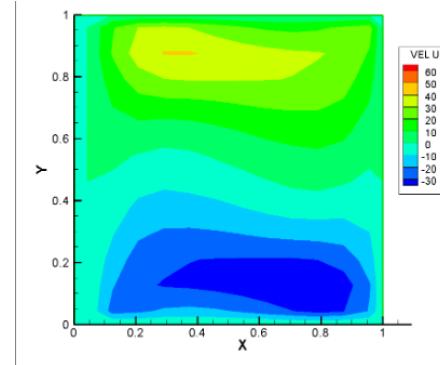


Figura 30: Contorno de velocidad en U – caso 1

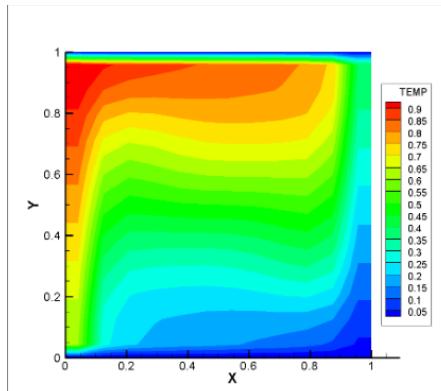


Figura 31: Contorno de velocidad en V – caso 1

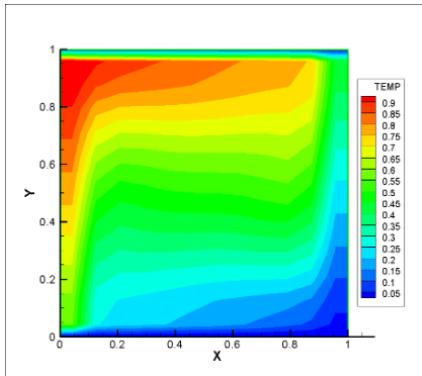


Figura 32: Contorno de temperatura – caso 2

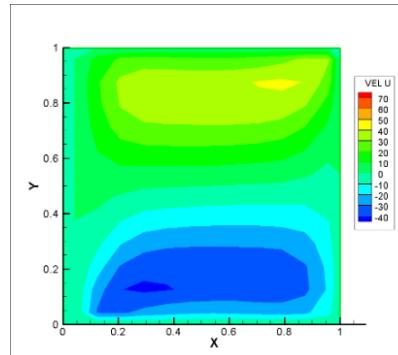


Figura 33: Contorno de velocidad en U – caso 2

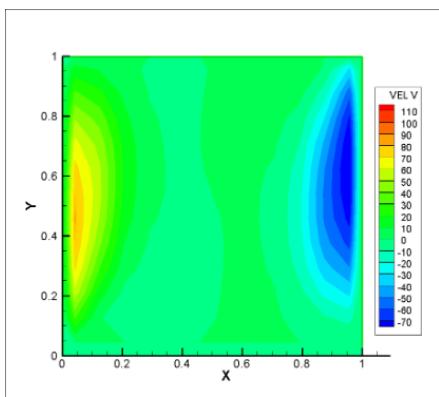


Figura 34: Contorno de velocidad en V – caso 2

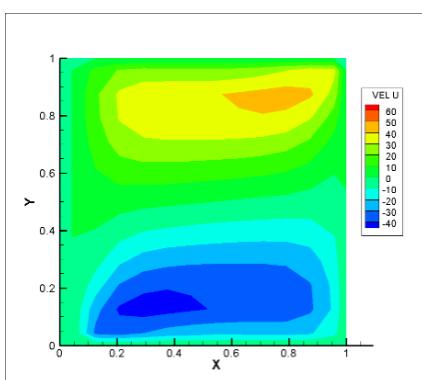


Figura 35: Contorno de temperatura – caso 3

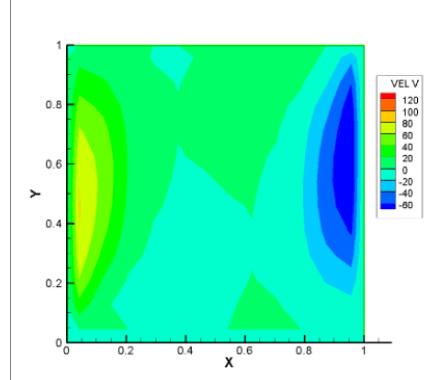


Figura 36: Contorno de velocidad en U – caso 3

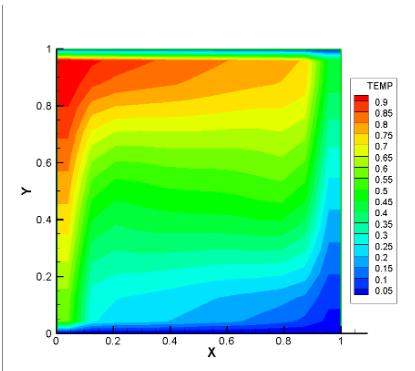


Figura 37: Contorno de velocidad en V – caso 3

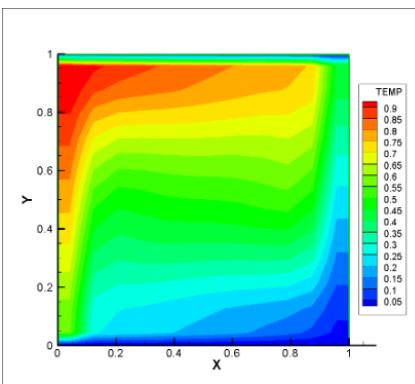


Figura 38: Contorno de temperatura – caso 4

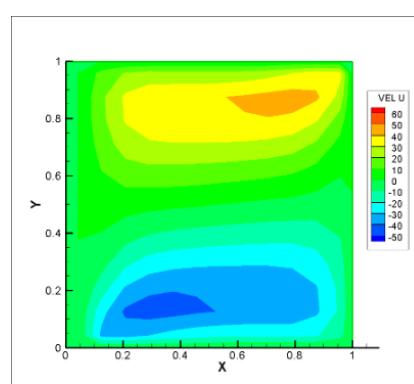


Figura 39: Contorno de velocidad en U – caso 4

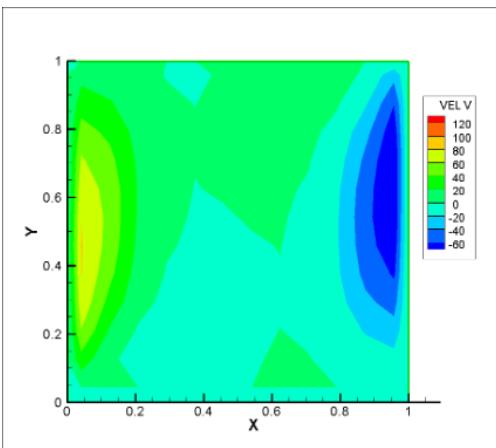


Figura 40: Contorno de velocidad en V – caso 4

## Tarea 2: Comparación de resultados con caso experimental obtenido de referencias

En esta tarea se compararon los resultados obtenidos con los presentados en el paper de Banaszek et al. (1999), que estudia la convección natural de agua en un recinto cuadrado con  $Pr = 1$ ,  $T_h = 0.5$ ,  $T_c = -0.5$  y distintos números de Rayleigh ( $Ra = 10^5, 10^6, 10^7$ ).

Los resultados simulados mostraron patrones muy similares a los del artículo:

- Para  $Ra = 10^5$ , se forman dos celdas convectivas simétricas, indicando un flujo estable.
- Para  $Ra = 10^6$ , las celdas se vuelven más intensas y se observan gradientes térmicos más marcados.
- Para  $Ra = 10^7$ , el flujo se vuelve más inestable, con zonas de recirculación más complejas.

Esta comparación permitió validar el modelo computacional, demostrando que las simulaciones numéricas reproducen correctamente el comportamiento físico descrito en el paper.

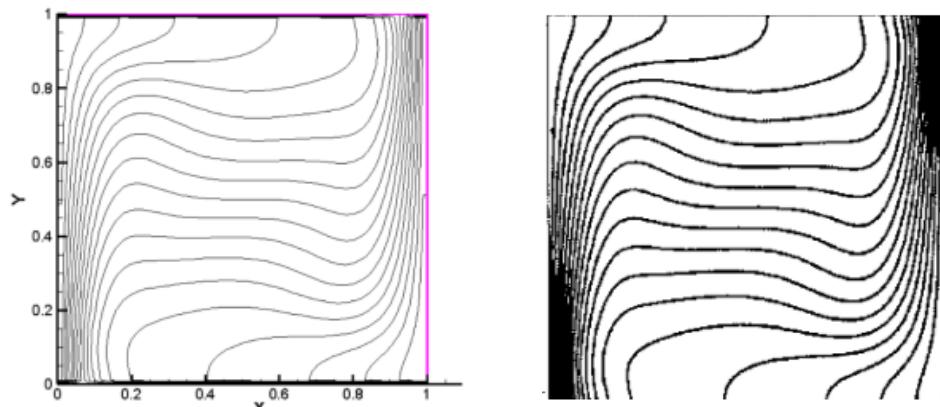


Figura 41: temperatura con  $\text{Ra}=10^5$

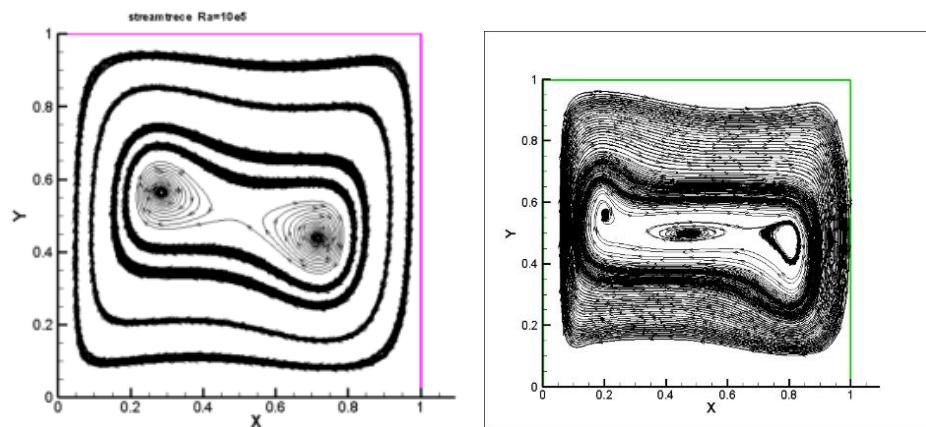


Figura 42: Velocidad con  $\text{Ra}=10^5$

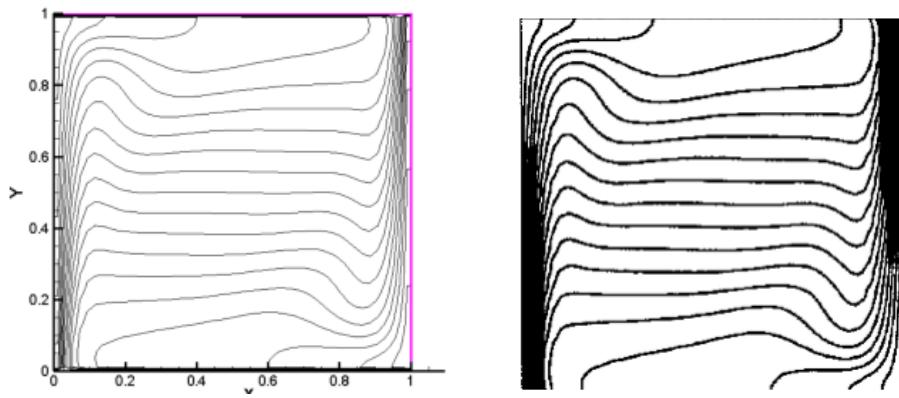


Figura 43: temperatura con Ra=10<sup>6</sup>

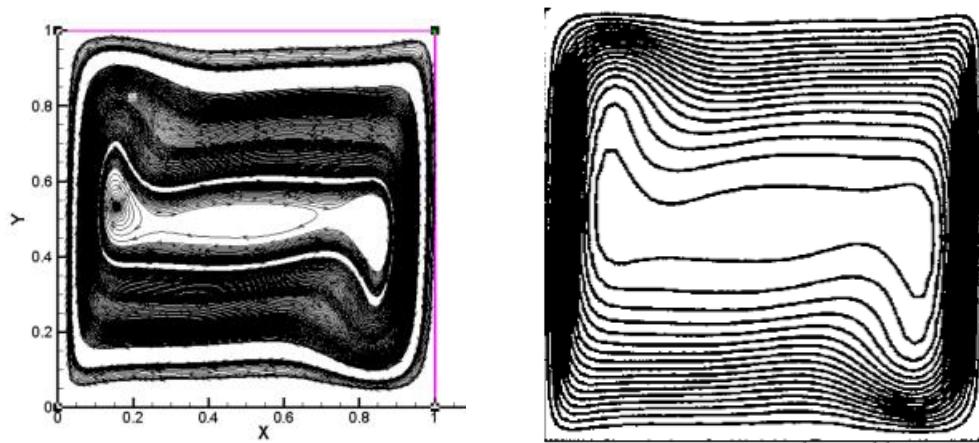


Figura 44: velocidad con Ra=10<sup>6</sup>

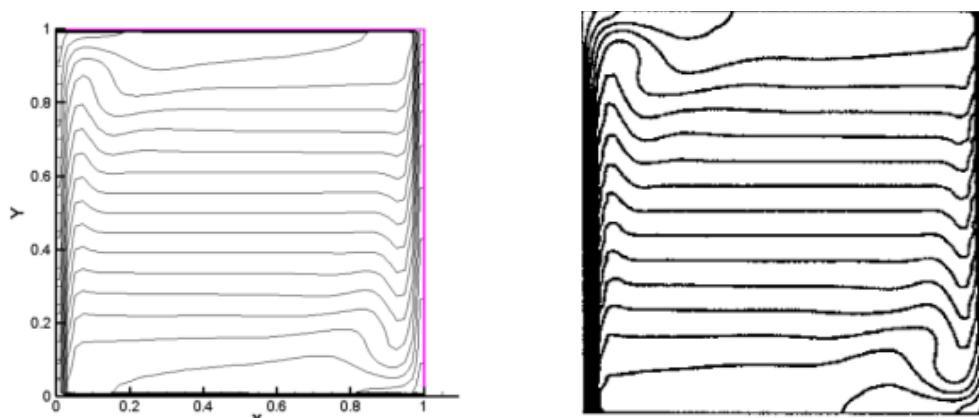


Figura 45: temperatura con Ra=10<sup>7</sup>

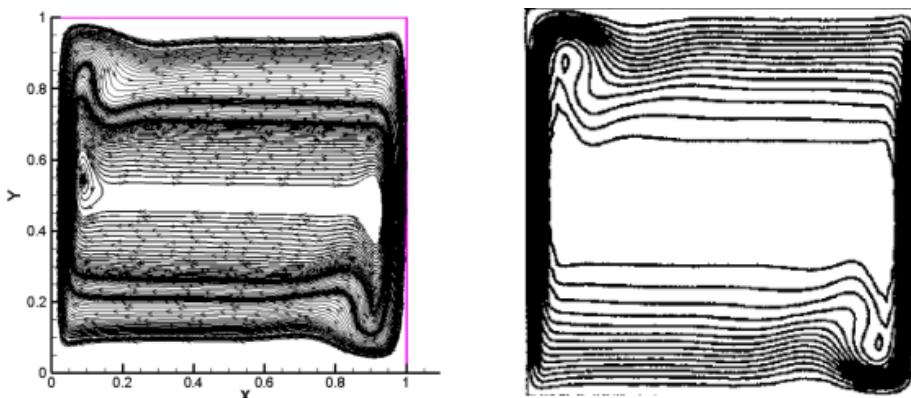


Figura 46: velocidad con  $\text{Ra}=10^7$

### Tarea 3: Simulación de fluidos no newtonianos con alta viscosidad.

Sección basada en la sección 3.1 del paper: Temporal Evolution of Cooling by Natural Convection in an Enclosed Magma Chamber (<https://doi.org/10.3390/pr10010108>).

Se corrió el programa disponible en el paper, ajustando las condiciones para obtener resultados lo más parecidos posibles a los publicados (Figura 2B del artículo). Se trabajó con un fluido de alta viscosidad y número de Prandtl elevado ( $Pr = 4 \times 10^4$ ), dentro de un dominio de  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , enfriado a  $T_w = 25^\circ\text{C}$ .

Los resultados obtenidos en Tecplot fueron muy similares a los presentados en el paper, confirmando la validez del programa y del modelo numérico. En las gráficas se pudo observar una distribución de temperatura con isotermas muy compactas cerca de las paredes frías y vectores de velocidad mínimos, lo cual es coherente con un flujo altamente viscoso como el magma.

### Tarea 4: Discusión y Conclusiones generales

El estudio de la convección natural tiene muchas aplicaciones prácticas en la ingeniería, ya que permite entender cómo se mueve el calor en sistemas donde no existe ventilación forzada. Gracias al uso de programas como el de este laboratorio, es posible simular y analizar diferentes situaciones sin necesidad de realizar ensayos costosos o peligrosos.

A continuación, se presentan algunos casos donde este tipo de análisis puede ser útil:

1. **Sistemas de enfriamiento electrónico:** permite diseñar carcasa o disipadores que eliminan el calor de los componentes sin usar ventiladores.
2. **Colectores solares térmicos:** ayuda a mejorar la circulación del fluido caliente dentro del sistema, aumentando la eficiencia del calentamiento del agua.
3. **Hornos industriales:** permite estudiar cómo se distribuye la temperatura dentro del horno para lograr un calentamiento más uniforme.
4. **Fundición de metales:** se puede predecir cómo se enfría un material fundido y así evitar grietas o tensiones térmicas.
5. **Climatización pasiva en edificios:** ayuda a aprovechar el movimiento natural del aire para ventilar y mantener el confort térmico sin gasto eléctrico.
6. **Procesos geotérmicos o volcánicos:** permite analizar cómo se mueve el calor dentro de cámaras subterráneas de magma o suelos calientes.

En resumen, comprender la convección natural es clave para **diseñar sistemas más eficientes y seguros**, tanto en la industria como en aplicaciones energéticas y ambientales.

## 6. Conclusión

Este laboratorio permitió observar de manera práctica cómo el número de Prandtl influye en la convección natural dentro de un recinto cerrado. A través del programa computacional se analizaron distintos fluidos y se comprobó que, al aumentar la viscosidad, el movimiento del fluido disminuye y la transferencia de calor se vuelve principalmente por conducción.

Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría y con estudios previos, mostrando que el comportamiento del flujo y la distribución térmica dependen directamente de las propiedades del fluido y de los números adimensionales involucrados.

Este análisis refuerza la importancia de la simulación numérica como herramienta para comprender y aplicar los fenómenos de transferencia de calor en distintos campos de la ingeniería.

## 7. Bibliografía

- Banaszek, J., Kladnik, A., & Majchrzak, E. (1999). *Numerical study of natural convection in a square cavity with differentially heated side walls*. *Heat Transfer Engineering*, 20(3), 19–28. <https://doi.org/10.1080/104077899274624>
- Zambra, C. E., González-Olivares, L., González, J., & Clausen, B. (2022). *Temporal evolution of cooling by natural convection in an enclosed magma chamber*. *Processes*, 10(1), 108. <https://doi.org/10.3390/pr10010108>
- StudySmarter. (s.f.). *Transferencia de calor por convección: conceptos y ejemplos*. Recuperado de <https://www.studysmarter.co.uk>
- ScienceDirect. (s.f.). *Natural Convection and Heat Transfer Fundamentals*. Recuperado en junio de 2025 de <https://www.sciencedirect.com>