

03073



**Universidad Nacional Autónoma
de México**

**UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS
PROFESIONAL Y DE POSGRADO DEL
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES**

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA

**ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE
CONVECCION NATURAL EN
FLUIDOS ESTRATIFICADOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ENERGIA SOLAR
(OPCION FOTOTERMICA)
PRESENTA:

RAMON TOVAR OLVERA

DIRECTOR DE TESIS: DR. FRANCISCO E. AVILA SEGURA

TEMIXCO, MOR.

DICIEMBRE, 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	iv
NOMENCLATURA	v
RESUMEN	vi
OBJETIVO	viii

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES 1

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
2.1 Planteamiento teórico del problema	7
2.2 Descripción física del problema con fluidos estratificados	15
2.3 Planteamiento numérico del problema	17

3 DISEÑO EXPERIMENTAL	24
3.1 Diseño de una cavidad experimental	25
3.2 Criterios para establecer los casos de estudio	27
3.3 Instrumentación	28
3.4 Calibración de los instrumentos	29
3.5 Preparación de los experimentos	31

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
4.1 Perfiles iniciales de concentración salina	35
4.2 Tiempo de calentamiento de la pared caliente	37
4.3 Evolución global de las temperaturas en el seno de la cavidad	38
4.4 Características globales de la velocidad de avance promedio de las intrusiones térmicas.....	40
4.5 Influencia de la concentración inicial en la altura a la cual se desplaza la intrusión térmica inferior	43
4.6 Oscilaciones térmicas e hidrodinámicas temporales	45
4.7 Evolución de la distribución de la concentración salina al final del experimento	50
5 RESULTADOS NUMÉRICOS	52
5.1 Descripción y discusión de los resultados numéricos globales para el caso de alta concentración y pared vertical (caso A90)	53
5.2 Oscilaciones en ambos estratos	67
5.3 Influencias generales del ángulo de inclinación	82
5.4 Influencias de la concentración inicial	84
6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	95
6.1 Comparación de parámetros relevantes al flujo	97
6.2 Conclusiones	101
REFERENCIAS	104
ANEXOS	

OBJETIVO:

Estudiar experimental y numéricamente las características globales que presenta el fenómeno de convección natural en fluidos estratificados en una cavidad, que puede tener una pared inclinada, cuando existe un cambio súbito de temperatura en una de sus paredes (pared caliente). Se desea investigar dicho problema para diferentes inclinaciones de la pared caliente y para diferentes concentraciones del estrato inferior, manteniendo fijos el espesor de los estratos, el aumento en la temperatura (ΔT), el tiempo real en que se lleva a cabo el aumento de temperatura, etc.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** Condiciones iniciales y de frontera del caso tratado por Patterson & Imberger.
- Figura 2.2** Sistema de doble capa límite para el caso de convección natural en un fluido homogéneo.
- Figura 2.3** Evolución teórica de la capa límite térmica y la intrusión térmica horizontal.
- Figura 2.4** Diagrama en el que se muestra en caso en estudio.
- Figura 2.5** Condiciones iniciales y de frontera correspondientes a la cavidad rectangular.
- Figura 2.6** Arreglo de la malla numérica.
- Figura 2.7** Gráfico de la malla numérica que se utiliza para los casos de pared vertical.
- Figura 2.8** Esquema que muestra la simulación de una pared inclinada mediante el artificio de porosidades.
-
- Figura 3.1** Partes principales de la cavidad experimental.
- Figura 3.2** Curva típica de calibración del medidor de conductividad.
- Figura 3.3** Curva experimental para calibración de termopares.
- Figura 4.1** Perfil de concentración salina en la cavidad experimental.
- Figura 4.2** Perfil de concentración salina para el sistema que contiene el estrato inferior de baja concentración.
- Figura 4.3** Temperatura del termopar T_1 como función del tiempo.
- Figura 4.4** Diagrama de colocación de termopares para el Caso A90.
- Figura 4.5** Evolución de las temperaturas de los puntos localizados en el interior de la cavidad para los seis casos experimentales.
- Figura 4.6** Cuando se tiene una baja concentración salina en el estrato inferior la intrusión térmica horizontal inferior viaja a una cota más alta.

- Figura 4.7** En la Zona 2 se observaron tanto oscilaciones hidrodinámicas como oscilaciones térmicas
- Figura 4.8** Evolución de la temperatura en dos posiciones cercanas a la pared caliente.
- Figura 4.9** Visualización de las oscilaciones hidrodinámicas.
- Figura 4.10** Posible relación entre ondulaciones hidrodinámicas y oscilaciones térmicas.
- Figura 4.11** Comparación de los perfiles de salinidad antes y después de los experimentos.
- Figura 5.1** Crecimiento de la capa límite térmica superior.
- Figura 5.2** Crecimiento de la capa límite viscosa superior.
- Figura 5.3** La capa límite térmica inferior tiene las mismas características que la capa límite térmica superior.
- Figura 5.4** La capa límite viscosa inferior llega al estado estacionario a los 15 s alcanzando un espesor de 6 mm.
- Figura 5.5** Perfiles de temperatura para $6 < t < 30$ s en $y=44$ mm.
- Figura 5.6** Perfiles de temperatura en $y=35$ mm. Se muestra la formación de la parte inferior de la intrusión térmica horizontal en la región de la intercara difusa.
- Figura 5.7** Evolución global de la temperatura en el Caso A90.
- Figura 5.8** Evolución global de la velocidad en Caso A90.
- Figura 5.9** Evolución global de la concentración salina en el Caso A90.
- Figura 5.10** Perfiles de temperatura correspondiente a $y=97.5$ mm.
- Figura 5.11** Perfiles de temperatura para las cuatro cotas bajo estudio.
- Figura 5.12** Representación euleriana de la evolución de la temperatura en la zona 2.
- Figura 5.13** Evolución de la temperatura en un punto localizado en (20, 97.5)
- Figura 5.14** Distribución de la temperatura en la zona 2. En esta zona existe una gran complejidad de la respuesta térmica.

- Figura 5.15** Evolución de la temperatura de puntos localizado en $y=97.5$ a distancias horizontales de 20, 60 y 120 mm.
- Figura 5.16** Evolución de la temperatura para puntos localizados en $y=44$ mm a distancias horizontales de 20, 60 y 120 mm.
- Figura 5.17** Perfiles de velocidad U1 en la cota $y=97.5$ mm localizada en el estrato superior, aquí se muestra el avance de una onda interna.
- Figura 5.18** Perfiles de la componente vertical de la velocidad V1 correspondientes a $y=97.5$ mm.
- Figura 5.19** Evolución de la componente horizontal de la velocidad para un punto de coordenadas (21, 97.5)
- Figura 5.20** Evolución de los perfiles de la componente horizontal de la velocidad U1 correspondientes a $y=44$ mm.
- Figura 5.21** Evolución puntual de la componente U1 de la velocidad. Las trazas (a), (b), y (c), corresponden a puntos ubicados en $y=44$ mm con distancias horizontales de 20, 60 y 120 mm respectivamente.
- Figura 5.22** Evolución global de la temperatura en el Caso A60.
- Figura 5.23** Evolución global de la velocidad en el Caso A60.
- Figura 5.24** Evolución global de la concentración salina en el Caso A60.
- Figura 5.25** Evolución global de la temperatura en el Caso B90.
- Figura 5.26** Evolución global de la velocidad en el caso B90.
- Figura 5.27** Evolución global de la concentración en el Caso B90.
- Figura 5.28** Evolución global de la temperatura en el Caso B60.
- Figura 5.29** Evolución global de la velocidad en el Caso B60.
- Figura 5.30** Evolución global de la concentración salina en el Caso B60.
- Figura 6.1** Comparación de la evolución de la temperatura en puntos localizados en el trayecto de la intrusión térmica superior del Caso A90.
- Figura 6.2** Comparación de las historias de temperatura para puntos localizados en la zona por donde viaja la intrusión térmica inferior.

NOMENCLATURA

A	Razón de aspecto
Cp	Calor específico
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de la cavidad
k	Conductividad térmica
l	Longitud de la cavidad
p	Presión
Ra	Número de Rayleigh
T	Temperatura
t	tiempo
U	Componente horizontal de la velocidad
V	Componente vertical de la velocidad

Propiedades físicas del agua.

Densidad	ρ	998	kg/m ³
Conductividad térmica	k	0.59	W/m K
Viscosidad cinemática	ν	$8.8 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Coefficiente de expansión térmica	β	$2.9 \cdot 10^{-4}$	1/K
Calor específico	Cp	$4.18 \cdot 10^3$	J/kg K
Coefficiente de difusión térmica	α	$1.42 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Número de Prandtl	Pr	6.2	
Coefficiente de expansión salina		$6.8 \cdot 10^{-4}$	

Resumen.

Se presenta un estudio experimental y numérico de la convección natural de dos fluidos miscibles estratificados dentro de una cavidad que inicialmente están en reposo y en equilibrio térmico. El movimiento es originado por el calentamiento de una de las paredes laterales de la cavidad (pared caliente). La estratificación se consigue mediante la superposición de una capa de agua sobre una de salmuera.

Se analiza la evolución transitoria de los eventos característicos del fenómeno como el crecimiento de las capas límite verticales, la evolución de las capas de intrusión térmica horizontal, la transferencia de calor global, la estabilidad del sistema estratificado y las oscilaciones térmicas e hidrodinámicas. En particular se estudian las influencias que pueden tener en la evolución del fenómeno el ángulo de inclinación de la pared caliente y la concentración salina inicial del estrato inferior. Este estudio encuentra posibles aplicaciones, entre otras, en la formación y operación de estanques solares.

En la parte teórica se revisa el análisis de escalas realizado por Patterson e Imberger para la convección natural de un fluido homogéneo, de esta manera se obtienen para efectos de comparación las escalas características del fenómeno en estudio. Para llevar a cabo el trabajo experimental se desarrolló y se instrumentó una cavidad especial. Este cavidad contiene un doble fondo utilizado para preparar la estratificación de los fluidos; contiene también un intercambiador de calor con el cual a través de una pared metálica se suministra calor al interior de la cavidad; el intercambiador es abatible para poder cambiar la inclinación de la pared caliente de un experimento a otro. En el interior de la cavidad se colocan una serie de termopares y un sistema de inyección de tinta para monitorear la evolución global del fenómeno. La simulación numérica se realiza mediante la utilización del código comercial PHOENICS.

Desde un punto de vista global, experimentalmente el flujo se comporta de la misma manera sin importar el valor de la concentración salina del estrato inferior ni del ángulo de inclinación de la pared caliente.

Sin embargo, el flujo presenta ciertas características particulares, por ejemplo se observó que en todos los experimentos la intrusión térmica del estrato superior aventaja a la intrusión térmica del estrato inferior en su avance hacia la pared opuesta; la cota por la cual viaja la intrusión térmica inferior se ve afectada por la concentración salina, así entre menor sea el grado de concentración es mayor la altura por donde viaja la intrusión térmica inferior; además se presentaron en todos los casos tanto oscilaciones térmicas como hidrodinámicas; se observa también un ensanchamiento de la intercara difusa debido a los movimientos convectivos que se desarrollan en el transcurso del experimento.

En los resultados numéricos se puede observar además de la evolución global del flujo, detalles como el crecimiento de las capas límite, el crecimiento y avance de las capas de intrusión térmica, y las oscilaciones térmicas e hidrodinámicas. En los casos con pared inclinada la evolución del fenómeno es más rápida que para los casos de pared vertical. Aquí también se observa que la intrusión térmica superior adelanta a la intrusión térmica inferior y que la intrusión térmica inferior viaja a una mayor altura en los casos de baja concentración salina.

Al final del trabajo se comparan los resultados experimentales con los resultados numéricos encontrando concordancia especialmente para el caso de pared vertical. A su vez, estos resultados concuerdan con las escalas características obtenidas teóricamente.

En ambos resultados se observa lo que se ha llamado mezclado no difusivo especialmente para el caso de baja concentración y pared inclinada. Esto ocasiona cierta erosión de la intercara difusa que se manifiesta como un ensanchamiento de la misma a lo largo del periodo que duran los experimentos.

1 ANTECEDENTES

Los procesos de convección natural involucran transferencia de energía y masa y pueden ser de gran relevancia en cuanto a sus aplicaciones. Por ejemplo, podemos citar el calentamiento o enfriamiento de edificios, obtención de calor por medio de colectores solares y estanques solares, y obtención de agua potable a partir de agua de mar.

Aunque grandes científicos como Rayleigh, Reynolds, Helmholtz y Prandtl, entre otros, han contribuido enormemente en cuanto al conocimiento de los fenómenos básicos que presenta el flujo de fluidos, aún existe una gran necesidad de experimentación dado que ese conocimiento se tiene para geometrías y condiciones de frontera simplificadas, no así en las aplicaciones en donde muchas veces, antes de realizar un importante gasto de recursos, es necesario modelar experimental o numéricamente los problemas inherentes al proceso de aplicación para poder predecir el óptimo diseño del mismo.

Los primeros estudios documentados sobre convección natural se remontan a mediados del siglo pasado. Prandtl, Rayleigh y Bénard fueron pioneros en esta rama de la física y a ellos se debe muchas de las relaciones entre los parámetros que gobiernan el flujo convectivo que se usan en nuestros días. En particular el fenómeno de convección natural en cavidades ha sido estudiado bajo diferentes aspectos. Haciendo una breve reseña histórica entre los principales de estos científicos y de sus contribuciones podríamos mencionar a las siguientes figuras:

Prandtl en 1904 descubre la existencia de la capa límite junto a un cuerpo con movimiento relativo al fluido. Rayleigh hizo diversos estudios del movimiento convectivo de fluidos al ser calentados desde alguna de las fronteras; enuncia la condición de que si el número adimensional Ra excede de un valor crítico entonces se presenta el movimiento convectivo. Bénard estudió las estructuras constituidas por celdas convectivas que se forman cuando un fluido en un recipiente es calentado por la parte inferior.

Más recientemente y directamente relacionado con este trabajo, podríamos anotar:

Batchelor (1954) estudió el problema del flujo laminar en una cavidad cerrada, con calentamiento diferencial en las paredes extremas, y con una relación de aspecto A (profundidad/longitud) igual o mayor a la unidad. En este caso, con pequeños números de Rayleigh basados en la altura de la cavidad y pequeños gradientes horizontales de temperatura, se encontró que el modo principal de transferencia de calor es por conducción.

Para el mismo problema, Gill (1966) hizo un estudio con una razón de aspecto fija mayor que la unidad ($A > 1$) y un número de Rayleigh grande, resultando la formación de capa límite que es responsable del flujo, dominando la convección el proceso de transferencia de calor.

Cormack, Leal & Imberger (1974) determinaron que con un número de Rayleigh fijo y una razón de aspecto suficientemente pequeña, la conducción domina otra vez la transferencia de calor en la cavidad. El movimiento del fluido se lleva a cabo localmente cerca de las paredes laterales, y no existe un flujo global que involucre el seno del fluido.

Estos trabajos fueron realizados a intervalos de tiempo relativamente grandes entre ellos y presentan una característica en común: tratan un problema específico con condiciones restringidas para todos los números adimensionales que gobiernan el problema y concluyen al final un solo modo de transferencia de calor. Patterson & Imberger (1980) trataron el problema de la convección natural en una cavidad con calentamiento diferencial lateral para un rango muy grande de valores del número de Rayleigh (para los casos con $Pr > 1$ y $A > 1$), de manera que no solamente encuentran los modos básicos que dominan la transferencia de calor en este tipo de problemas (conducción, convección y transición) sino que subdividen, en regiones los modos de transición y convección basándose en los órdenes de magnitud de combinaciones de los números adimensionales de gobierno. Patterson & Imberger (en adelante P&I) presentan una descripción detallada del flujo dentro de la cavidad en su evolución al estado estacionario.

La importancia de la clasificación de P&I proporcionar valores numéricos, al menos como órdenes de magnitud, que definen el límite entre regiones y subregiones. Subdivide cada una de estas regiones de acuerdo con valores de tiempos característicos describiendo de acuerdo a éstos las características que presenta el flujo convectivo en su evolución hacia el estado estacionario. Estado estacionario vía decaimiento de oscilaciones, por formación de capas horizontales, etc.

Fue el carácter oscilatorio del movimiento uno de los motivos que despertó más interés en otros investigadores, debido a que la explicación dada por estos autores acerca del origen de las oscilaciones no fue del todo aceptada (causó controversia entre otros investigadores).

Así, el trabajo de Patterson e Imberger, causó que otros autores, trataran de comprobar o refutar las conclusiones de su trabajo. Yewell *et al.* (1982) trataron inútilmente de reproducir experimentalmente las oscilaciones arriba descritas por Patterson & Imberger implicando con ello lo equivocado de aquellas predicciones.

Patterson (1984) explica que Yewel *et al.* no consideraron correctamente el criterio de selección del Ra_c cuando cambia la razón de aspecto, y por eso con las condiciones experimentales que Yewel *et al.* utilizaron no ocurriría el comportamiento oscilatorio descrito en su clasificación. Sin embargo, hace una división más detallada y cuidadosa en su clasificación original de los patrones de flujo y de los modos de transferencia de calor para las posibles condiciones experimentales, enumerando dentro de su región original seis valores críticos más del número de Rayleigh que describen de una manera cualitativa la evolución del flujo haciendo más fina su primera clasificación y dándole un carácter más detallado.

Ivey (1984) realizó una serie de experimentos en una cavidad de razón de aspecto unitaria y un número de Rayleigh elevado, estudió las oscilaciones hidrodinámicas y midió en posiciones estratégicas la amplitud y periodo de las oscilaciones térmicas; sugirió que el comportamiento oscilatorio cerca de las esquinas de la cavidad se debe a la inercia del flujo que entra desde la capa límite vertical hacia la capa de intrusión horizontal ocasionando un salto hidráulico.

Schladow (1989) estudió numéricamente el fenómeno convectivo para las condiciones experimentales de Ivey, atribuyendo las oscilaciones de periodo corto a inestabilidades de la capa límite y las de periodo largo a la inclinación que adoptan las isotermas conforme se efectúa la convección; allí mismo contradice la existencia de un salto hidráulico.

Patterson y Armfield (1990) retoman la discusión tratando el caso estudiado por Ivey, discuten en detalle la presencia de fenómenos ondulatorios inestables dentro de la capa límite vertical y su efecto en la capa de intrusión térmica horizontal alimentada por la capa límite térmica. Este trabajo numérico-experimental concluye, obviamente, que las explicaciones dadas en el trabajo original de Patterson & Imberger son las correctas, agregando solamente la idea de lo que ellos denominan "apilamiento de las isotermas".

Todos estos trabajos han servido de referencia a los trabajos que sobre convección natural se han venido realizando en el CIE, ya que los estudios de convección natural en cavidades han sido línea de investigación de la ahora Coordinación de Transferencia de Energía y Masa. Antecedentes a esta tesis varias otras en las que se han tratado temas afines. Entre ellas podríamos mencionar las siguientes:

Poujol hizo un trabajo numérico y experimental (1991) de la convección natural en estado transitorio para números de Rayleigh de 8.4×10^8 y 6×10^9 con un número de Prandtl del orden de 1×10^2 . Las características experimentales fueron: flujo de calor constante en la pared caliente, temperatura de la pared fría constante e igual a la inicial y una cavidad con paredes verticales. Los patrones de flujos obtenidos numéricamente con el código PHOENIX se asemejan cualitativamente a los patrones de flujo obtenidos experimentalmente a través de digitalización de imágenes, y se hace una amplia descripción del movimiento del vórtice generado en el seno del líquido. A este estudio siguió un estudio numérico paramétrico en el que el flujo de calor se hace variar dentro de un orden de magnitud (1992). Finalmente, Poujol *et al.* (1993) hicieron un modelo que describe con razonable exactitud la transferencia de calor en estado transitorio y se basa en el análisis de escalas de Patterson & Imberger.

Cuevas (1991), realizó un estudio teórico y experimental de la convección natural en una cavidad rectangular con una pared inclinada fija conteniendo dos fluidos estratificados. Aquí se muestra con fotografías el movimiento global de los estratos, la existencia de una zona intermedia no convectiva y las zonas superior e inferior convectivas, tales observaciones indican un comportamiento similar al de los estanques solares. Discute sus observaciones experimentales a la luz de datos numéricos que obtuvo para una cavidad con pared vertical.

Vargas (1992) presentó un trabajo similar al de Poujol (1991), pero con un flujo de calor variable. Aquí se hace un estudio numérico y experimental sobre las velocidades de las capas de intrusión térmica, encontrando una buena concordancia cualitativa y cuantitativa entre resultados numéricos y experimentales. Concluyó que el transporte de calor es relativamente simple a pesar de la complejidad dinámica del flujo en estado transitorio.

Rojas y Ávila (1993) especularon sobre el efecto de mezclado en un flujo estratificado en el mismo tipo de problema cuando la concentración del estrato inferior tiende a cero. Hicieron un estudio numérico para investigar el posible efecto de la concentración inicial sobre la dinámica de un flujo estratificado, en donde se compara el caso de un doble estrato (agua-salmuera) cuyo estrato inferior es de poca salinidad (0.3%), contra el caso en que el estrato inferior es de mayor salinidad (10%). Los dos efectos más importantes que se producen para el primer caso son: un desplazamiento vertical de salmuera junto a la pared caliente y una menor velocidad de avance de la intrusión térmica horizontal inferior con respecto a aquella en el estrato superior. Para el segundo caso se tienen efectos cualitativos diferentes, no hay intrusión vertical y la intrusión térmica inferior tiene mayor velocidad de avance con respecto a aquella en el estrato superior. Parte de este trabajo es el estudio experimental de esta posible influencia (concentración inicial) con el objeto de marcar un límite en las concentraciones del estrato inferior para evitar dicho efecto. Posteriormente ampliaron el estudio para una cavidad de pared inclinada (1995).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la sección 2.1 se presenta el tratamiento teórico de la convección natural de un fluido homogéneo dentro de una cavidad rectangular hecho por Patterson & Imberger (1980). El mismo planteamiento se aplica en este estudio (por lo menos en lo referente a la magnitud de los parámetros característicos del flujo) durante la parte transitoria del fenómeno hasta que las intrusiones térmicas llegan a la pared opuesta. En la sección 2.2 se describen las características físicas del problema bajo estudio. En la sección 2.3 se describe la estrategia numérica utilizada

2.1 Planteamiento teórico del problema.

El estudio hecho por P&I (1980) trata del análisis de escalas para un caso típico de convección natural en una cavidad con calentamiento lateral en el que se estudia la evolución del flujo hacia el estado permanente para $Pr > 1$ y $A \leq 1$.

Estos autores partieron de las ecuaciones que gobiernan al flujo, Tabla 2.1, y de condiciones iniciales y de frontera relativamente simples, Fig. 2.1. Consideran también un sistema bidimensional, con un calentamiento instantáneo en una de las paredes laterales y enfriamiento en la pared opuesta, manteniendo el incremento de temperatura constante a través del tiempo. Aunque no todas las condiciones de frontera coinciden, con nuestro caso, puede considerarse que al menos en la parte transitoria durante la cual la intrusión térmica horizontal alcanza a la pared opuesta sí coinciden ya que en este intervalo el ΔT entre paredes permanece constante. Lo más relevante para este estudio es utilizar los parámetros característicos de P&I como un punto de comparación (considerando los órdenes de magnitud) para establecer que tan bien están nuestros resultados experimentales y numéricos. La Tabla 2.2 muestra aquellos que son relevantes a nuestro estudio.

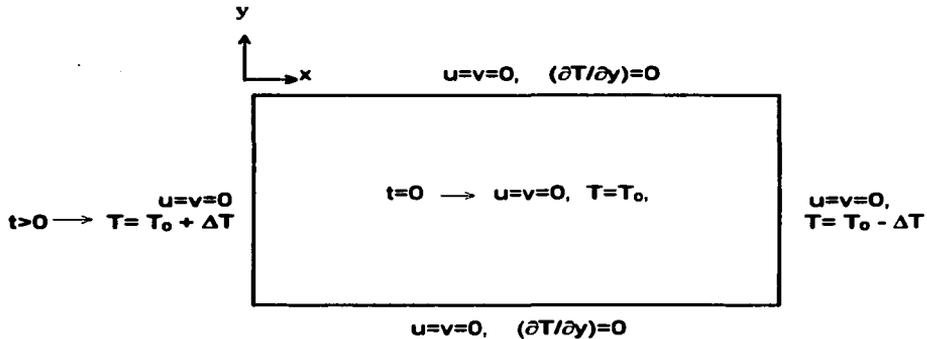


Fig. 2.1 Condiciones iniciales y de frontera del caso tratado por Patterson & Imberger.

Tabla 2.1 Ecuaciones de conservación que se plantean para el problema de convección natural de un fluido homogéneo. La aproximación de Boussinesq se ha aplicado.

Ecuación de continuidad	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$
Ecuación de movimiento en x	$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u$
Ecuación de movimiento en y	$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g\beta(T-T_0)$
Ecuación de energía	$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T$

U, V, son las componentes horizontal y vertical de la velocidad; x, y, son las coordenadas horizontal y vertical; g es la gravedad, ρ es la densidad, ν viscosidad cinemática, α es la difusión térmica y β es el coeficiente de expansión térmica.

Escogiendo escalas características P&I dieron importancia a los términos por órdenes de magnitud y encontraron relaciones para tiempos, velocidades y longitudes características del flujo en función del número de Rayleigh, número de Prandtl, razón de aspecto, y propiedades físicas del fluido. De esta manera lograron una elegante clasificación de la gama de flujos que pueden encontrarse al tender el sistema al estado estacionario. Esta clasificación no sólo divide el fenómeno de transferencia de propiedades en tres grandes grupos: puramente conductivos, puramente convectivos y de transición, sino que subdivide cada uno de ellos en subregiones finamente clasificadas. Uno de los aspectos más relevantes de su investigación y de gran influencia en trabajos posteriores reside en los modos oscilatorios que pueden presentarse, según el orden de magnitud del Ra, Pr, y A, hacia el estado permanente. Debido a la relevancia

del caso tratado por P&I en nuestro propio trabajo, consideramos muy importante comentar someramente su trabajo.

Inicialmente se tiene un fluido en reposo a una temperatura T confinado en una cavidad cerrada. Repentinamente una de sus paredes es calentada a una temperatura $T+\Delta T$, ocasionando que en la región de fluido más próxima a la pared haya transferencia de calor por conducción y se forme una capa de fluido más caliente, denominada **capa límite térmica**, de espesor δ_T que aumenta con el tiempo. El fluido constituyente de esta capa límite posee una densidad menor que el resto del fluido. Durante el inicio de la formación de la capa límite, las fuerzas de flotación compiten con las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, y, si $Pr \geq 1$ se pueden desprestigiar de las fuerzas inerciales. Esto origina que dicha capa de fluido se desplace verticalmente a lo largo de la pared caliente a una velocidad v bajo un balance de fuerzas viscosas y fuerzas de flotación. El fluido en movimiento vertical arrastra consigo a capas adyacentes que aún no han sido calentadas dando origen a una **capa límite viscosa** de un espesor δ_v que aumenta con el tiempo mientras que δ_T no alcance un valor estacionario. De esta manera se forma lo que se conoce como **doble capa límite** en donde una porción de ésta se mueve por efectos de flotación y la otra por efectos viscosos tal como se muestra en la Fig. 2.1. En la doble capa límite, en lo correspondiente al arrastre del fluido por capas adyacentes (parte que continúa a una temperatura inicial y por tanto no presenta fuerzas de flotación) el balance de fuerzas se da entre términos viscosos e inerciales.

A un tiempo $t=\tau$, la doble capa límite adquiere ciertas distribuciones de velocidad y de temperatura ocasionando que la energía térmica que se transfiere horizontalmente por conducción se transporte verticalmente por convección, deteniéndose a ese tiempo el crecimiento del grosor de la capa límite térmica y de la capa límite viscosa. Esto es, la doble capa límite encuentra su espesor estacionario.

Cuando el fluido proveniente de la doble capa límite vertical llega a la superficie, se ve obligado a dar vuelta y descargar horizontalmente. El fluido que sube debido a efectos de flotación descarga en una capa denominada **intrusión térmica horizontal** que se mueve hacia la pared fría (Fig. 2.2). La parte de la doble capa límite que no ha sufrido calentamiento pero que viaja hacia arriba en virtud de los efectos viscosos, se descarga hacia el interior de la cavidad. En el artículo de P&I esta descarga es llamada **descarga de flujo potencial**.

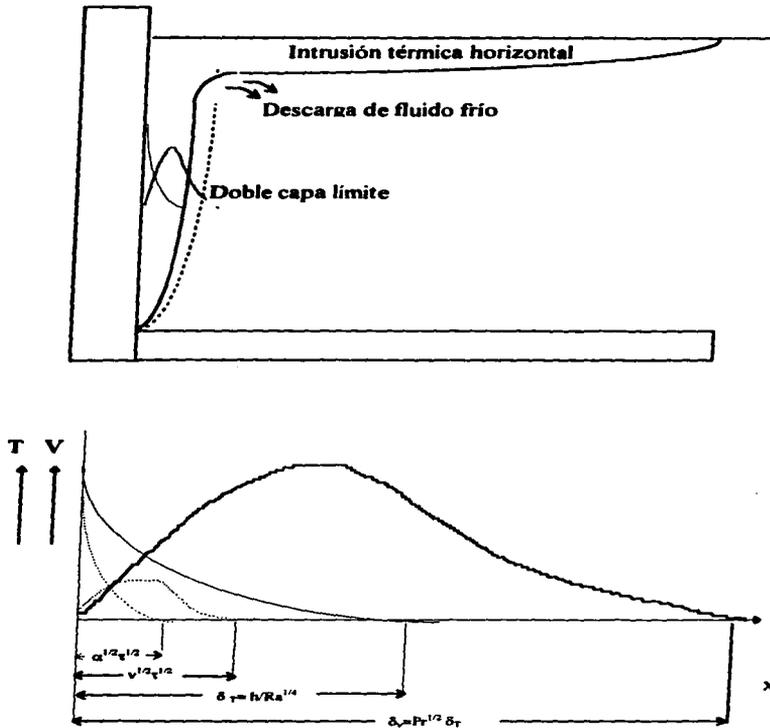


Fig. 2.1 Sistema de doble capa límite para el caso de la convección natural en un fluido homogéneo.

Tabla 2.2 Algunos parámetros característicos relevantes al flujo
obtenidos a partir del análisis de escalas de P&I.

Esesor transitorio de la capa limite térmica δ_T	$\delta_T \sim \alpha^{1/2} t^{1/2}$
Esesor transitorio de la capa limite viscosa	$\delta_v \sim \nu^{1/2} t^{1/2}$
Tiempo para el cual δ_T alcanza su valor estacionario τ	$\tau \sim \frac{h^2}{\alpha Ra^{1/2}}$
Esesor estacionario de δ_T	$\delta_T \sim \frac{h}{Ra^{1/4}}$
Esesor estacionario de δ_v	$\delta_v \sim Pr^{1/2} \delta_T$
Velocidad vertical de la capa limite v	$v \sim \frac{\alpha Ra^{1/2}}{h}$
Esesor de la intrusión de carácter inercial Δ_i	$\Delta_i \sim \frac{h}{Pr^{1/3} Ra^{1/6}}$
Tiempo al cual la intrusión térmica cambia de carácter inercial a carácter viscoso T_t	$T_t \sim \frac{h^2}{\alpha Pr^{3/3} Ra^{1/5}}$
Esesor temporal de la intrusión horizontal (viscosa) Δ_v	$\Delta_v \sim \frac{\alpha^{1/3} h^{3/5} l^{1/5}}{Ra^{1/10}}$
Tiempo en que la intrusión de carácter viscoso alcanza a la pared opuesta T_v	$T_v \sim \frac{l^{3/4} h^{3/4}}{\alpha Ra^{7/16}}$
Esesor de una intrusión de carácter viscoso cuando alcanza a la pared opuesta	$\Delta_v \sim \frac{h^{3/4} l^{1/4}}{Ra^{3/16}}$
Tiempo al cual una intrusión de carácter inercial llega a la pared opuesta	$T_i \sim \frac{l/h}{\alpha Pr^{1/3} Ra^{5/12}}$

h , l , A , Ra y Pr son respectivamente la altura y la longitud de la cavidad, la razón de aspecto, el número de Rayleigh y el número de Prandtl.

El significado de estos parámetros está representado gráficamente en la Fig. 2.3 que a continuación se explica:

- i) Al momento en que todo el calor conducido al interior del líquido es transportado verticalmente por convección δ_T es independiente del tiempo. Esto sucede al tiempo $t=\tau$, cuadro 1.
- ii) El flujo de fluido caliente es entonces constante (Q_{ii}) y alimenta la intrusión térmica horizontal, cuadro 2.
- iii) Para tiempos $t>\tau$ pero “pequeños” el balance entre fuerzas de flotación (representadas ahora como un gradiente de presión horizontal inducido por éstas), fuerzas viscosas, y fuerzas de inercia da por resultado unas fuerzas viscosas despreciables ya que estas últimas están multiplicadas por t . El balance entonces se da entre fuerzas de inercia y de flotación, cuadro 3.
- iv) Resulta que a tiempos mayores, tales fuerzas viscosas ya no resultan despreciables, sino que son del mismo orden de magnitud que las inerciales. Igualando términos viscosos con términos inerciales se obtiene otro tiempo característico relevante llamado T_i , cuadro 4a.
- v) T_i representa un tiempo característico muy interesante ya que a partir de éste puede indicarse si una intrusión térmica será de carácter viscoso o inercial, cuadro 4b. Siguiendo el procedimiento de P&I es muy sencillo llegar a obtener la expresión para el grosor de la capa inercial que se origina para tiempos $\tau<t<T_i$, este es Δ_g .

Es claro que a partir de T_i el carácter de la capa de intrusión queda determinado por un balance entre fuerzas viscosas y de flotación; el orden de magnitud del espesor de una intrusión de carácter viscoso Δ_v puede obtenerse de este balance (ver Tabla 2.2).

- vi) Si la intrusión inercial representada por Δ_g no fuera afectada por efectos viscosos, llegaría a la pared opuesta en un tiempo T_g . Una intrusión de carácter inercial llega a la pared si y sólo si $T_g<T_i$, cuadro 5.
- vii) Por otro lado existe la posibilidad de que una intrusión horizontal inercial llegue a tener un carácter viscoso antes de que la propia capa límite térmica esté completamente formada; esto sucedería siempre que $T_i<\tau$, o equivalentemente $Ra<Pr^{10}$. Por tanto una intrusión inercial penetrará a lo largo de la cavidad, al menos por un trecho, si $Ra>Pr^{10}$ (nuestro caso). O en

otras palabras, siempre que $Ra > Pr^{10}$ va a existir una parte del trayecto en el que la intrusión térmica tendrá un carácter inercial.

viii) Una intrusión viscosa viajando hacia la pared fría se ensancha hasta un grosor Δ_v y la toca a un tiempo $t = T_v$, cuadro 6.

Todos los incisos de arriba con excepción de (vii) están basados en que $Q_H = cte$ y esto implica que el tiempo característico de formación de la capa límite térmica, τ es menor que las escalas de tiempos relevantes para la intrusión térmica horizontal.

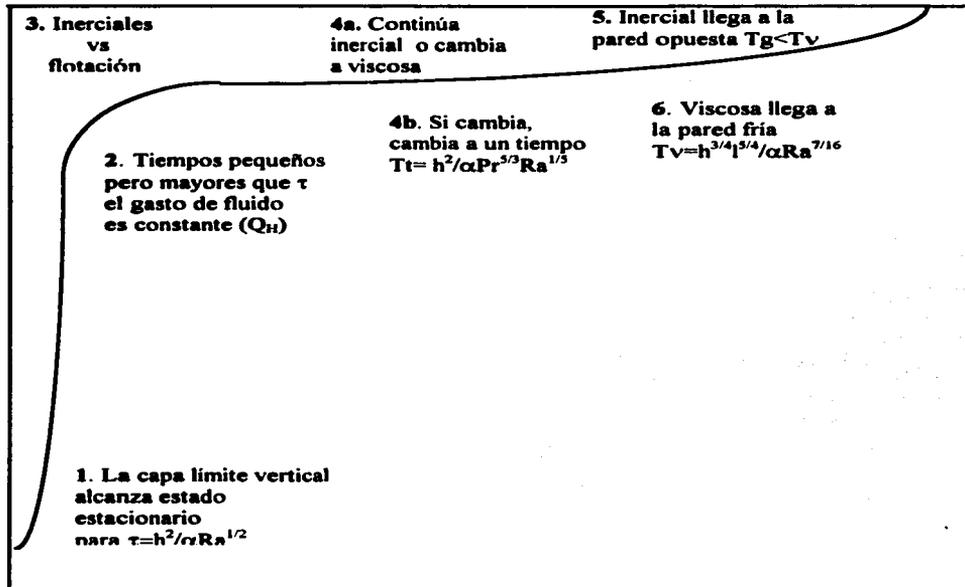


Fig. 2.3 Evolución de la convección natural en el caso de un fluido homogéneo. Para la explicación de cada recuadro ver texto.

2.2 Descripción física del problema con fluidos estratificados.

El problema tratado en esta tesis se refiere a un estudio bidimensional de la convección natural de dos líquidos miscibles estratificados que inicialmente se encuentran en reposo y en equilibrio térmico dentro de una cavidad. Los movimientos convectivos se originan debido a cambios de densidad de los fluidos causados por un incremento de temperatura en una de las fronteras denominada pared caliente. Nuestro problema consiste en conocer, a través de experimentación y simulación numérica, la evolución de la temperatura, la velocidad y la concentración salina en el tiempo en que las intrusiones térmicas llegan a la pared opuesta. Además se describen las oscilaciones que aparecen durante este periodo.

La cavidad del problema en estudio es rectangular. Se puede cambiar la geometría variando la inclinación de la pared caliente y de esta manera analizar su posible influencia en la dinámica del proceso. Las características particulares de la cavidad se especifican en el siguiente capítulo.

La configuración inicial de los fluidos es la siguiente: en la parte superior de la cavidad se tiene un estrato homogéneo de agua; en la parte intermedia una zona de fuerte gradiente salino, lo más delgada posible; y en la parte inferior un estrato de salmuera. A esta configuración aquí se le denomina perfil inicial de concentración salina, (en adelante **perfil inicial**). Se tiene la posibilidad de formar diferentes perfiles iniciales variando la concentración del estrato inferior y así analizar su influencia en el fenómeno.

El fenómeno convectivo se inicia en la cavidad cuando la pared caliente se somete a un aumento súbito de temperatura (tipo función escalón). Debido a este calentamiento se forma para cada estrato, en la parte cercana a la pared caliente, una capa límite que alimenta a la correspondiente intrusión térmica horizontal aquí denominada **intrusión térmica superior** e **intrusión térmica inferior** (según sea el caso). Cada intrusión térmica horizontal evoluciona

de manera particular en su avance hacia la pared opuesta. La evolución de las capas de intrusión y la evolución global del fenómeno hacia el estado permanente se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.4.

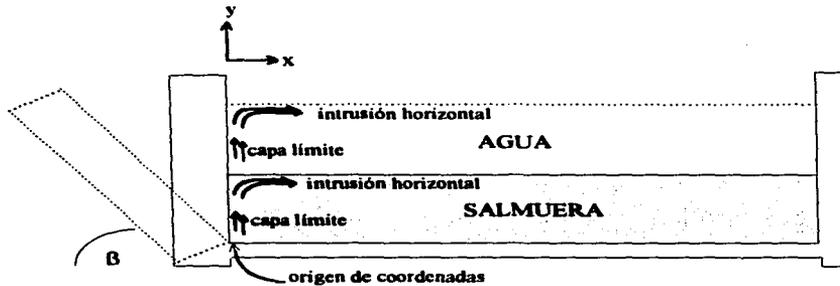


Fig. 2.4 Diagrama en el que se muestra el caso en estudio. En la parte cercana a la pared caliente se forma una capa límite térmica en cada estrato. Las capas límite térmicas descargan en dos capas de intrusión térmica horizontal.

2.3 Planteamiento numérico del problema.

Con el objeto de resolver numéricamente las ecuaciones de conservación anotadas en la Tabla 2.1 se utilizó el código comercial PHOENICS (Parabolic or Hiperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series). Este código utiliza el esquema de volumen finito para discretizar las ecuaciones de conservación. Las ecuaciones algebraicas que de ahí resultan se resuelven empleando el método iterativo SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised). Este código ha sido usado ampliamente en el ahora Centro de Investigación en Energía y existen varios trabajos que explican en detalle su funcionamiento. Ver por ejemplo la tesis de Sámano (1989), Poujol (1990) y Vargas (1991). A continuación se explican someramente los puntos principales de este código y su empleo en nuestro caso particular.

2.3.1 Código numérico utilizado.

El programa PHOENICS cuenta con dos programas principales y cuatro auxiliares. EARTH es el programa medular que resuelve las ecuaciones de conservación. Las condiciones que describen el problema y los criterios de operación seleccionados de acuerdo a nuestro problema particular son especificados en un archivo denominado Q1, este archivo distingue en particular cada problema por resolver y se escribe en el lenguaje PIL (PHOENICS INPUT LANGUAGE).

Las propiedades físicas de los fluidos involucrados (α , β , μ , ρ , etc.), las condiciones geométricas, las condiciones iniciales y de frontera, así como también algunas condiciones de operación del programa como el paso de tiempo, los términos de las ecuaciones de balance involucrados en la solución y el formato de escritura de los resultados es información que se encuentra en el Q1. Este archivo puede ser leído por el programa intérprete SATELLITE que a su vez lo traduce a un lenguaje computacional que puede ser leído por el programa EARTH que finalmente resuelve el problema. Los resultados numéricos son anotados en

archivos designados por el usuario, denominados PHIDA's. El listado del archivo medular Q1 para el caso de pared vertical y pared a 60° se da en el Anexo 1.

Los tres programas auxiliares que permiten visualizar los resultados y que fueron utilizados en este trabajo son PHOTON, AUTO PLOT y PINTO.

PHOTON. Con este programa se realiza la graficación de las variables y cuenta con una gran número de posibilidades en cuanto a la representación de las variables. En este trabajo se han escogido isolíneas para representar las distribuciones de temperatura y concentración.

AUTO PLOT. Permite graficar cualquier variable con respecto a posición o a tiempo.

PINTO. Permite cambiar el tamaño de las celdas respetando la topología general de la malla. Se recurre también a este programa para lograr una representación vectorial de la distribución de velocidades.

2.3.2 Condiciones iniciales y de frontera.

Las condiciones iniciales para $t=0$ en $0 < x < l$, $0 < y < h$ son:

$$T=25 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad U=0, \quad V=0,$$

donde h y l tienen el significado que se les da en la Fig. 2.5. Estas condiciones se anotan en el Q1 por medio de la instrucción FINITA.

Las condiciones de frontera en la cavidad rectangular son las siguientes:

$$\text{Para } x=0 \longrightarrow u=0, \quad v=0$$

$$\text{Para } x=l \longrightarrow u=0, \quad v=0, \quad \partial T / \partial x=0$$

$$\text{Para } y=0 \longrightarrow u=0, \quad v=0, \quad \partial T / \partial y=0$$

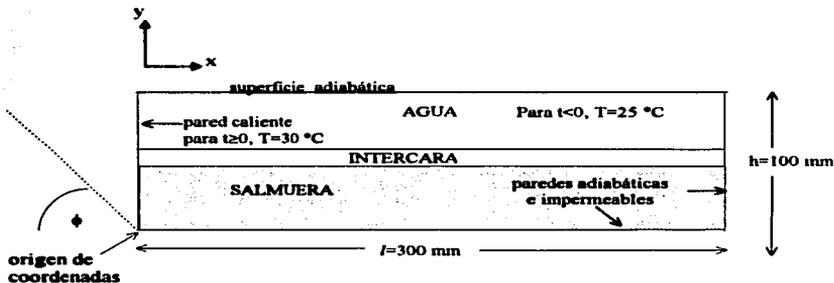


Fig. 2.5 Condiciones iniciales y de frontera correspondientes a la cavidad rectangular.

En Q1 la condición de frontera sólida se logra utilizando un artificio numérico denominado porosidad que indica lo permeable que es una frontera en cuanto al transporte de cantidad de movimiento, energía y masa. En nuestro caso particular la porosidad se iguala a cero en los límites del dominio por medio del comando CONPOR. La condición de no-deslizamiento en las paredes de la cavidad se logra asignando la velocidad $V_1=0$ y $U_1=0$ a través de la combinación de los comandos PATCH, COVAL, EWALL WWALL y SWALL, comandos que se utilizan para asignar velocidad igual a cero en las caras este, oeste y sur de las paredes de la cavidad.

2.3.3 Malla numérica y paso de tiempo.

Como los gradientes tanto de temperatura como de velocidad son mayores en ciertos lugares, ahí es necesario afinar la malla. Para esto se implementó una malla que contiene 18 regiones habiéndose colocado las celdas más finas en la parte cercana a la pared caliente por donde viajan las capas límite verticales, y en los dos lugares por donde viajan las intrusiones térmicas horizontales. La malla tiene dos regiones en la dirección x y nueve regiones en la dirección y .

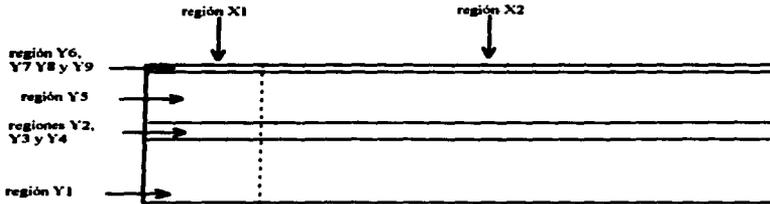


Fig. 2.6 Arreglo de la malla numérica que cuenta con 300 celdas en la dirección x y 124 celdas en la dirección y.

En la dirección y las celdas están distribuidas de la siguiente manera:

Región	Ubicación	Número de celdas	Altura de cada celda	Altura de cada región
Y1	(NY=1, NY=44)	44	1.0	44.00
Y2	(NY=45, NY=48)	4	0.5	2.00
Y3	(NY=49, NY=66)	18	0.25	4.50
Y4	(NY=65, NY=68)	4	0.5	2.00
Y5	(NY=69, NY=109)	41	1.0	41.00
Y6	(NY=110, NY=111)	2	0.5	1.00
Y8	(NY=112, NY=118)	7	0.25	1.75
Y9	(NY=121, NY=124)	4	0.0625	0.25
			Altura total	96.5 mm

En la dirección x las 300 celdas están distribuidas de la siguiente manera:

región X1	(NX=1, NX=193)	193 celdas de 0.3 mm	57.9 mm
región X2	(NX=194, NX=300)	107 celdas de 2.2626 mm	242.1 mm
		longitud horizontal total	300.0 mm



Fig. 2.7 Gráfico de la malla numérica que se utiliza para los casos de pared vertical.

Para simular la pared inclinada a 60° en un malla ortogonal primero se dio dimensiones a las celdas de manera tal que sus diagonales formen este ángulo. Todas las celdas que quedan detrás de la pared caliente tienen las condiciones de impermeabilidad (porosidad cero). Las celdas que son cruzadas por la pared caliente contienen el esquema north-south-west que se indica en la Fig. 2.8.

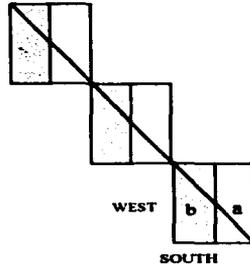


Fig. 2.8 Esquema que muestra la simulación de una pared inclinada mediante el artificio de porosidades. Las celdas aquí mostradas pertenecen, de acuerdo a sus proporciones, a la región X1, Y1.

El estratagema que se aplica a las celdas a y b mostradas en la Fig. 2.8 (celdas representativas) es el siguiente:

```

CONPOR (0.0, SOUTH, a)
CONPOR (0.5, WEST, a)
CONPOR (0.0, SOUTH, b)
CONPOR (0.0, WEST, b)

```

donde a y b dentro de las instrucciones CONPOR representan la posición de las celdas en el esquema general, ver Q1 en el Anexo 1 para las posiciones reales de cada celda. Los valores dados arriba como ejemplo pertenecen a un par de celdas en la región X1, Y1. Obviamente los valores para CONPOR cambian de acuerdo a la región Y en que se encuentren las celdas.

2.3.4 Condiciones iniciales y de frontera especiales.

Ya que en la práctica no se puede llevar a cabo un calentamiento instantáneo ni tener un perfil inicial de concentración salina tipo función escalón para líquidos miscibles, estas dos condiciones fueron impuestas en el esquema numérico a partir de resultados experimentales.

El perfil de concentración inicial en el esquema numérico se toma de un perfil de concentración experimental medido (ver Anexo 2).

El aumento de temperatura de la pared caliente se simula siguiendo una función tangente hiperbólica que se calcula con una de las subrutinas de EARTH llamada GROUND. A medida que pasa el tiempo cada valor de temperatura calculado se asigna en la celda que hace frontera con la pared caliente por medio de las ordenes PATCH, COVAL y CELL.

Estas dos condiciones hicieron que a penas se aplicaran en el esquema numérico, los resultados de éste coincidieran satisfactoriamente con los resultados experimentales.

3 DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el diseño experimental que pretende aproximarse a las condiciones establecidas en el planteamiento del problema bajo estudio. En la Sección 3.1, se hace la descripción general del problema; en la sección 3.2 se describe el diseño del dispositivo principal, en cuyo interior se llevan a cabo los fenómenos convectivos. En esta sección también se comentan las bondades de este dispositivo. En la Sección 3.3 se delimitan los casos particulares para nuestro estudio experimental mientras que en las Secciones 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente se comenta lo referente a los aparatos de medición, su calibración y el manejo de datos obtenidos. Finalmente en la Sección 3.7 se explica la metodología para la preparación de las corridas experimentales.

3.1 Diseño de una cavidad experimental.

Para llevar a cabo los experimentos, lograr la formación de los estratos y cambiar de inclinación una de las paredes, se diseñó y construyó una cavidad especial. La fig. 3.1 muestra un diagrama esquemático de la cavidad. Hay dos componentes de la cavidad que requieren una descripción en detalle, la pared izquierda que forma parte también de un intercambiador de calor, y el fondo que es a la vez depósito y difusor para el fluido mas denso. Las dimensiones interiores globales de la cavidad experimental cuando se usa en la configuración de paredes paralelas son: 33.5 cm a lo largo, 15 cm de altura y 19 cm de profundidad. En un experimento real los dos estratos alcanzan 10 cm de altura como máximo.

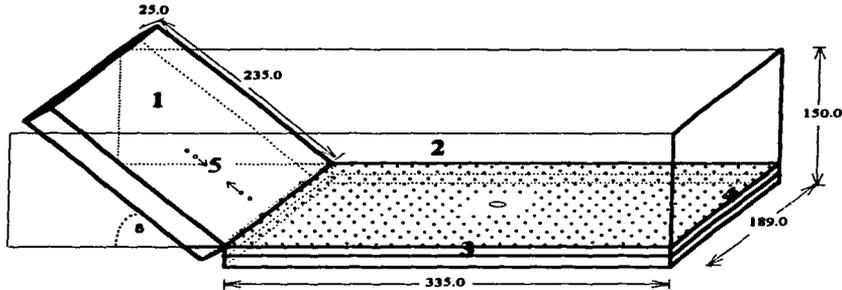


Fig. 3.1 Cavidad experimental. 1. intercambiador de calor que contiene una pared de acero inoxidable (pared caliente), 2. Volumen interior en el cual se forman los estratos, 3. Depósito-difusor, 4. Pared opuesta (pared fría), 5. Orificios por donde se inyecta la tinta para visualización

El intercambiador de calor está hecho de placas de acrílico de 12 mm de espesor excepto la pared que sirve para la transferencia de calor que está hecha de acero inoxidable para evitar corrosión y tiene 0.9 mm de espesor. Esta pared funciona como la pared caliente de la cavidad. El volumen interior del intercambiador de calor es de aproximadamente 750 cm³ de tal manera que el agua del baño de temperatura constante pueda moverse rápidamente a través de éste. El intercambiador de calor está sujeto a la base de la cavidad mediante una bisagra a prueba de fugas que facilita cambiar el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal. Dentro del intercambiador de calor hay un arreglo de ductos que conectan un sistema de inyección de tinta a dos pequeñas perforaciones hechas en la pared de metal, localizadas 25 y 75 mm de altura medida desde el fondo. Este arreglo se utilizó para inyectar tinta dentro de las capas límite y observar su movimiento a lo largo de las intrusiones térmicas. Se usó un baño de temperatura constante NSLAB, en serie con el intercambiador de calor para proveer el agua caliente a temperatura constante y mantener la pared caliente a una temperatura fija de 30 °C necesaria para los experimentos.

La base de la cavidad está compuesta de dos placas de acrílico con un pequeño espacio entremedio que hace las veces de "depósito de espera". La placa superior de este depósito tiene 400 orificios de 150 micras de diámetro a través de los cuales el fluido que está en el depósito de espera puede entrar a la cavidad si así se desea. Esta parte es el verdadero piso de la cavidad experimental. El depósito de espera está conectado a un depósito auxiliar que contiene al fluido mas denso a través de un tubo flexible. Se tiene la posibilidad de aumentar la altura del depósito auxiliar para que se aumente la presión hidrostática y de esta manera controlar el flujo hacia el depósito de espera y por tanto hacia la cavidad. Así, como se explica adelante, esta configuración de piso sirve a la vez como depósito para el fluido mas denso mientras se hace la capa superior, y como difusor cuando se está formando la capa inferior.

La pared opuesta (pared fría) de la cavidad está hecha de acrílico de 12 mm de espesor. Las paredes anterior y posterior son de placa de vidrio de 4 mm de espesor; la parte superior de la cavidad se mantiene descubierta, dejando la superficie del estrato superior expuesto a las condiciones ambientales.

3.2 Criterio para establecer los casos de estudio

Existe una variedad muy amplia de experimentos posibles en cuanto a fluidos estratificados ya que hay un gran número de concentraciones que pueden ser estudiadas; además, para cada una de ellas la inclinación de la pared puede variar desde ángulos muy pequeños hasta 90° o más. En nuestro caso se hizo un estudio experimental previo para acotar el rango de concentraciones y de ángulos de pared por estudiar.

La concentración salina se hizo variar hacia valores pequeños considerándose como límite aquél en que visualmente se observa que al llevarse a cabo el calentamiento de la pared caliente se efectúa una entrada de la salmuera en dirección vertical al estrato superior ocupado originalmente por el agua. Este límite se buscó en la cavidad de pared vertical y se utilizó tinta para efectuar la visualización. El rango de concentraciones así fijado quedó entre 0.25% y 2.5%.

El rango de ángulos de inclinación de la pared caliente se fijó realizando experimentos que mostraran la existencia de desprendimiento de la capa límite en cualquiera de los dos estratos al efectuar el calentamiento súbito, lo cual ocurrió al abatir la pared a inclinaciones cercanas a 30 grados. El rango así fijado quedó entre 45 y 90 grados.

Tabla 3.1 Selección de los casos en estudio variando la inclinación de la pared y la concentración del estrato inferior.

CASOS DE ESTUDIO		
	AGUA-SALMUERA 2.5%	AGUA-SALMUERA 0.25%
90°	caso A90	caso B90
60°	caso A60	caso B60
45°	caso A45	caso B45

3.3 Instrumentación. A continuación se describe brevemente la manera como se miden las variables de interés que son:

a) Temperatura. El conjunto de termopares instalados en la cavidad empleados para sensar la temperatura se conectan al adquisidor 3852A por medio de una tarjeta y una interface plana de 24 hilos. Más adelante, en el capítulo IV, se muestra esquemáticamente la ubicación de los termopares. El adquisidor 3852A está conectado a una estación de trabajo HP385 que lee los datos de voltaje y los procesa por medio de un polinomio de 3^{er} grado para obtener lecturas en grados centígrados por medio de un programa diseñado en HP VEETEST (Visual Engineering Environment) para este fin. Las lecturas obtenidas son mostradas gráficamente en pantalla y grabadas en un archivo.

b) Salinidad. Se mide con una aparato que utiliza cuatro electrodos para sensar la variación de conductividad eléctrica de la solución según varia la concentración salina. El aparato de medición (MODEL 125 MSCTI, Precision Measurements Engineering Encinitas Ca.) se conecta directamente a un multímetro. Por medio de lecturas de voltaje se puede conocer la concentración salina, ya que la relación entre voltaje y salinidad se conoce por medio de una calibración previa. Las lecturas se utilizan más tarde para obtener gráficamente los perfiles de concentración salina a través de los estratos.

c) Velocidad. Esta variable se refiere a la velocidad promedio de avance de las intrusiones térmicas. Sus valores se estiman con base en los tiempos en los cuales los termopares inmersos en el seno del líquido responden al paso de la intrusión. La distancia entre dos termopares dividida entre el periodo de tiempo comprendido entre la respuesta de uno de esos termopares y el otro, da una estimación de la velocidad promedio en ese tramo.

d) Visualización. Los patrones de flujo que producen los movimientos convectivos de los fluidos, son observados mediante el movimiento de una tinta trazadora que se inyecta desde la pared caliente. La tinta se inyecta a través de pequeñas mangueras que atraviesan el

intercambiador de calor y desembocan en los orificios de la pared caliente. Antes de inyectar la tinta trazadora se hacen pruebas para tratar de igualar su densidad con aquella de los estratos.

3.4 Calibración de los instrumentos.

a) **Medidor de conductividad MSCTI MODEL 125.** La metodología para calibrar el sensor de salinidad es la siguiente: para mediciones de baja concentración (menores de 1% de salinidad) se preparan cuidadosamente muestras testigos de 0, 0.3, 0.5, 0.8 y 1 por ciento de salinidad. El aparato se calibra girando el tornillo de ganancia de tal manera que al medir la muestra de mayor salinidad no sobrepase de 5 volts, ya que el rango de operación es de -5 a 5 volts. Cuando se van a hacer mediciones de mayor salinidad, se utilizan muestras testigo que cubran el rango de medición de salinidad, y al ajustar la ganancia del aparato se asegura que la lectura no sobrepase los 5 volts. De las parejas de datos de voltaje-salinidad se obtiene un polinomio de calibración de tercer grado, como se muestra en la Fig. 3.2.

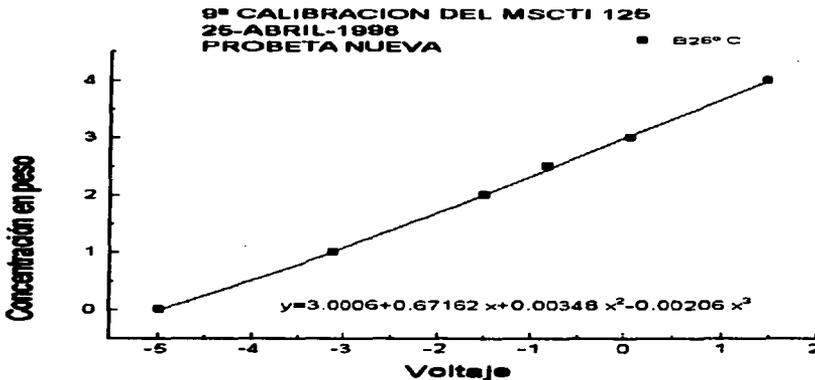


Fig. 3.2 Curva típica de calibración del medidor de concentración salina MSCTI model 125.

b) **Calibración de termopares.** Los termopares se calibran sumergiendo la punta caliente en un baño de temperatura constante y al mismo tiempo se mide el voltaje generado en las puntas restantes del termopar, esta operación se realiza para varios gradientes de temperatura para obtener la curva de calibración.

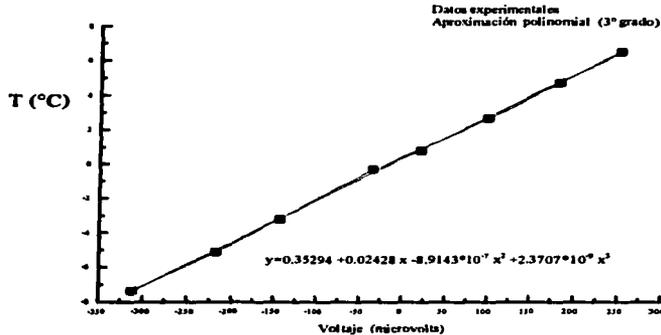


Fig. 3.3 Curva experimental para calibración de termopares. Esta curva se consiguió variando la temperatura de la punta caliente hasta 8° por arriba o por abajo de la temperatura de referencia, en este caso la temperatura ambiente.

En el arreglo experimental los termopares están conectados por un lado a las pistas de cobre de una tarjeta común que sirven de interface al adquiredor HP 3852A; estas conexiones funcionan como uniones de referencia. La punta caliente del termopar se utiliza para sensar puntualmente la temperatura en el seno del fluido dentro de la cavidad.

La temperatura de referencia se obtiene utilizando un termistor montado en la tarjeta de 24 pistas, del cual se puede conocer su temperatura absoluta ya que es una función logarítmica de su resistencia medida en ohms.

3.5 Preparación de los experimentos

a) Colocación de los termopares.

Los termopares se colocan en los lugares en donde se espera que viaje la parte más caliente de la intrusión térmica horizontal. Hay que notar que el espesor de ésta varía a lo largo del eje x, siendo de aproximadamente 17 mm de espesor cerca de la pared caliente y apenas de unos cuantos milímetros de espesor a la mitad de la cavidad en la dirección y. La parte más caliente de la intrusión se encuentra aún mas localizada, con elevados gradientes verticales de temperatura. Por tanto es claro que una adecuada colocación de los termopares es crucial para una correcta interpretación del movimiento de las intrusiones térmicas. Desafortunadamente no hay manera de saber *a priori* con exactitud la posición óptima de cada uno de ellos, debiendo haberse aprendido donde están las posiciones que interceptan a la intrusión térmica en su avance hacia la pared fría mediante un proceso de prueba y error. Si se tiene una colocación inadecuada, el termopar sensará sólo el aumento de temperatura en la zona menos caliente de la intrusión, y este aumento será lento o nulo si el termopar está mal posicionado.

La optimización de la ubicación de los termopares se consigue después de realizar experimentos previos con varios termopares colocados uno sobre otro para verificar el nivel óptimo por donde pasa la intrusión térmica. También se realizaron para este fin experimentos con termopares colocados en varillas que se pueden deslizar verticalmente y así obtener una idea del espesor y ubicación de las capas de intrusión; así se consigue experiencia para encontrar las posiciones óptimas de la trayectoria de la intrusión mencionada. La intrusión además presenta un comportamiento oscilatorio cerca de la pared caliente y hace aún mas difícil su localización.

b) Técnica de formación de intercaras y medición de los perfiles iniciales de concentración salina.

El término intercara se utiliza aquí para definir la frontera entre dos estratos de fluido sobrepuestos, uno más denso que otro. En nuestro caso específico tenemos un estrato de agua destilada sobrepuesto en un estrato de salmuera.

La formación de intercaras involucra el uso de la cavidad que fue construida especialmente para facilitar esta tarea; detalles de su diseño pueden encontrarse en la sección 3.1. La metodología consiste en llenar primeramente el depósito de espera de la cavidad con la salmuera que se usará en el experimento, hasta que queden los orificios llenos hasta el ras del fondo de la cavidad. Enseguida se vierte directa y cuidadosamente agua destilada para formar un estrato de 5 cm. Estando ya puesto el estrato de agua se inyecta salmuera al interior de la cavidad a través del depósito de espera que ahora funciona como depósito-difusor) para que eventualmente se forme el estrato inferior. Este último proceso debe efectuarse muy lentamente de manera que haya un mínimo de mezcla entre estratos cuando la salmuera entra a la cavidad y levanta el estrato de agua.

En experimentos preliminares en los que se buscaba un buen método para la formación de estratos, se visualizaron varias formas de intercaras resultantes. Éstas fueron el resultado de diferentes procedimientos para el llenado de la cavidad, la visualización se hizo agregando un fuerte colorante a la salmuera. Se encontró que la forma que toma la intercara depende no sólo de la velocidad con que se eleva el depósito auxiliar de salmuera sino también de la uniformidad con que se lleva a cabo el proceso. Se encontró el óptimo periodo para introducir el estrato de salmuera es de 40 minutos. Mayores periodos no representaban mejoras en cuanto al perfil de concentración. Intervalos menores representaban la formación de "cúpulas" de salmuera, una por cada orificio de inyección. El desplazamiento vertical de 5 cm. de salmuera requerido en la cavidad fué conseguido por medio de pequeños aumentos en la columna de presión en el depósito auxiliar procurando obtener en cada salto manualmente una columna de presión máxima de 1 cm.

Para obtener el perfil de concentración a lo largo del eje y de la cavidad, se monta la probeta del medidor de conductividad en un gato de plataforma y se hace penetrar verticalmente en los estratos para medir la concentración a medida que se desplaza hacia el fondo de la cavidad.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El objetivo de este estudio experimental es conocer la evolución fenómeno convectivo por medio de la descripción y análisis de las variables medidas. Así, los resultados que se presentan en este capítulo se refieren a la evolución de las temperaturas puntuales dentro de la cavidad y de ahí se discuten las tendencias térmicas generales de los casos en estudio y las influencias que pudieran tener la inclinación de la pared caliente y la concentración salina inicial del estrato inferior.

Antes de hablar de la evolución del fenómeno en la cavidad y de sus tendencias generales es necesario presentar ciertos resultados acerca de los perfiles de concentración inicial previos al experimento y del comportamiento térmico de la pared caliente con respecto al tiempo. Esta información es necesaria ya que constituye la base para hacer un análisis global del flujo. Asimismo, al final del capítulo se describen ciertas observaciones acerca de las oscilaciones térmicas e hidrodinámicas. Se hace también la comparación entre el perfil final de la concentración salina con respecto al perfil inicial con el objeto de investigar el grado de mezclado alcanzado durante el lapso de tiempo considerado.

4.1 Perfiles iniciales de concentración salina.

Cabe señalar el hecho que preparar una corrida para el experimento principal es un experimento por sí mismo ya que lograr una buena intercara requiere de cierta técnica que se consigue únicamente mediante prueba y error. Por buena intercara se quiere decir que al formar los estratos se tiene solamente un mínimo de mezclado debido a causas convectivas originadas por la inyección de la salmuera. Una vez lograda la intercara se procede a realizar mediciones de salinidad a lo largo del eje vertical para obtener los perfiles de concentración que son los que finalmente indican el tipo de estratificación lograda y el grosor de la intercara difusa. Se entiende esta última como una zona entre estratos homogéneos en donde la concentración cambia del valor que tiene en la salmuera del estrato inferior al valor cero en el estrato de agua. Esta zona, por delgada que sea, es inevitable ya que los fluidos utilizados para los estratos son miscibles. El perfil de concentración inicial más próximo al caso ideal que se obtuvo fue el caso en que el cambio se efectuó en una distancia vertical de 8 mm. El espesor comúnmente obtenido fue de 12 mm.

Como quedó asentado en la sección 3.6, la formación de intercaras es un procedimiento lento y delicado, igualmente puede decirse para la medición del perfil de concentración inicial. A continuación se muestran en las Figuras 4.1 y 4.2 dos de los perfiles obtenidos en los experimentos para concentraciones de 2.5% y 0.25% respectivamente.

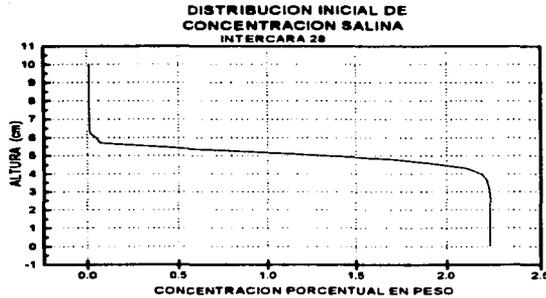


Figura 4.1 Perfil de concentración salina en la cavidad experimental. El estrato inferior está compuesto por salmuera de 2.5% de concentración.

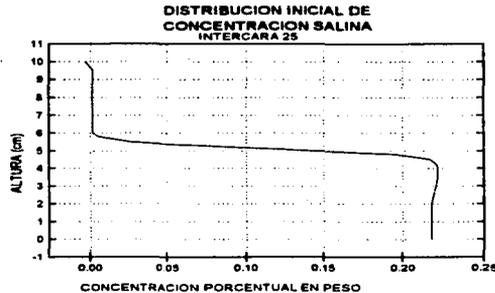


Fig. 4.2 Perfil de concentración salina para el sistema que contiene el estrato inferior de baja concentración salina (0.25%) y el estrato superior de agua. Nótese que el espesor de la intercara difusa es aproximadamente el mismo tanto para el caso con alta concentración como para el caso de baja concentración.

4.2 Tiempo de calentamiento de la pared caliente.

Se considera como el inicio de un experimento aquel instante en que el agua de calentamiento comienza a circular a través del intercambiador de calor que contiene la pared caliente. Se ha observado que el intercambiador de calor se llena de agua caliente en aproximadamente 6 segundos. En general, la pared caliente adquiere un del 90% del incremento total de temperatura (5°C) en aproximadamente 15 s, como lo muestra la traza de temperatura del termopar T_1 colocado en la pared caliente a 75 mm de altura. La Fig. 4.3 corresponde al caso A90 que aquí se ha tomado como ejemplo.

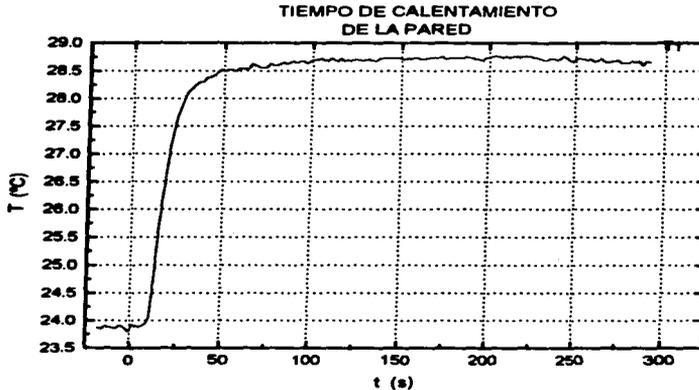


Fig. 4.3 Temperatura del termopar T_1 como función del tiempo. El termopar está colocado sobre la pared caliente a 75 mm de altura.

4.3 Evolución global de las temperaturas puntuales en el seno de la cavidad

La evolución global del fenómeno convectivo se observa por medio de las evoluciones puntuales de la temperatura medidas por los termopares. Las historias de temperatura puntual obtenidas indican en cuanto tiempo llega la intrusión térmica a cada una de las posiciones de los termopares y que tan brusco es el cambio de temperatura. Así, de manera indirecta, se puede estimar el valor de la velocidad promedio de las capas de intrusión en los estratos. Obviamente, no es posible obtener experimentalmente la evolución del campo de temperatura en todo el dominio debido al número limitado de canales disponibles en el sistema adquisidor de datos. Los canales disponibles se colocaron en puntos estratégicos que permiten monitorear la etapa transitoria del fenómeno. La colocación de los termopares para el caso A90, el cual se ha tomado para ejemplificar a todos los demás casos estudiados, se muestra en la Fig. 4.4. Para los casos A45 y A60 se mantienen iguales las distancias verticales de los termopares; las distancias horizontales se mantienen, con respecto a la pared caliente, también constantes.

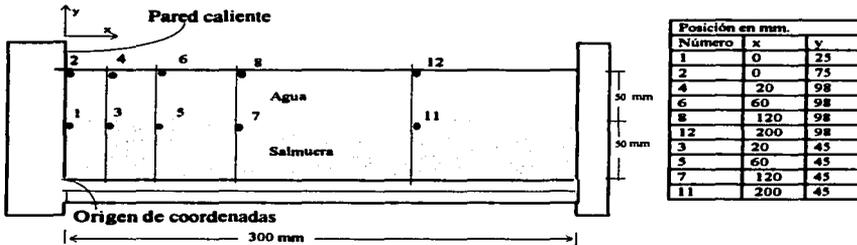


Fig. 4.4 Diagrama de colocación de termopares para el Caso A90.

La Figura 4.5 muestra la evolución de las temperaturas en los puntos señalados en la figura anterior. Después de iniciado el experimento cada termopar sensa el arribo de la intrusión térmica cuando ésta llega a la posición en donde el termopar está ubicado. Las inflexiones en las trazas indican el momento en que la intrusión toca a cada uno de los termopares. Se puede apreciar que el cambio en la pendiente es más acentuado en las posiciones cercanas a la pared caliente y menos acentuado a medida que se aleja de ella. También la temperatura del frente de la intrusión alcanza valores menores cada vez que avanza al termopar siguiente. Observando los tiempos en que ocurren estas inflexiones se puede tener una idea del avance del frente térmico; más adelante se utiliza esta información y el conocimiento de la posición de los termopares para estimar la velocidad promedio de avance del frente térmico.

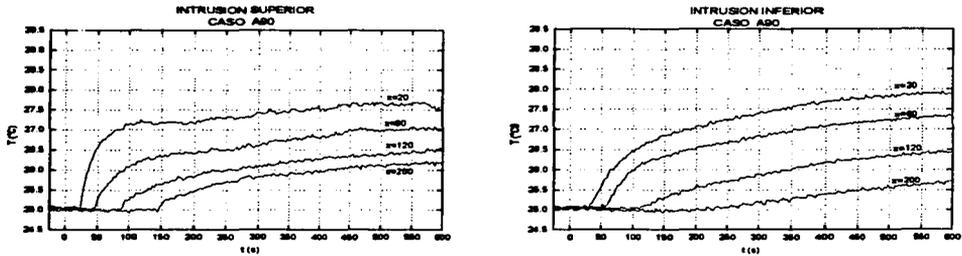


Fig. 4.5 Evolución de las temperaturas en los puntos localizados en el interior de la cavidad para el Caso A90. Las partes (a) y (b) corresponden respectivamente a las trazas de los termopares colocados en la intrusión superior e inferior.

Si bien los resultados se discuten tomando como ejemplo el caso A90, las Figuras 4.5 b, 4.5 (c), 4.5 (d), 4.5 (e), 4.5 (f) y 4.5 (e) muestran las trazas experimentales de los caso A60, A45, B90, B60 y B45, respectivamente. De aquí se obtiene información de la velocidad promedio que se da en las tablas de la siguiente sección.

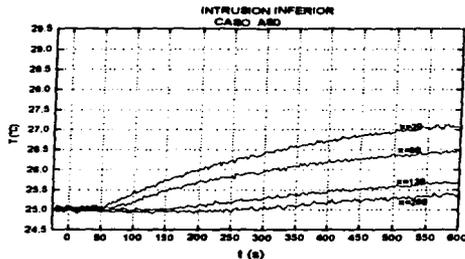
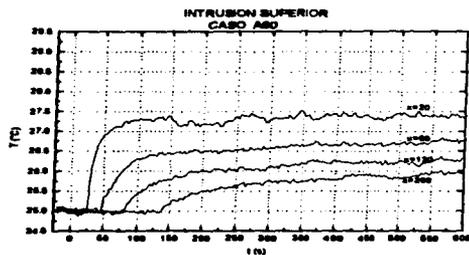


Fig. 4.5 (b) Evolución la temperatura de puntos localizados en el interior de la cavidad del caso A60.

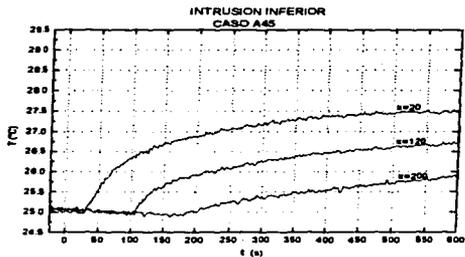
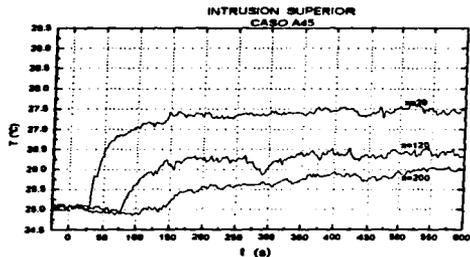


Fig. 4.5 (c) Evolución de la temperatura de puntos localizados en el interior de la cavidad del caso A45.

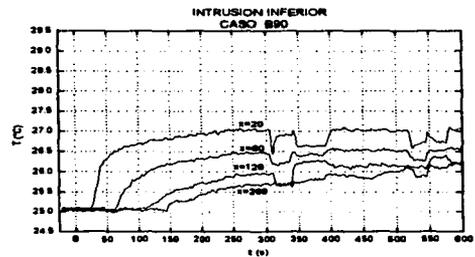
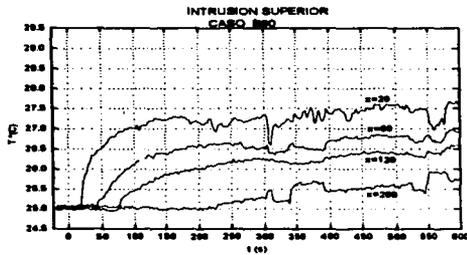


Fig. 4.5 (d) Evolución de la temperatura de puntos localizados en el interior de la cavidad del caso B90. Las discontinuidades que ocurren después de los 300 s representan deslizamientos verticales de los termopares realizados para verificar que a esa altura viaja la parte más caliente de la intrusión térmica.

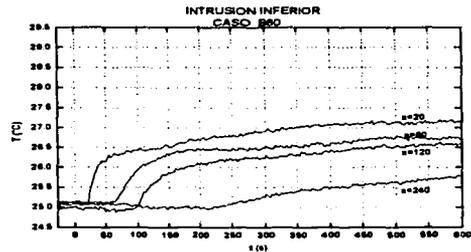
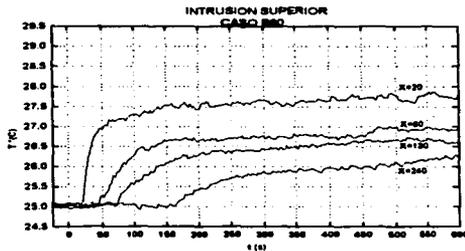


Fig. 4.5 (e) Evolución de la temperatura de puntos localizados en el interior de la cavidad del caso A60.

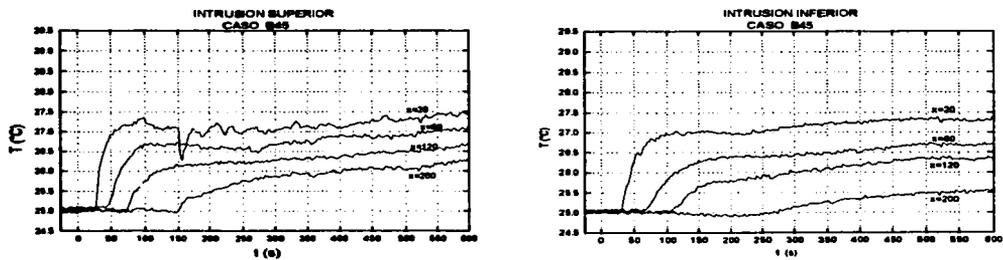


Fig. 4.5 (f). Evolución de la temperatura en puntos localizados en el interior de la cavidad del caso B45.

4.4 Características globales de la velocidad de avance promedio de las intrusiones térmicas.

Se tienen diversas alternativas para establecer la velocidad promedio más representativa, y en seguida se discuten brevemente los criterios que se establecieron para la selección de la velocidad promedio considerada como más significativa de un conjunto de posibilidades.

Se puede definir una velocidad promedio a la cual viajan las intrusiones térmicas como:

$$V_{0-i} = x_i / t_i,$$

en donde x_i es la distancia medida en mm desde la pared caliente hasta cada uno de los termopares, t_i es el tiempo de arribo de la intrusión térmica al termopar correspondiente contado desde el inicio del experimento. El subíndice i se refiere a la distancia en mm. que hay entre los termopares y la pared caliente. El subíndice 0 representa el tiempo $t=t_0$ al cual se comienza a suministrar agua caliente al intercambiador de calor de la cavidad.

Otra alternativa razonable es definir la velocidad promedio si se toma como referencia de tiempo y posición las correspondientes a $t=t_{20}$ definido como el tiempo en que la intrusión horizontal llega a $x=20$ mm, se pueden estimar las velocidades promedio a tiempos posteriores con relación a estas referencias. Así, se puede definir otra velocidad promedio como:

$$V_{20-i} = (x_i - x_{20}) / (t_i - t_{20})$$

en donde t_i es el tiempo de llegada de la intrusión a la posición en la que se quiere evaluar la velocidad promedio, x_i y x_{20} son las distancia medidas horizontalmente desde la pared caliente hasta los termopares correspondientes a la posición x_i y 20 mm.

De la misma manera se pueden definir otras velocidades promedio. Las velocidades V_{20-120} y V_{0-120} son las más significativas del fenómeno global ya que utilizan intervalos de tiempo y de distancia relativamente grandes minimizándose con ello la posible influencia que podría causar el tiempo de formación de capa límite térmica y los tiempos al inicio de la formación de la capa de intrusión térmica horizontal. Asimismo, se minimiza el porcentaje en el error de apreciación en cuanto a la lectura del instante en que la derivada cambia en la gráfica de temperatura vs. tiempo. Es este promedio el que se ha utilizado aquí para basar en él la discusión del avance de las intrusiones térmicas. (Nota: cuando se trata de aproximar la velocidad promedio a la velocidad instantánea utilizando incrementos de Δx y Δt más pequeños en regiones cercanas a la pared caliente, se encuentran las velocidades promedio más altas, 2.2 mm/s).

Por otro lado es claro que utilizando velocidades promedio en tiempos y distancias grandes se pierden muchos detalles de un fenómeno muy rico en eventos particulares que podrían dar información acerca del origen de los fenómenos descritos como comportamiento global. Sin embargo el diseño experimental y los instrumentos de medición con que se cuenta no permiten llevar a cabo por el momento un estudio tan fino, quedando dichos detalles fuera del alcance de este trabajo.

Habiendo quedado establecido cómo se analizará la evolución del fenómeno convectivo u qué velocidad promedio se tomará como parámetro de comparación pasamos a la discusión y comparación de efectos globales y particulares que se dan entre cada uno de los diferentes casos estudiados.

En la tabla 4.1 se resumen las velocidades promedio de los experimentos para los tres ángulos de inclinación que se trataron para una concentración salina de 2.5%. La tabla 4.2 presenta resultados análogos para una concentración de 0.25%. Cada uno de los valores representa el promedio entre el valor máximo y mínimo de tres experimentos realizados para cada uno de los seis casos. Ahí mismo se indica la brecha de dispersión.

TABLA 4.1 Velocidades promedio de la intrusión térmica para los casos de concentración salina de 2.5%

ÁNGULO	VELOCIDAD DE INTRUSIÓN (mm/s)	
	SUPERIOR	INFERIOR
45°	1.56 ± 0.07	1.13 ± 0.04
60°	1.63 ± 0.06	0.93 ± 0.06
90°	1.57 ± 0.07	1.02 ± 0.04

TABLA 4.2 Velocidades promedio de la intrusión térmica para los casos de concentración salina de 0.25%

ÁNGULO	VELOCIDAD DE INTRUSIÓN (mm/s)	
	SUPERIOR	INFERIOR
45°	1.68 ± 0.03	1.16 ± 0.03
60°	1.58 ± 0.05	1.25 ± 0.04
90°	1.65 ± 0.03	1.07 ± 0.04

De las Tablas 4.1 y 4.2 puede concluirse que desde un punto de vista global, la velocidad promedio de las capas de intrusión térmica no dependen de la inclinación de la pared caliente, al menos para los rangos de inclinación que fueron estudiados y bajo las condiciones impuestas por el aparato experimental. Sin embargo independientemente del ángulo y de la concentración se observa que consistentemente, las intrusiones térmicas del estrato superior avanzan más rápidamente hacia la pared opuesta. En el caso de alta concentración las velocidades de las intrusiones superiores con respecto a las inferiores son mayores por lo menos con el 27%, 58% y 41% para 45°, 60° y 90° respectivamente.

El porcentaje es calculado como:

$$\text{porcentaje} = \frac{V_{\text{min posible estrato superior}} - V_{\text{max. posible estrato inferior}}}{V_{\text{min posible estrato inferior}}}$$

Los porcentajes correspondientes para el caso de baja concentración son de 38%, 18% y 42%. En el capítulo siguiente de resultados numéricos se verá que existen evidencias de este comportamiento.

Creemos que esta diferencia de velocidades entre las intrusiones superior e inferior es debida a la combinación de los siguientes: i) fenómeno de mezclado entre agua fría que circula en la parte inferior del estrato superior y salmuera caliente que circula en sentido contrario (arrastre debido a fuerzas viscosas), y (ii) a la mayor pérdida de calor por conducción que sufre la intrusión inferior hacia un medio "similar" (agua) en comparación con la pérdida de calor que sufre la intrusión superior hacia un medio completamente diferente (aire).

4.5 Influencia de la concentración inicial en la altura a la cual se desplaza la intrusión térmica inferior.

Como se mencionó en la sección 3.6 la posición en que se colocan los termopares está estrechamente relacionada con la capacidad que se tiene de observar (vía las señales de temperatura) el avance de las capas de intrusión térmica.

Una observación interesantes es que para obtener una buena señal de temperatura en los casos de baja concentración, es que los termopares que sensan el avance de la capa de intrusión deben colocarse a un nivel más alto de alrededor de 48 mm, que para experimentos con salmuera de alta concentración colocados alrededor de 45 mm.

La explicación más viable a este hecho es la siguiente: ya que los efectos de difusión de masa son muy pequeños, la anchura de la intercara difusa es de igual espesor en ambos casos (salmuera concentrada y salmuera diluida) siempre y cuando el método de preparación y el cuidado de la ejecución sean idénticos en ambos casos. Lo anterior significa que, una vez formados los estratos existe un gradiente de densidad más pronunciado en la intercara difusa en el caso de la salmuera con mayor concentración. Dado que los coeficientes de expansión térmica de las soluciones consideradas son aproximadamente iguales, la única razón para que la capa límite térmica vertical alcance una cota más alta en la salmuera de baja concentración (antes de convertirse en capa de intrusión térmica horizontal) es que la posición de equilibrio que le corresponde de acuerdo con su disminución de densidad debido a un aumento de temperatura se encuentra en una cota más alta que aquella que le correspondería si fuera una solución de concentración más alta (para las mismas condiciones de ΔT y β_0). En el caso límite de una concentración diluida de salmuera en el que la concentración tiende a cero, la capa límite térmica del estrato inferior alcanzaría la cota vertical máxima, interfase agua-aire, antes de convertirse en una capa de intrusión térmica horizontal.

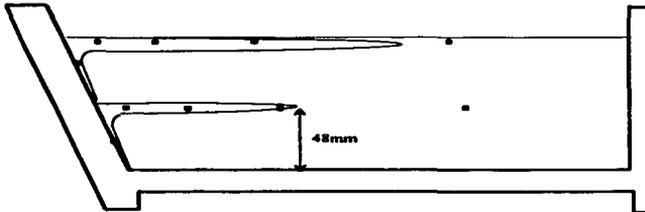


Fig. 4.6 Cuando se tiene una baja concentración salina en el estrato inferior la intrusión térmica horizontal inferior viaja a una cota más alta (aproximadamente 3 mm más arriba que en el caso con salmuera de alta concentración salina).

4.6 Oscilaciones térmicas e hidrodinámicas temporales.

Está reportado en la literatura para el tipo de fenómeno aquí tratado, la existencia de oscilaciones tanto térmicas como hidrodinámicas que han ocasionado una gran cantidad de discrepancias en cuanto a los posibles orígenes de ellas. En el presente trabajo se encontraron ambos tipos de oscilaciones. Las térmicas se muestran en las figuras. 4.8 y las hidrodinámicas en la Fig. 4.9. Estas oscilaciones ocurren en posiciones cercanas a la esquina formada por la interface agua-aire y pared caliente, aquí definida como zona 2. Por otro lado, en la esquina formada por la intercara agua-salmuera y pared caliente, aquí definida como zona 1, se observaron oscilaciones hidrodinámicas sin detectarse claramente oscilaciones térmicas. La Fig. 4.8 muestra la ubicación de la zona 1 y zona 2.

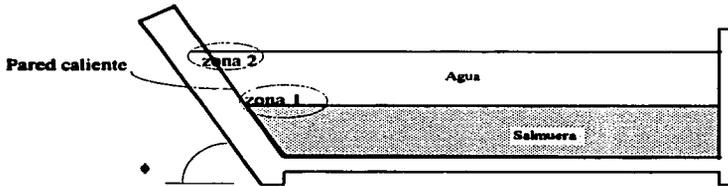


Fig. 4.7 En la zona 2 se observaron tanto oscilaciones hidrodinámicas como oscilaciones térmicas. En la Zona 1 se observaron claramente oscilaciones hidrodinámicas pero no así térmicas.

En la Fig. 4.8 puede verse que el tipo de señal de un termopar en la zona 2 (termopar T_2) comparado con el tipo de señal de un termopar en la zona 1 (termopar T_1) es muy diferente ya que indica oscilaciones térmicas en la zona 2 no presentes en la zona 1. Esta diferencia entre los comportamientos térmicos en esas zonas es típica en nuestros experimentos y es independiente del ángulo y de la salinidad. El estrato superior presenta entonces las mismas características del

problema homogéneo tratado por P&I, (1980), Ivey (1984) y Patterson & Armfield (1990) entre otros (ver referencias). De hecho, las pequeñas oscilaciones que muestra T1 son típicas de la respuesta de los termopares tipo T cobre-constantan, la magnitud de éstas representa el grado de precisión que se tiene con esta clase de termopares ($\pm 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$). Nótese que es fácil distinguir las oscilaciones características del propio termopar de las oscilaciones debido al fenómeno bajo estudio.

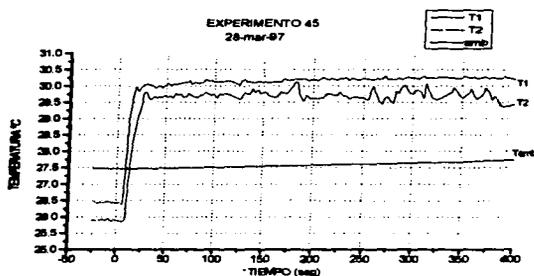


Fig. 4.8 Evolución de la temperatura en dos posiciones cercanas a la pared caliente correspondientes a los termopares T_1 y T_2 , que se encuentran en la zona 1 y en la zona 2 respectivamente.

Es interesante notar que si se analiza la gráfica 4.8 puede verse que el proceso oscilatorio térmico comienza a los 180 s aproximadamente, y que estas oscilaciones cuyo periodo fluctúa entre 15 y 20 s parecen estar sobrepuestas en ondas largas que se repiten con un periodo de aproximadamente 180 seg.

Por otro lado para que una intrusión térmica llegue a la pared fría, como se verá en el capítulo 5, los tiempos obtenidos de la simulación numérica y los tiempos teóricos dados por P&I son aproximadamente de 150 y 130 s respectivamente. Esto nos permite relacionar el periodo de onda larga con la realización de un ciclo de "ida y vuelta", o si se quiere pensar de otra manera, en un ciclo de "ida" (hacia la pared fría) de fluido caliente y de "vuelta" (hacia la pared caliente) de fluido frío. Desafortunadamente hasta el momento es esta coincidencia de los tiempo característicos lo único que permite relacionar las ondas de periodo largo con una escala de longitud perteneciente a la cavidad (su longitud) ya que el tiempo que tarda una intrusión térmica en llegar a la pared fría depende de cuan larga la cavidad sea.

Por lo que respecta a las oscilaciones térmicas de periodo corto en el estrato superior puede establecerse una relación con las oscilaciones hidrodinámicas que posiblemente juega un papel importante en la explicación del origen de estas oscilaciones. Esta relación se presenta en los siguientes párrafos.

La Fig. 4.9 muestra una digitalización de un cuadro de la grabación en video de un experimento. En ella puede verse la trayectoria típica que la tinta utilizada para la visualización sigue en su avance hacia la pared fría, estas trayectorias asemejan a las mostradas por Ivey en su trabajo experimental. Es correcto pensar que este fluido teñido lleva consigo la información térmica de la capa límite vertical, ya que fue ahí en donde se inyectó tinta para que señalara precisamente cómo la capa límite térmica se convierte en la intrusión térmica horizontal. En (a) se muestran las ondulaciones, que en adelante llamaremos rizos, formadas en ambos estratos a un cierto tiempo y en (b) los correspondientes rizos a unos 120 segundos después. Nótese que en ambos tiempo las ondulaciones son más evidentes en el rizo superior. Es importante señalar que los rizos en ambos estratos se forman inmediatamente después del inicio del experimento y continúan perfectamente definidos por toda la etapa transitoria del experimento aquí estudiada (el tiempo máximo de capacidad para el DAS es de 3000 s).

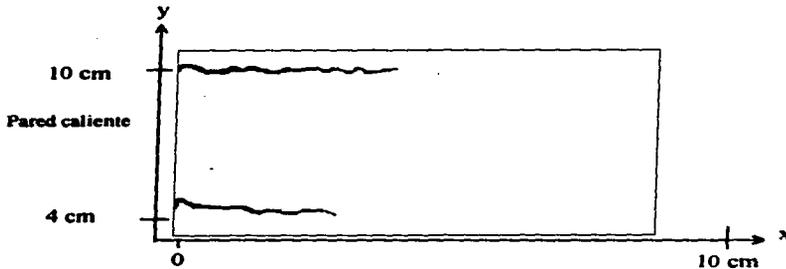


Fig. 4.9 Visualización de las oscilaciones hidrodinámicas en un experimento del caso A90. Para la explicación ver texto.

También es importante señalar que las ondas de los rizos cambian con respecto al tiempo a medida que el experimento se desarrolla. A veces la cota a la que se encuentra una cresta (o valle) en un instante determinado es más alta o más baja, que para un instante posterior; otras veces una cresta se transforma en un valle después de haber transcurrido determinado tiempo.

La posición de crestas y valles también cambia con respecto al eje x a medida que el tiempo avanza. Estos movimientos son apenas perceptibles en tiempo real pero se vuelven muy evidentes al observar la grabación en cámara rápida, en donde el rizo completo parece estar vibrando rápidamente por arriba y por abajo de una línea media; o bien se desplaza como un todo a derecha e izquierda, o también se alterna la formación de valles y crestas.

Estos movimiento son importantes ya que si un termopar colocado en una posición fija en la vecindad de un "rizo térmico" podría estar sensando alternadamente temperaturas altas y bajas. Con base en pacientes observaciones de los videos que registran nuestras experiencias de laboratorio creemos razonable un periodo de 15 o 20 segundos (periodo corto de oscilaciones térmicas) como para que el rizo cambie su posición con respecto al eje x y/o al eje y ocasionando que los termopares que se encuentran en su trayectoria midan altibajos en la temperatura. La Fig. 4.11 es una representación esquemática de estas observaciones.

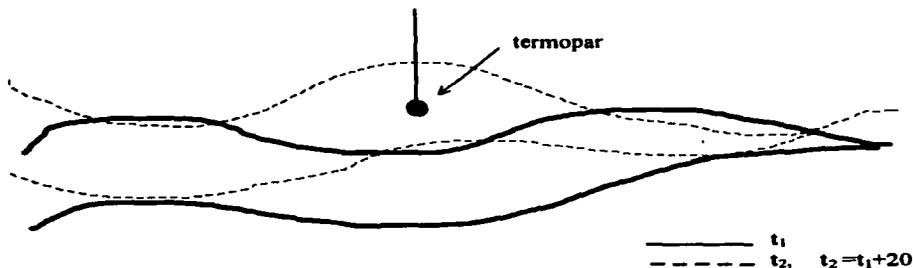


Fig. 4.10 Posible relación entre ondulaciones hidrodinámicas y oscilaciones térmicas, $t_1 \neq t_2$

La dificultad principal de esta hipótesis estriba en el porqué del inicio de las oscilaciones térmicas al tiempo $t=180$ seg. y no antes, siendo que el rizo se forma inmediatamente después de iniciado el experimento. La explicación a esta interrogante puede estar relacionada con el ímpetu con que el rizo se forma en las primeras etapas (antes de los 180 s por ejemplo) cuando ΔT ha sido más fuerte. Un estudio detallado de los videos en el recientemente formado laboratorio de visualización podría resolver muchas dudas a este respecto, sin embargo esto quedará para trabajos posteriores. Cabe señalar que lo descrito anteriormente en cuanto a los experimentos puede notarse claramente en la contraparte numérica como se señalará con oportunidad en el capítulo 5.

Con relación al estrato inferior se puede decir que las oscilaciones hidrodinámicas están amortiguadas por la fuerte estratificación salina en la zona 1, como puede deducirse de las señales de temperatura que se observan para los termopares en este estrato y que no presentan oscilaciones térmicas tan claras como para el estrato superior. La digitalización mostrada en la Fig. 4.11 parece apoyar este hecho ya que las ondulaciones hidrodinámicas son evidentemente menos pronunciadas en el estrato inferior que en el superior.

La naturaleza de las oscilaciones que se han comentado a la luz de nuestras propias experiencias es motivo de controversia entre investigadores de alto prestigio, y aquí sólo enumeramos algunas de las posibles soluciones que ellos han propuesto en sus estudios para resolver esta incógnita.

- i) "apilamiento" (piling up) de isotermas (P&I).
- ii) inestabilidades de la capa límite térmica debido a la alimentación de fluido frío a lo largo de su recorrido (propuesto por Armfield & Patterson)
- iii) Salto hidráulico (Ivey)

De toda la discusión anterior se cree que los hechos mostrados están más relacionados con la propuesta (i) sostenida por Patterson & Imberger. Entendiéndose aquí por "apilamiento" la acumulación de fluido caliente proveniente de la capa límite térmica. La combinación de la inercia del fluido y el cambio de dirección debido al efecto de la frontera hacen un acumulamiento de fluido en la esquina de la cavidad que origina el tren de ondulaciones que se ve en la Fig. 4.9.

4.7 Evolución de la distribución de la concentración salina al final del experimento.

Se obtuvieron algunos de los perfiles de concentración salina después de haber efectuado los experimentos que duran aproximadamente 30 min. En la Fig. 4.11 puede verse el perfil final de concentración comparado con el perfil inicial. Se observa que la intercara difusa, inicialmente de 15 mm de espesor, al final del experimento tiene un nuevo espesor de 22 mm. A pesar de este ensanchamiento se puede decir que el sistema mantiene su configuración inicial.

En experimentos previos se observó que un perfil inicial de concentración de un espesor inicial de 15 mm toma aproximadamente 24 horas en engrosar su espesor a 50 mm por efectos puramente difusivos; esto es, 0.7 mm por cada media hora. Así, el aumento de grosor en la interface de 15 a 22 mm después de 30 minutos de experimentación se debe entonces a la erosión ocasionada por el movimiento relativo entre los estratos debido a la convección.

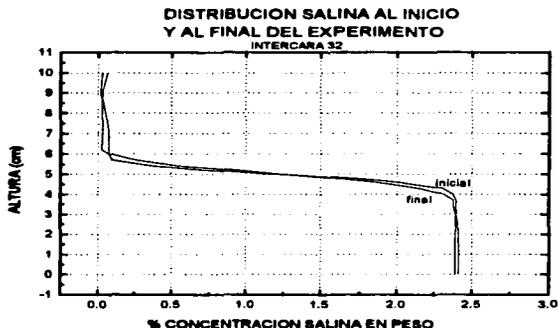


Fig. 4.11 Comparación de los perfiles de salinidad antes y después de los experimentos. Existe poca transporte de soluto desde el estrato inferior hacia el estrato superior, dando una idea cuantitativa del bajo transporte convectivo de soluto.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

La simulación numérica de fenómenos en mecánica de fluidos ha tomado auge con el advenimiento de las computadoras y más aún con la entrada al mercado de la paquetería de simulación computacional en mecánica de fluidos. La utilidad de cualquier modelo numérico depende de lo bien que emula al flujo real. Sin embargo es necesario validar al modelo por lo menos para ciertos casos representativos. Una vez que se tiene confianza en dicho modelo puede interpolarse virtualmente una gama muy variada de imposiciones sobre el flujo (condiciones iniciales, condiciones de frontera, condiciones temporales de temperatura o de velocidad, etc.) y de esta manera analizar el comportamiento del flujo en un amplio rango de posibilidades.

Los resultados presentados en este capítulo son producto de la simulación numérica del problema bajo estudio llevada a cabo con el programa comercial PHOENICS. Este trabajo refuerza al trabajo experimental realizado y muestra detalles que no se ven fácilmente en la parte experimental.

En este capítulo se presenta el estudio numérico de los casos A90, A60, B90 y B60. En la sección 5.1 se analiza la evolución del caso A90. Se presentan detalladamente los resultados numéricos referentes a los eventos característicos del problema descritos en el Capítulo 2, como son las capas límite, las intrusiones térmicas horizontales y la evolución del fenómeno global. Este ejemplo facilitará la exposición del fenómeno en los demás casos tratados. En la sección 5.2 se estudian peculiaridades como las oscilaciones que están apenas insinuadas en los diagramas que representan los campos globales de velocidad y temperatura. En la sección 5.3 se discute la influencia del ángulo comparando los caso de pared vertical contra los casos de pared inclinada. En la sección 5.4 se discute la influencia de la concentración inicial comparando los casos de alta concentración contra los casos de baja concentración.

5.1 Descripción y discusión de los resultados numéricos globales para el caso de alta concentración y pared vertical. Caso A90.

Debido a la gran cantidad de información que se tiene y a la complejidad del problema, esta exposición está organizada de manera que se describe el comportamiento global de cada variable de interés, e inmediatamente después se discute brevemente dicho comportamiento. Así pues, para este caso (A90), se tratan los siguientes temas:

- a) El crecimiento de las capas límite e inicio de la capa de intrusión horizontal para ambos estratos.
- b) las distribuciones en el dominio de la temperatura, la velocidad y la concentración salina.

i) Crecimiento de la capa limite térmica superior. La Fig. 5.1 muestra la variación de la temperatura con la distancia x , para una franja de un centímetro localizada en la parte superior de la cavidad a 80 mm de la base y a sólo 20 mm de la superficie. Cada una de las trazas corresponde a un tiempo t comenzando de $t=3$ hasta 24 s con incrementos de 3 s. Puede verse que la anchura máxima de la capa limite térmica (medida en la dirección x) es aproximadamente de 3 mm. Este espesor se alcanza en un tiempo de 12 s y corresponde a una cota de 85 mm.

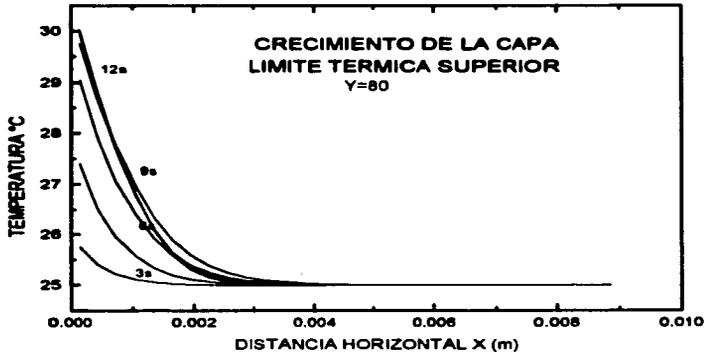


Fig. 5.1 Crecimiento de la capa límite térmica superior. El tiempo en alcanzar el estado estacionario es de 12 s. En la cota correspondiente a la figura (80 mm) el espesor es de 3 mm.

ii) **Crecimiento de la capa límite viscosa superior.** La Fig. 5.2 muestra la variación de la velocidad vertical con la distancia x en una zona adyacente a la pared caliente localizada en $y=80$ mm. Cada una de las trazas corresponde a diferente tiempo comenzando en $t=3$ hasta $t=24$ s con incrementos de 3 s. Se puede observar que a lo largo de 6 mm para un tiempo de 15 s se tiene un flujo completamente desarrollado que corresponde a la capa límite viscosa.

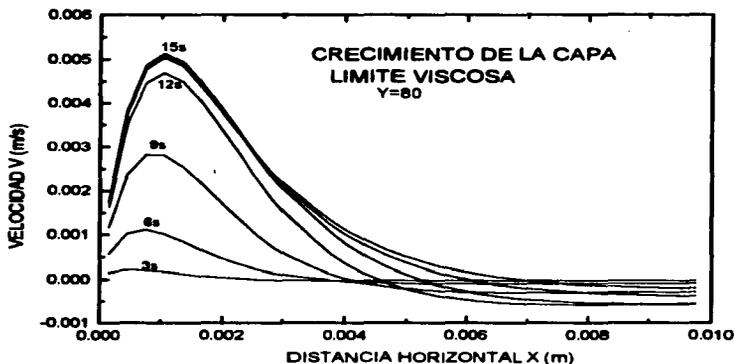


Fig. 5.2 Crecimiento de la capa límite viscosa superior para $y=80$. Nótese que el estado estacionario se alcanza en 15 s: mm y que el espesor la capa límite es de 6 mm.

iii) Crecimiento de la capa límite térmica inferior.

En la figura 5.3 se muestra el crecimiento para la capa límite térmica en el estrato inferior para una cota $y=30$ mm. Cabe recordar que el estrato inferior está localizado entre $y=0$ y $y=45$ mm; al elegir una cota $y=30$ mm se asegura estar fuera de la capa de intrusión horizontal. La capa límite térmica inferior alcanza el estado estacionario al igual que la capa límite térmica superior en 12 s y adquiere un espesor de 3 mm.

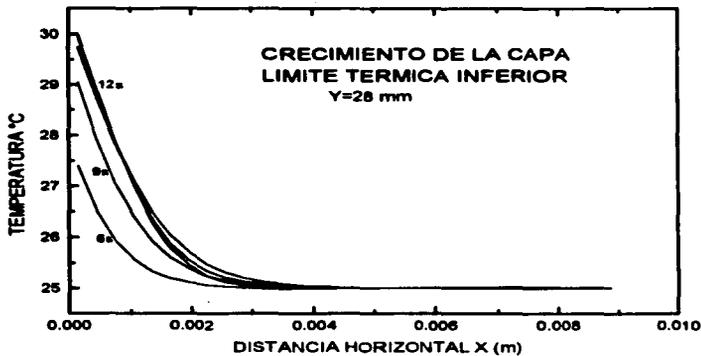


Fig. 5.3 Para $y=30$ la capa límite térmica inferior alcanza el estado estacionario a los 12 s y tiene un espesor de 3 mm. Nótese que son las mismas características que la capa límite térmica superior.

iv) Crecimiento de la capa límite viscosa inferior.

La Fig. 5.4 representa el crecimiento de la capa límite viscosa inferior la cual alcanza el estado estacionario en 15 s con un espesor de 6 mm. La velocidad vertical máxima alcanzada en esta cota ($y=30$ mm) es de 6 mm/s y se localiza a 1 mm de la pared caliente.

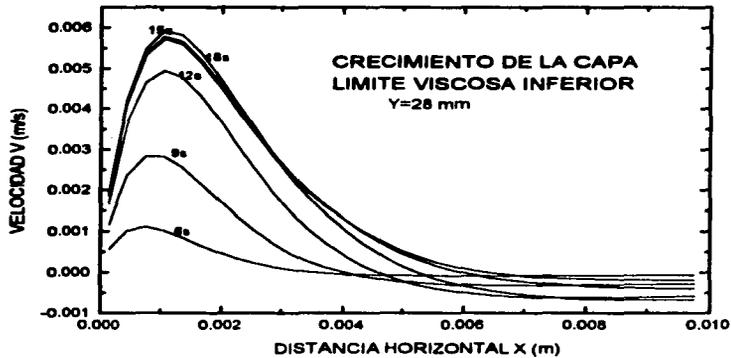


Fig. 5.4 La capa límite viscosa inferior llega al estado estacionario a los 15 s alcanzando un espesor de 6 mm.

v) Inicio de las capas de intrusión térmica horizontal.

En los incisos i, ii, iii, y iv se observa que tanto la capa límite térmica como la viscosa son muy similares en los dos estratos cuando se calculan dentro de la parte homogénea de ellos (recuérdese que como una aproximación en la solución numérica se propuso que las propiedades físicas tienen los mismos valores). La Fig. 5.5 y 5.6 presentan perfiles de temperatura obtenidos en la zona difusa entre el estrato superior y el inferior. Estos perfiles son diferentes a los que típicamente se presentan en una capa límite térmica ya que dentro de la intercara difusa existe más actividad en cuanto a la formación y avance de la intrusión térmica horizontal.

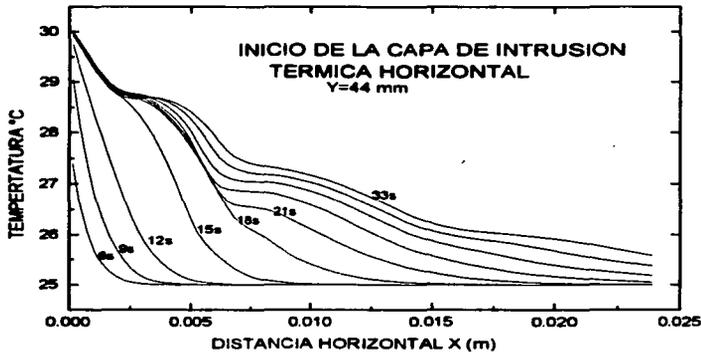


Fig. 5.5 Perfiles de temperatura para $6 < t < 30$ s en $Y=44$ mm.

El comportamiento mostrado en la Fig. 5.5 corresponde al limite superior de la intrusión térmica (44 mm en este caso). Puede verse que a los 12 s se ha terminado de formar la capa límite térmica, mientras que a partir de los 15 s la deformación del perfil representa la formación de una capa de intrusión térmica en la dirección x . Para tiempo mayores que 18 s se observan oscilaciones térmicas que representan las trayectorias onduladas que sigue el fluido caliente.

En la Fig. 5.6 se ve nuevamente cómo después de los 12 s se comienza a formar la intrusión térmica en la dirección x . El incremento en la temperatura después de $x=0.005$ representa nuevamente las trayectorias onduladas de la de intrusión térmica.

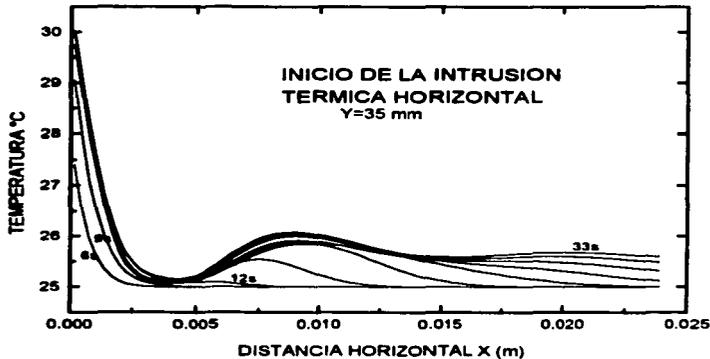


Fig. 5.6 Perfiles de temperatura en $y=35$ mm. En esta cota se muestra la formación de la parte inferior de la intrusión térmica horizontal en la región de la intercara difusa.

vi) Evolución de la temperatura en el seno de la cavidad.

Como se explicó en los incisos anteriores la capa límite termina de crecer a los 12 s y existe en ambos estratos una incipiente intrusión horizontal que se desplaza hacia la pared fría. En la Fig. 5.7, se muestra la evolución global de la temperatura, a los 30, 60, 90, 120 y 150 s. A los 30 s las intrusiones térmicas horizontales ya son francas. Existe una zona cercana a la esquina pared caliente-superficie en donde se forma un canal con elevados gradientes de temperatura en la dirección vertical. A los 60 s la intrusión térmica superior ha avanzado aproximadamente 120 mm en la dirección horizontal, nótese que la intrusión térmica inferior (b) ha avanzado sólo 90 mm aproximadamente. A los 90 s la intrusión superior ha avanzado 200 mm mientras que la intrusión inferior sólo ha avanzado 150 mm. A los 150 s la intrusión superior ha llegado ya a la pared fría (localizada a 300 mm) y la intrusión inferior ha recorrido sólo 200 mm. Se advierte también que la capa de intrusión inferior tiene mayor espesor que la capa de intrusión superior.

La forma que adoptan las isotermas en la Fig. 5.7 no sólo refleja el avance de la capa de intrusión térmica sino también el avance de la capa de intrusión viscosa en los estratos ya que en el fenómeno los efectos convectivos son más importantes en comparación con los efectos difusivos. Es de notarse que la intrusión térmica inferior es más gruesa que la superior debido a que en esa región la transferencia difusiva de calor hacia el estrato superior es más alta, mientras que en la interfase agua-aire la transferencia de calor no es posible ya que numéricamente se tiene una frontera adiabática. Esto aparentemente ocasiona un desplazamiento relativamente más rápido de la intrusión superior. En este punto se puede referir a la velocidad V_{0-200} definida en problema experimental. Numéricamente $V_{0-200}=2.0$ mm/s para la intrusión superior y $V_{0-200}=0.90$ mm/s para la intrusión inferior con lo que se confirma numéricamente las diferencias entre intrusiones.

También se puede observar en la Fig. 5.7 que en la zona cercana a la esquina que forma la pared caliente con la superficie libre (zona 2) las isotermas forman una cintura que se establece desde antes de los 30 s. del orden de 1 mm de espesor en la dirección vertical y de 1 cm de longitud en la dirección horizontal. Por este pequeño canal circula todo el fluido caliente que forma a la intrusión térmica horizontal superior (ver Fig. 5.7) y que ha sido denominado "salto hidráulico" por algunos autores. Por el contrario, en la región cercana a la esquina formada por la intercara difusa y la pared caliente (zona 1) la configuración de las isotermas sufre un ensanchamiento (ver Fig. 5.7). En la siguiente sección se hace un estudio detallado de ambas zonas.

vii) Evolución de la velocidad en el seno de la cavidad.

La Fig. 5.8 muestra el campo de velocidad. Los diferentes cuadros corresponden a tiempos de 30, 60, 90, 120 y 150 s. La simulación numérica inicia con el fluido en reposo, la pared caliente se calienta siguiendo una función tangente hiperbólica y a su vez calienta al fluido cercano a la pared. Este fluido al cambiar su densidad comienza a desplazarse verticalmente movido por las fuerzas de flotación. Al descargar la capa límite viscosa superior e inferior hacia el seno del fluido se forma una capa de intrusión horizontal en cada uno de los estratos. Estas intrusiones comienzan a avanzar horizontalmente hacia la pared fría, tal como se muestra en la Fig. 5.8. Este avance de fluido a una temperatura mayor forma las capas de intrusión horizontal. Puede verse que a los 30 s se distinguen ya claramente ambas capas de intrusión horizontal.

En el estrato superior, análogamente al comportamiento térmico, el fluido caliente circula por una parte estrecha cerca de la esquina formada por la pared caliente y la superficie libre. El fluido que no ha sido calentado pero fue arrastrado hacia arriba por efectos viscosos, vuelve al seno de la cavidad contribuyendo a una recirculación global. A los 60 s se observa que lo que a los 30 s podía ser considerado como una recirculación global, ahora se ha convertido en un vórtice que avanza en la punta de la intrusión térmica (sigue existiendo una recirculación global en esa zona).

En cuanto al estrato inferior, puede decirse que el fluido avanza hacia la pared fría y que existe una recirculación global a todo tiempo. El vórtice que avanza en la punta de la intrusión superior parece ser producto de la homogeneidad del fluido ya que debido a ésta se facilita el movimiento hacia abajo. Por otro lado en el estrato inferior la fuerte estratificación existente, precisamente en la región de avance de la intrusión, inhibe la formación de un vórtice similar al de la intrusión superior y en ese caso el fluido viaja en la cota correspondiente a su densidad.

Nótese en la Figura 5.8 que al lugar en donde se forma una cintura en la distribución de temperaturas le corresponde la parte estrecha del campo de velocidades. Esta correspondencia parece estar de acuerdo con lo que se ha visualizado en los experimentos y que se ha presentado en el capítulo anterior en una fotografía digitalizada del experimento (Ver Fig. 5.10).

viii) Evolución de la concentración salina en el seno de la cavidad.

La evolución del campo de concentración salina se observa en la Fig. 5.9. Inicialmente, se encuentra en la parte superior de la cavidad un estrato homogéneo de agua de aproximadamente de 45 mm. A media altura de la cavidad se localiza la intercara difusa de aproximadamente 12 mm de espesor conformada por un fuerte gradiente salino en la dirección vertical ($>2000 \text{ kg/m}^4$). En la parte inferior de la cavidad está colocado un estrato homogéneo de salmuera de 2.5% de concentración con un espesor aproximado de 45 mm. El perfil de concentración arriba descrito corresponde a la condición inicial de salinidad impuesta en el esquema numérico a partir de un perfil de concentración inicial medido experimentalmente.

En la Fig. 5.9 se observa que, al inicio del proceso cuando el movimiento es más fuerte debido a los mayores gradientes de temperatura que se tienen, hay un efecto de transporte de soluto en forma de onda cuya amplitud tiende a cero a medida que se aproxima a la pared fría, quedando el perfil salino, hacia el final del intervalo de tiempo bajo estudio, aproximadamente igual al perfil salino inicial. El espesor de la intercara difusa sólo sufre una pequeña reducción en la zona cercana a la pared caliente, y no hay cambios importantes en el perfil de concentración

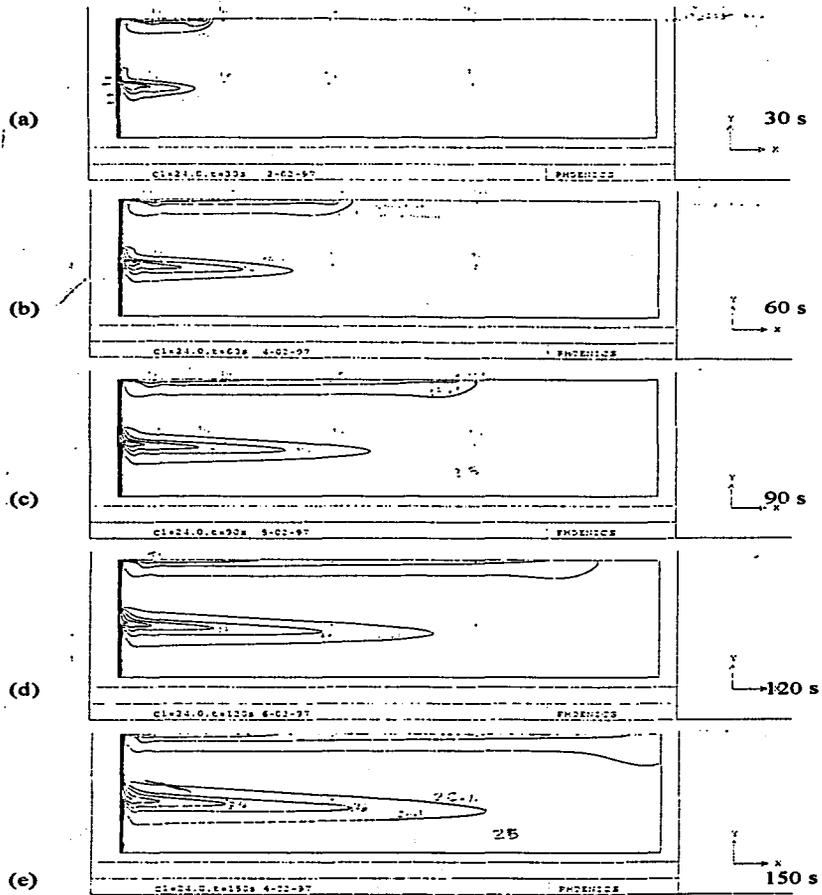


Fig. 5.7 Evolución global de la temperatura en el Caso A90.

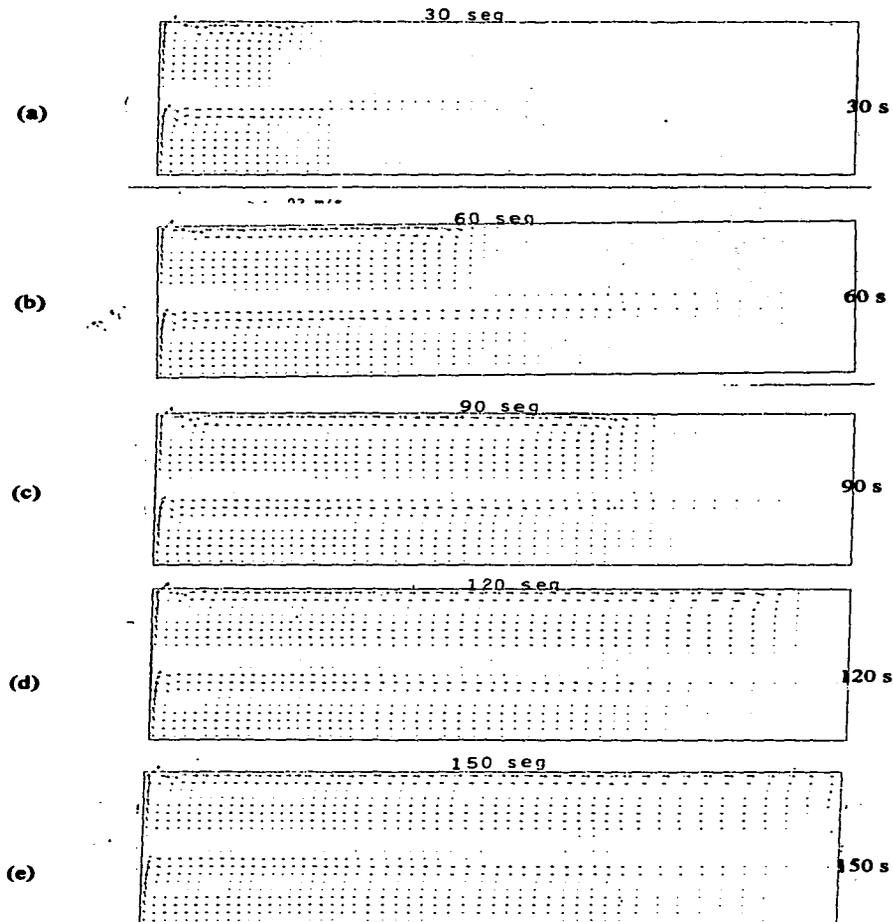


Fig. 5.8 Evolución global de la velocidad en el Caso A90.

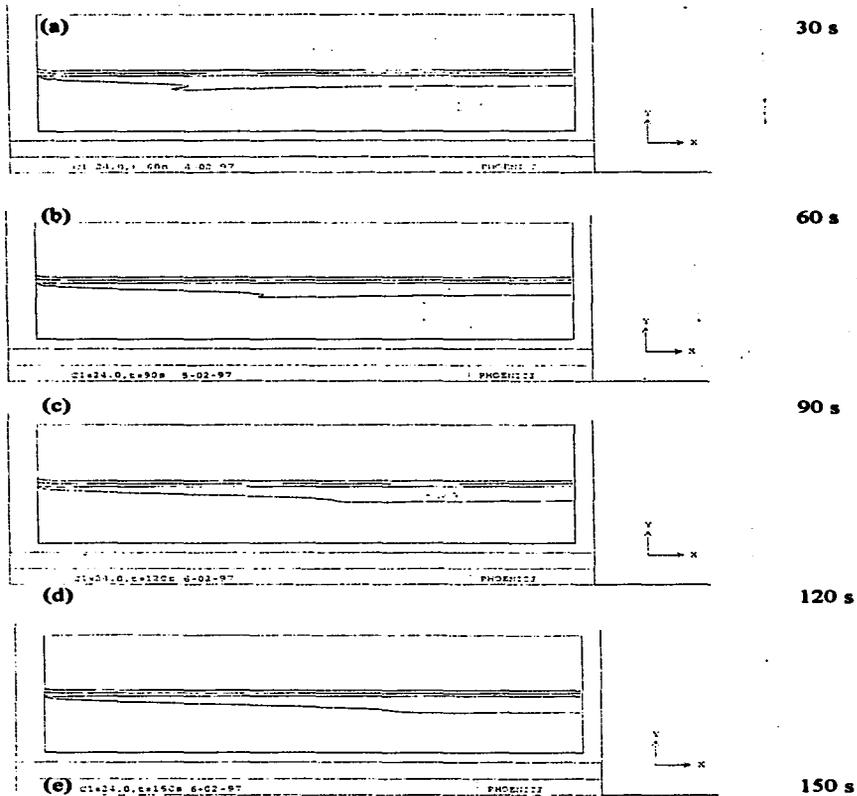


Fig. 5.8 Evolución global de la concentración salina en el Caso A90.

5.2 Oscilaciones en ambos estratos.

En correspondencia con lo anotado en la parte experimental con respecto a las zonas donde se detectan oscilaciones en la señal de temperatura (llamadas zona 1 y zona 2) se escogieron en el trabajo numérico varias zonas en partes correspondientes y se investigó la existencia de oscilaciones. Al igual que el caso experimental, se encontró que hay lugares donde el fenómeno se presenta con mayor claridad.

i) Oscilaciones en la temperatura.

Estrato superior.

Para encontrar las zonas en donde existen oscilaciones térmicas se realizó una búsqueda en el dominio xy y en el tiempo. Se seleccionó una franja horizontal en la zona cercana a la superficie libre perteneciente a la intrusión térmica y se obtuvieron los perfiles de temperatura a lo largo del eje x a intervalos de 15 s. De esta franja se eligió una sección de 1 a 4 cm en la que presumiblemente existían oscilaciones y se obtuvieron los perfiles de temperatura a lo largo de esta sección a intervalos de 3 s. El mismo proceso se aplicó para cuatro diferentes alturas con objeto de barrer a lo largo del eje y y el intervalo seleccionado; las alturas investigadas son 99.9, 97.5, 93.5 y 85 mm. Teniendo ya ubicada la región xy en donde existen oscilaciones se graficaron los perfiles de temperatura en esta región para un intervalo de tiempo que va de 3 a 210 s. Así, se pudo realizar un análisis detallado de estas oscilaciones y de su duración. Asimismo se presenta la evolución de la temperatura para un punto representativo de dicha zona de oscilaciones térmicas.

La Fig. 5.10 muestra a diferentes tiempos el perfil de temperatura a lo largo del eje x correspondiente a $y=97$ mm. En la parte cercana a la pared caliente (3 mm) se encuentra localizada la capa límite térmica. Se observa que el avance de la intrusión térmica tiene una velocidad promedio del orden de 2 mm/s como puede estimarse dividiendo la distancia total que ha recorrido el frente de la intrusión térmica entre el tiempo que ha empleado en

hacerlo. Este promedio va disminuyendo ligeramente con el transcurso del tiempo como lo indica la distancia cada vez menor que existe entre frentes consecutivos a medida que se avanza en el tiempo. Al frente de la intrusión térmica viaja un overshoot (fluido con un exceso relativo de temperatura) en forma de onda interna con una amplitud máxima de 0.5 °C que disminuye en cuanto se aleja de la pared caliente.

En la región comprendida entre 10 y 40 mm aproximadamente se observa que las líneas que conforman los perfiles de temperatura a diferentes tiempo se cruzan entre ellas, dando un indicio de la existencia de oscilaciones.

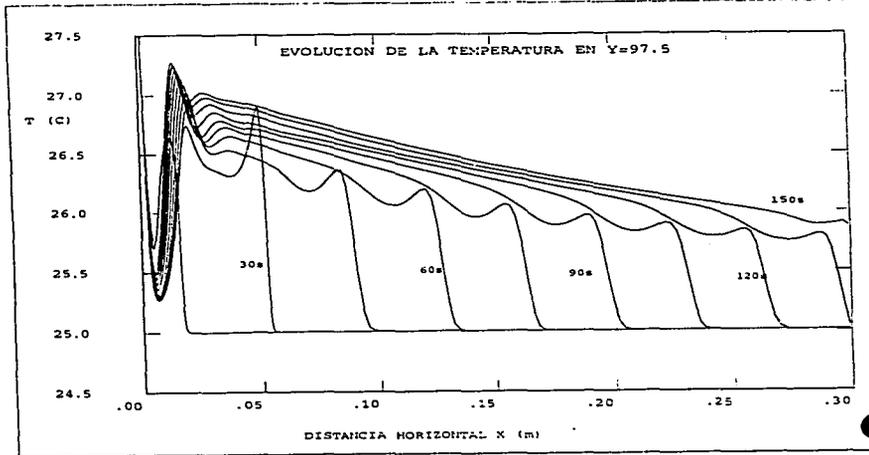
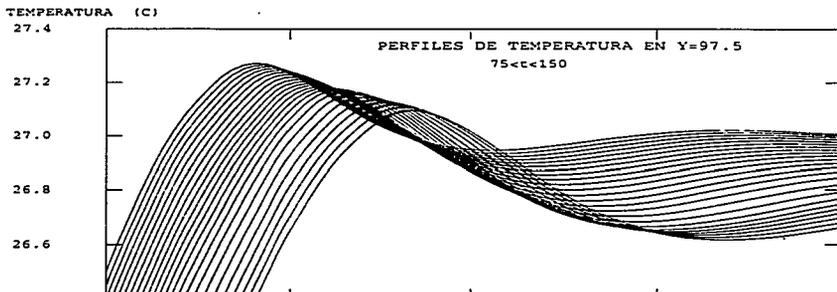
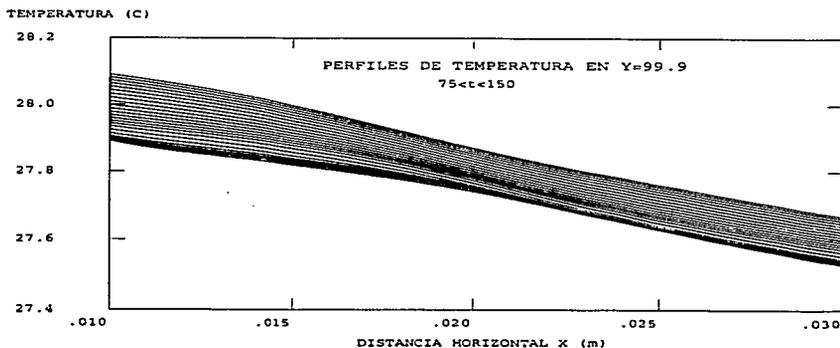


Fig. 5.10 Perfiles de temperatura correspondientes a $y=97.5$ mm. Se puede observar la existencia de una onda interna de temperatura que viaja hacia la pared fría así como la gran actividad que hay cerca de la pared caliente.

La Fig. 5.11 presenta la evolución de la temperatura para las cuatro alturas bajo análisis. En (a) se muestran la cota localizada en $y=99.9$ mm en donde los perfiles de temperatura tienen un comportamiento ascendente a través del tiempo y no se observa la existencia de oscilaciones. En (b), a 97.5 mm de altura hay una región a lo largo del eje x que va de 15 a 25 mm en donde se presentan oscilaciones térmicas que tienen una amplitud del orden de 0.1 °C. También se observan oscilaciones con las mismas características en la cota de 93.5 mm, cuadro (c). Para una cota de 85 mm prácticamente ya no existen oscilaciones en la temperatura (nótese el cambio de escala en este último cuadro).



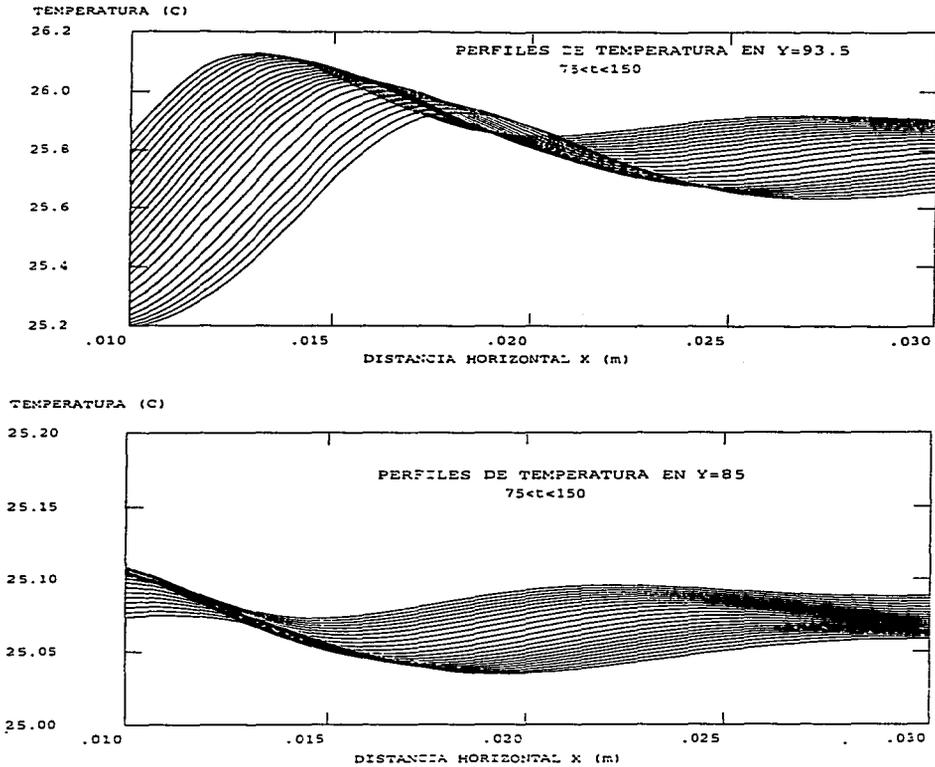


Fig. 5.11 Perfiles de temperatura de una franja horizontal ubicada en la Zona 2 en $y=99.9$ y $y=97.5$.

La Fig. 5.12 (b) es una ampliación de una sección del cuadro 5.11 (b). Esta sección queda comprendida en el interior del rectángulo formado por las rectas $x=0.015$, $x=0.030$ y $T=26.4$, $T=27.4$ y en ella se puede ver con gran detalle el comportamiento de la temperatura en ese lugar. La Fig. 5.12 (a) y (c) muestran la evolución de la temperatura para un periodo anterior y uno posterior a aquél de la Fig. 6.11 (b), de 3 a 75 s, y de 150 a 210 s respectivamente.

La Fig. 5.12 es una representación euleriana de la evolución de la temperatura en la zona 2 a una altura de 97.5 mm. En el inciso (a) están los perfiles de temperatura que corresponden a tiempos de 3 a 75 s. En este intervalo de tiempo se observa el paso de una onda térmica con un máximo local a los 21 s de 26.9 °C, que la onda que viaja a una velocidad de orden de 2 mm/s. Un poco después (b) pasa otra porción de fluido a mayor temperatura ocasionando un máximo local; le sigue fluido a menor temperatura que a su vez ocasiona un mínimo local. Finalmente en el cuadro (c) de la Fig. 5.12 se observa que la temperatura en esa zona comienza a tener un ascenso de manera monótona.

A manera de ejemplo se puede fijar un punto ($x=20$ mm, $y=97.5$ mm) y analizar la temperatura con respecto al tiempo. Los perfiles de temperatura marcados con los segundos 21, 24, 27, 30, 33, 36 etc. en (a) muestran el ascenso y descenso de la temperatura a través del tiempo. Puede verse que las temperaturas que corresponden a este comportamiento son aproximadamente a 27.0 °C (21 s), 26.45 °C (27 s) y 27.0 °C (72 s). En (b) puede verse la continuación del evento, para 72 s, la temperatura es de 27 °C mientras que para 110 la temperatura ha bajado a 26.9 °C. En (c) puede verse que después de los 110 s la temperatura es una función creciente de tiempo para los tiempos considerados.

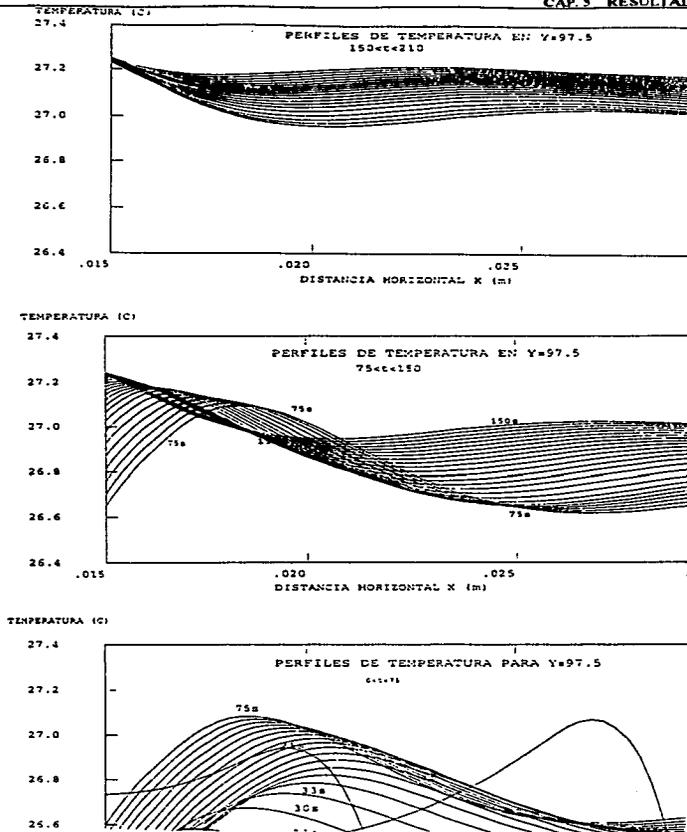


Fig. 5.12 Representación euleriana de la evolución de la temperatura en la Zona 2.

La Fig. 5.13 describe gráficamente lo que quedó anotado en el párrafo anterior del comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en el punto estudiado (20, 97.5). Obsérvese la formación del overshoot, entre los 10 y 20 s seguido de un rápido descenso de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inmediatamente después ocurre el segundo ascenso de temperatura de aproximadamente $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es seguido por el segundo descenso de temperatura que termina a los 110 s aproximadamente. A partir de entonces la temperatura se incrementa monótonamente con respecto al tiempo. La Fig. 5.14 muestra el ensamble de (a), (b) y (c) de la Fig. 5.12 y puede verse la gran complejidad de la respuesta térmica y de la cual hemos hecho resaltar lo que consideramos más evidente.

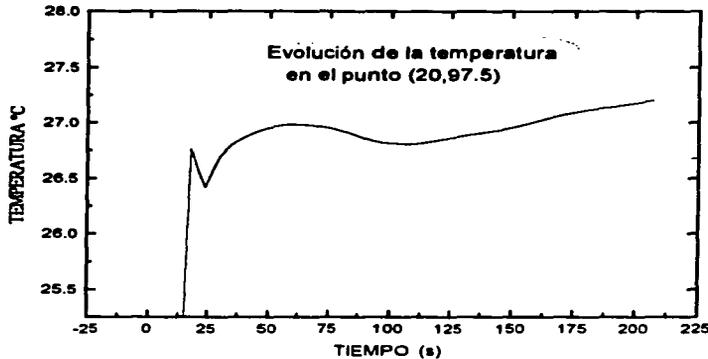


Fig. 5.13 Evolución de la temperatura de un punto localizado en (20, 97.5). Se observa la formación de un overshoot precedido por una oscilación y un aumento monótono.

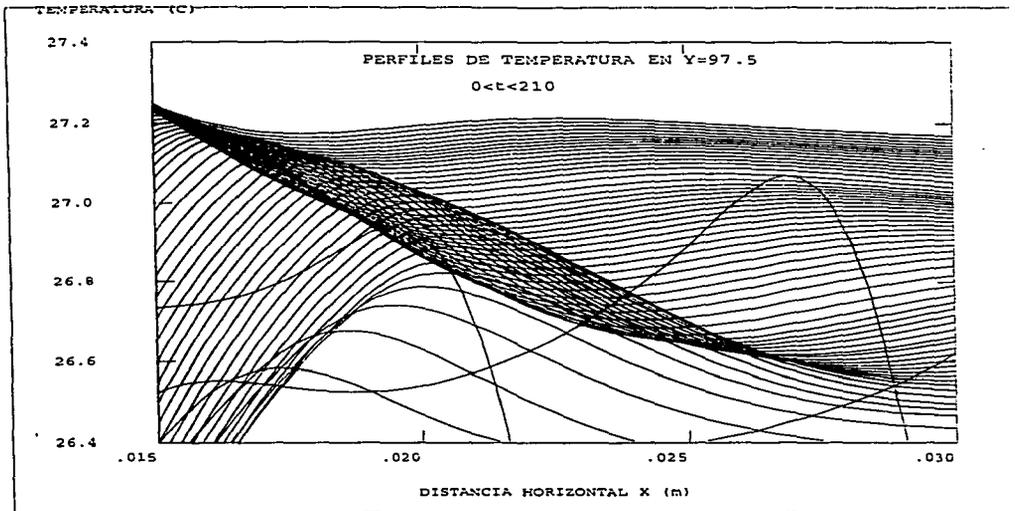


Fig. 5.14 Distribución de la temperatura en la Zona 2. En esta zona existe una gran complejidad de la respuesta térmica.

Aunque la discusión precedente fue basada en el punto (20, 97.5) se han graficado también las evoluciones de la temperatura en otros puntos localizados en la misma franja (cota de 97.5 mm), Fig. 5.15. Los puntos más cercanos a la pared caliente exhiben la temperatura más alta. Puede verse que cada respuesta térmica presenta un overshoot al inicio y que en los dos puntos más cercanos existen claramente pequeñas oscilaciones que siguen a este overshoot.

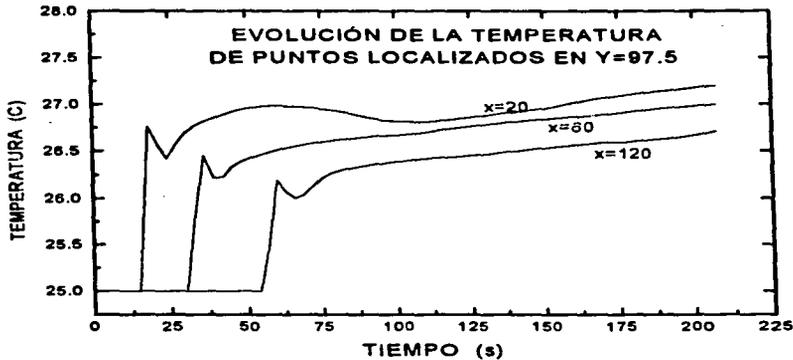


Fig. 5.15 Evolución de la temperatura de puntos localizados en una cota $y=97.5$ a distancias horizontales de 3, 20, 60 y 120 mm.

Estrato inferior.

La Fig. 5.16 muestra la evolución de la temperatura de puntos localizados a diferentes distancias horizontales y a una cota de 44 mm. Puede verse cómo la temperatura evoluciona de una manera creciente sin la existencia de oscilaciones. Como se comentó en la parte experimental, esto puede ser una consecuencia de la transferencia de calor a un medio "similar" y/o a la menor cantidad de mezclado debido a la fuerte estratificación existente en esa zona.

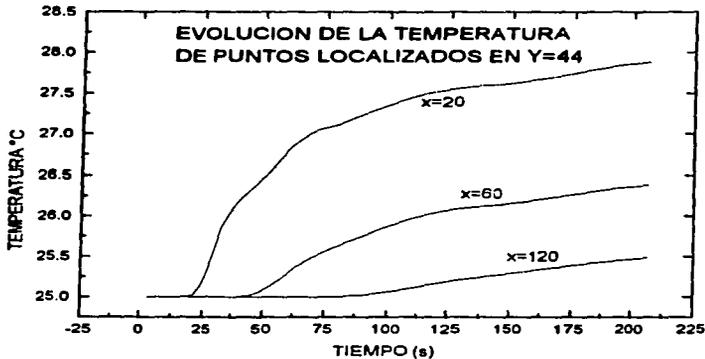


Fig. 5.16 Evolución de la temperatura para puntos localizados a una cota de 44 mm a distancias horizontales de 3, 20, 60 y 120 mm.

ii) Oscilaciones en la velocidad.

En esta sección se tratan individualmente y en detalle aquellos cambios que están apenas insinuados en la distribución global de velocidad. Como en las secciones anteriores el caso A90 se sigue utilizando para efectos de análisis.

Estrato superior.

La Fig. 5.17 muestra el comportamiento de la componente horizontal de la velocidad U_1 con respecto a x para $y=97.5$, el tiempo t interviene como un parámetro. U_1 aparece como una onda viajera que se desplaza a una velocidad constante y amplitud máxima de 3.5 mm/s. La velocidad forma un "overshoot" más pronunciado en puntos cercanos a la pared caliente.

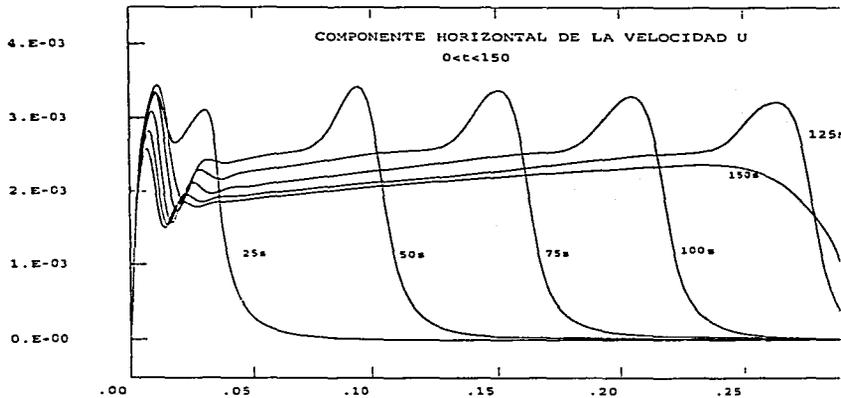


Fig. 5.17 Perfiles de velocidad U_1 en la cota $y=97$ mm localizada en el estrato superior, aquí se muestra el avance de una onda interna.

La Fig. 5.18 muestra el comportamiento de la componente vertical de la velocidad V_1 para las mismas condiciones. Observando ambas componentes puede describirse claramente el comportamiento del vórtice en la punta de la intrusión térmica horizontal de la cual se ha hablado anteriormente. La combinación de la componente U_1 con la componente V_1 , en el frente de la onda da por resultado un vector en el IV cuadrante de un sistema cartesiano con la cola del vector en el origen de coordenadas (ver Fig. 5.8). Nótese que U_1 máxima coincide con $V_1=0$ y la resultante tiene entonces un valor máximo en una posición que avanza poco después del frente. Esta coincidencia , $U_1=\max$, $V_1=0$, se hace notar mediante una flecha tanto en la Fig. 5.17 como en la 6.18. Nótese que entre 0 y 30 mm (zona 2) existen oscilaciones con respecto a x , tanto en U_1 como en V_1 , para todo tiempo dentro del intervalo estudiado, que son responsables del rizo permanente que puede apreciarse en la Fig. 5.8 en la zona 2.

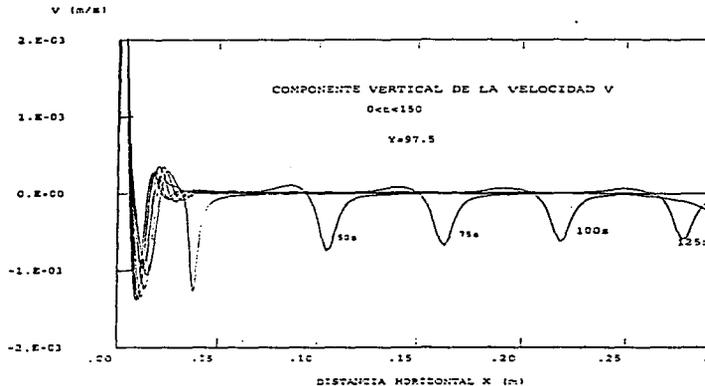


Fig. 5.18 Perfiles de la componente vertical de la velocidad V_1 correspondientes a una cota de 97 mm.

El cambio de la velocidad mostrado en la Fig. 5.19 para el punto (20,97.5), ejemplifica el comportamiento típico para los puntos en la franja horizontal bajo estudio, ver también Fig. 5.17. Aunque todo lo descrito hasta aquí es para los primeros 180 s (tiempo de arribo de la intrusión térmica a la pared fría), es obvio que al tender todo el sistema al equilibrio térmico, la velocidad mostrada en la Fig. 5.19 tenderá a cero.

La simulación numérica puede extenderse para tiempos mayores. En el Anexo 5 se muestran las distribuciones de velocidad, temperatura y concentración para 180 y 210 s. En ellas se puede observar un comportamiento de vórtices por subregiones (o de recirculación en subregiones) del mismo tipo que ha sido reportado por Ivey (4). El comportamiento de la temperatura se asemeja a una onda viajera que llega al nodo y se regresa disminuyendo de amplitud en todo momento (debido a efectos de difusión) hasta finalmente desaparecer.

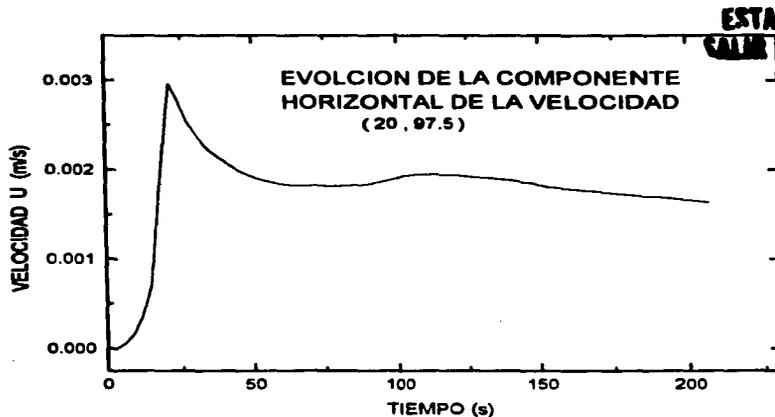


Fig. 5.19 Evolución de la componente horizontal de la velocidad para un punto de coordenadas (21, 97.5).

Estrato inferior.

La Fig. 5.20 muestra el comportamiento de la componente horizontal de la velocidad U_1 , en una franja horizontal correspondiente a una cota de 44 mm, el tiempo t aparece como parámetro. Nótese la gran variedad de amplitudes que se tienen en comparación con la oscilación en el estrato superior. Además, ninguna de ellas es una onda viajera sola sino más bien un tren de ondas de diferentes amplitudes que se disipan en el seno del líquido. La variedad de formas de onda y amplitudes debe tener origen en la no homogeneidad de la concentración en la intercara difusa, llamada zona 1 en la parte experimental. Sin embargo hasta el momento no se cuenta con una justificación que sustente esta hipótesis.

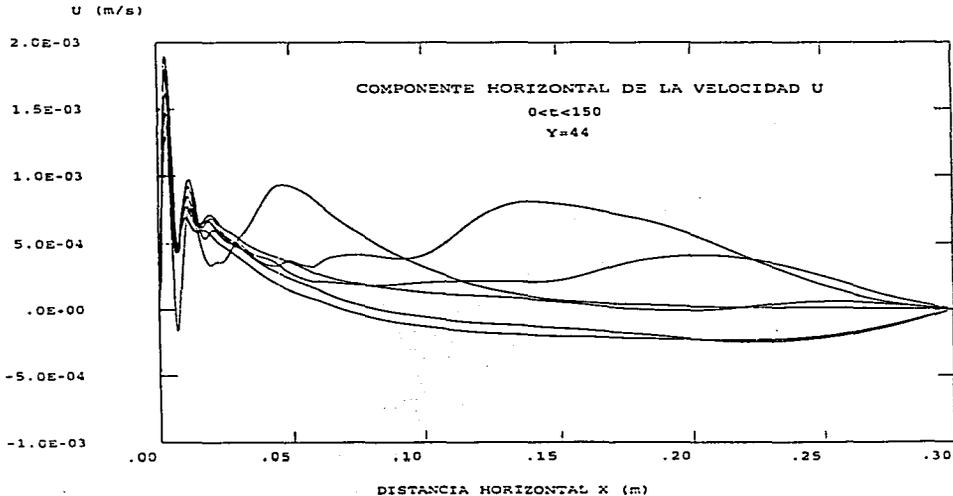


Fig. 5.20 Evolución de los perfiles de velocidad U_1 correspondientes a una cota de 44 mm

De la observación cuidadosa del estrato inferior en la Fig. 5.8 y de la discusión de la sección anterior, puede concluirse que no existen oscilaciones relevantes en V_1 , excepto cerca de la pared caliente (no existe vórtice en la punta de la intrusión térmica).

La Fig. 5.21 muestra la evolución de la componente U_1 con respecto al tiempo para varios puntos localizados en la franja de interés (cota $y=44$ mm). Puede apreciarse que las mayores velocidades se dan al inicio del fenómeno y que disminuyen a medida que se avanza en el tiempo. Si se toma por ejemplo la traza correspondiente a los 60 mm puede verse claramente lo que se ha llamado anteriormente un tren de ondas.

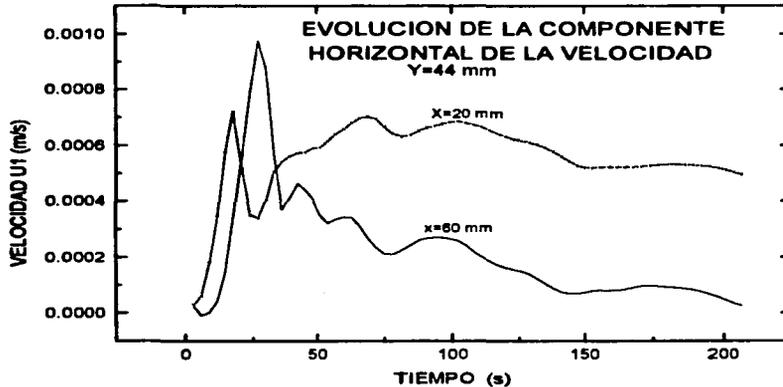


Fig. 5.21 Evolución puntual de la componente U_1 de la velocidad. Las trazas (a), y (b) corresponden a puntos ubicados en una cota $y=44$ mm con distancias horizontales 20 y 60 mm respectivamente.

5.3 Influencias generales del ángulo de inclinación.

A continuación para efectos de comparación se presentan los caso restantes (A60, B90 y B60). Con el objeto de no repetir, aquí no se tratan los detalles que se puntualizaron para A90 como las oscilaciones en T, U1 y V1; sin embargo su existencia puede deducirse al observar los campos globales de velocidad y temperatura correspondientes a estos casos. En esta sección sólo se discuten de manera general las diferencias causadas por el cambio de inclinación de la pared caliente.

En la Fig. 5.22 se muestra por medio de líneas isotermas la evolución de la temperatura para el caso de alta concentración y pared inclinada a 60° (caso A60). Se puede apreciar las características propias del problema en estudio: capas límite, capas de intrusión térmica horizontal y las zonas 1 y 2 antes definidas como zonas de gran actividad.

En el caso A60 la intrusión térmica superior viaja a mayor velocidad (aprox. 3 mm/s) que la intrusión inferior (2 mm/s). Esto concuerda con lo que se tiene experimentalmente y las posibles razones por lo que ocurre este hecho fueron dadas en la sección correspondiente (ver sección 4.4). La intrusión superior alcanza a la pared fría en un tiempo aproximado de 120 s. Ambas intrusiones térmicas del caso A60 viajan a una mayor velocidad y tienen mayor grosor que en el caso A90, esto puede ser una consecuencia de la mayor área de transferencia de calor que presenta una pared inclinada en comparación con una pared vertical.

La evolución del campo de velocidades para el caso A60 se muestra en la Fig. 5.23. En el tiempo que tarda en llegar la intrusión a la pared opuesta se puede ver una recirculación global en ambos estratos, la existencia de un vórtice en la punta de la intrusión superior y el avance en capas horizontales de la intrusión inferior. Comparando con el caso A90 (Fig. 5.8) se puede afirmar que existe mayor actividad a tiempos iguales, por tanto el avance de las intrusiones es un 30% más rápido para A60 que para A90. Otra observación

es que en la Zona 1 existen cambios más pronunciados en la trayectoria del fluido, esto seguramente por el mayor cambio en la dirección que tiene que sufrir el fluido al dar vuelta por una esquina más aguda siguiendo la trayectoria A-B-C-D. También se puede observar la existencia de una onda interna que viaja hacia a la pared fría, llega en 120 s. Para el caso A90 se tiene que en este tiempo, el fluido lleva recorrido un 85% del trayecto.

En cuanto a los perfiles de concentración los cambios sufridos pueden considerarse irrelevantes, comparado con el Caso A90, ver Fig. 5.24 y 5.9.

En la Fig. 5.25 se muestra de la temperatura para el caso de baja concentración y pared vertical B90. La distribución de velocidades correspondiente se muestra en la Fig. 5.26 y las correspondientes isotónicas en la Fig. 5.27. Para efectos de comparación las variables correspondientes para el caso de pared inclinada y baja concentración, B60 se muestran en las Figs. 5.28, 5.29 y 5.30.

Comparando las Figs. 5.25 con la Fig. 5.28 puede notarse que para esta concentración, al igual que en la concentración alta, las intrusiones térmicas en el caso de pared inclinada avanzan hacia la pared fría más rápidamente en un 30%. Esto posiblemente sea debido al área de transferencia de calor más grande que se tiene para la pared inclinada y que origina una mayor cantidad de energía suministrada al sistema. Al igual que en el caso de alta concentración los perfiles de salinidad correspondientes a los casos B60 y B90 presentan las mismas características generales entre sí.

5.4 Influencia de la concentración inicial.

Para encontrar la influencia de la concentración podemos comparar los casos A90 vs B90 y A60 vs B60. Primero discutiremos los casos para la cavidad rectangular. Comparando las Fig. 5.25 contra la Fig. 5.7 puede notarse que la velocidad de avance de las intrusiones son a *grosso modo* iguales. La influencia importante aquí radica en el fuerte desplazamiento vertical que, como un todo, ha sufrido la intrusión térmica en el caso de baja concentración. Esto es, básicamente la zona no convectiva ha desaparecido siendo ocupada por la intrusión horizontal como puede verse fácilmente comparando A90 y B90 a los 30, 60, 90 y 120 s. (Figs. 5.26 y 5.8). Esto indica que el efecto estabilizador del gradiente de concentración en la intercara difusa no es suficiente para evitar el movimiento. De hecho la forma en zig-zag que presenta una de las líneas isotónicas indica una incipiente "ruptura" de intercara difusa y un proceso también incipiente de mezclado no difusivo.

Comparando las Figs. 5.9 y 5.27 puede verse que, aún en los detalles, los perfiles de concentración correspondientes a alta y baja concentración para la cavidad a 90 son muy similares entre sí.

Comparemos ahora la Fig. 5.22 con la Fig. 5.28 que muestran, para la cavidad a 60°, las líneas isoterma para alta y baja concentración respectivamente. Puede verse que en cuanto al avance de la intrusión térmica inferior, el caso B60 avanza más rápidamente que la intrusión correspondiente al caso de alta concentración. Además, para el caso B60 la intrusión inferior viaja a una cota más alta que en el caso A60. Como un detalle adicional se observa que B60 no sigue las tendencias encontradas en los otros tres casos: el comportamiento relativo entre intrusiones superior e inferior es contrario a lo encontrado; es decir, para B60 la intrusión inferior tiene una mayor velocidad de desplazamiento que la intrusión superior.

Siguiendo nuestro análisis para la cavidad de 60° y salinidad de alta y baja concentración, nos corresponde ahora comparar las distribuciones de velocidad correspondientes a A60 y B60. Para este efecto comparamos las Figuras 5.23 y 5.29. Esta comparación evidencia, al igual que los caso de alta y baja concentración para la cavidad rectangular que la parte no convectiva desaparece y en su lugar viaja la intrusión térmica inferior, aquí son válidos los comentarios hechos anteriormente para la cavidad rectangular.

Finalmente, se señalan las diferencias entre los perfiles de concentración B60 y aquéllos correspondientes a A60; para ello se compara la Fig. 5.30 con la 5.24. Puede verse que en ambos casos las isotónicas tienen formas interesantes que indican un desplazamiento vertical de salmuera hacia el estrato de agua y que ocurre en la vecindad de la pared caliente. Esta intromisión de salmuera decae a medida que avanza el tiempo (ΔT decreciente). La comparación entre alta y baja concentración indica un mayor grado de inestabilidad en la zona estratificada para el caso de baja concentración (menor fuerza estabilizadora).

Podemos ver que los perfiles de concentración para el caso B60, muestran formaciones complejas e interesantes que denotan una incipiente "ruptura" (o mezclado no difusivo) de la zona estratificada como consecuencia del fluido que ahora se desplaza en lo que antes era una zona no convectiva. Con relación a lo llamado "mezclado no difusivo" puede verse en el cuadro (b) de la Fig. 5.30 una pequeña porción de fluido estrangulado (casi por completo) rodeado por fluido de una concentración diferente.

Aunque muchas conclusiones han sido ya establecidas durante la discusión de los resultados numéricos que se ha hecho en este capítulo, los más relevantes de ellos serán resumidos en el capítulo de conclusiones generales al final de este trabajo.

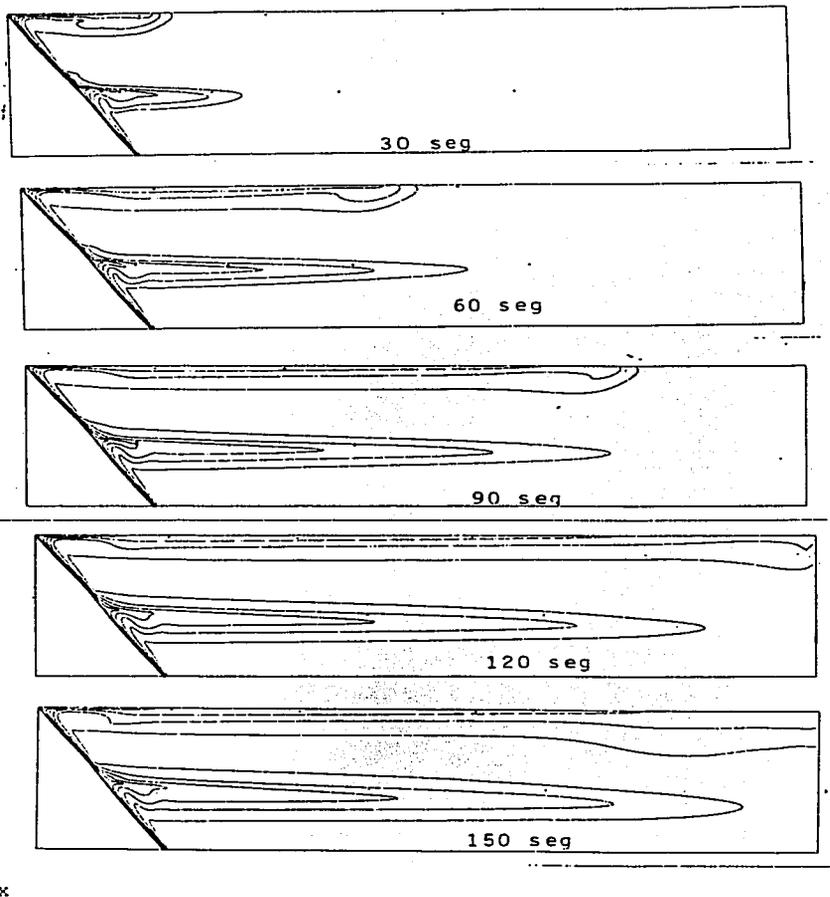


Fig. 5.22 Evolución global de la temperatura en el caso A60.

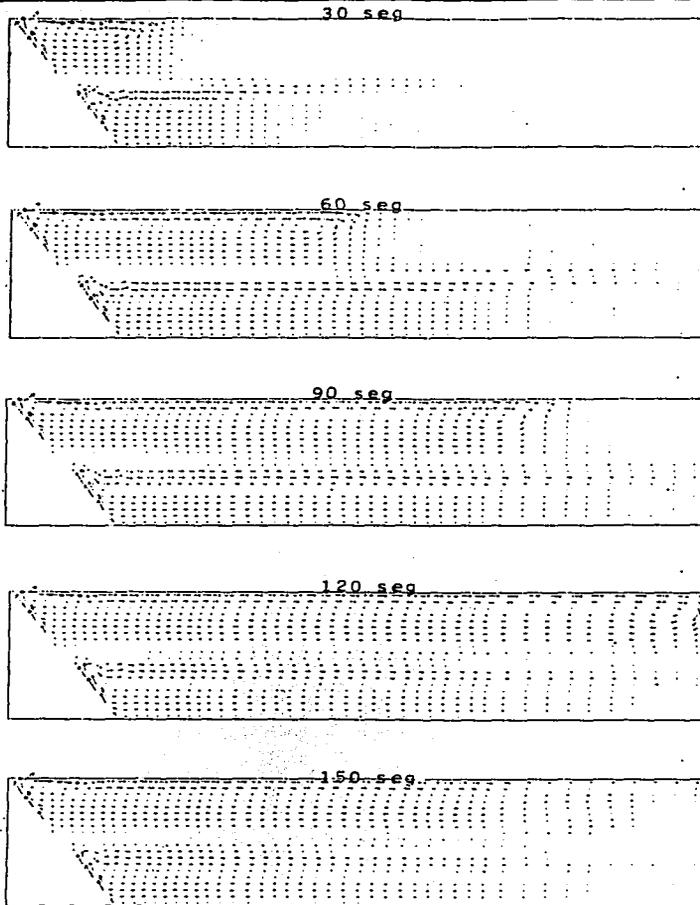


Fig. 5.23 Evolución global de la velocidad en el caso A60.

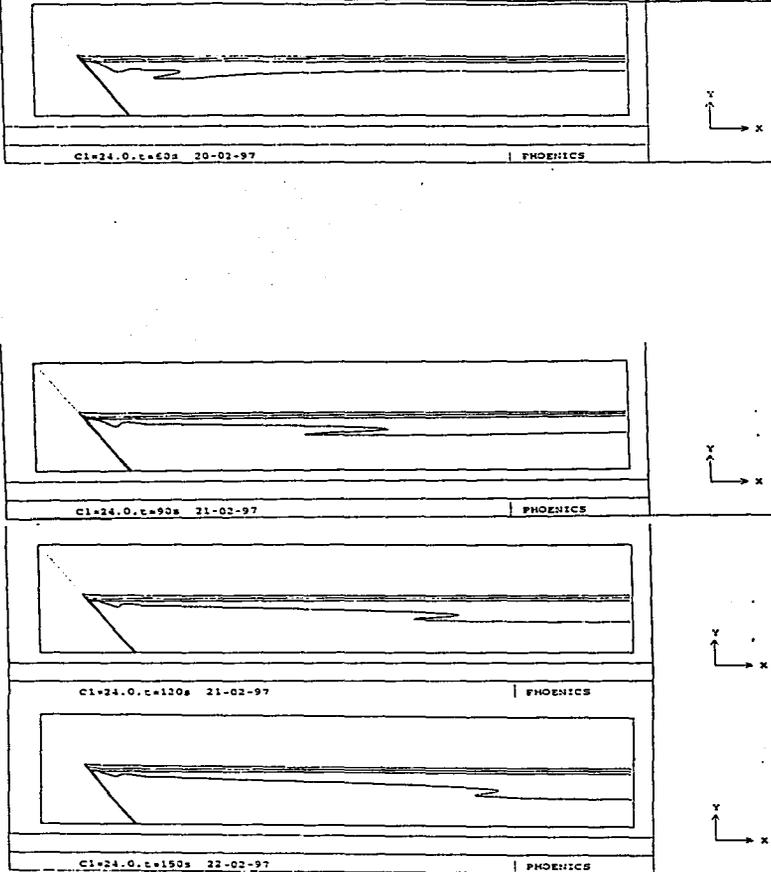


Fig. 5.24 Evolución global de la concentración salina en el caso A60.

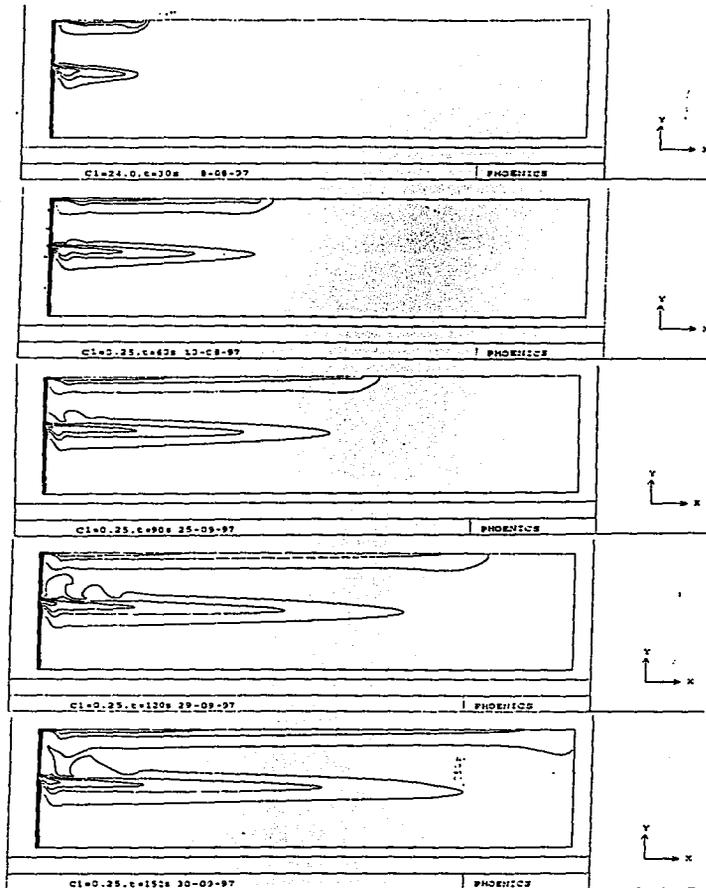


Fig. 5.25 Evolución global de la temperatura en el caso B90.

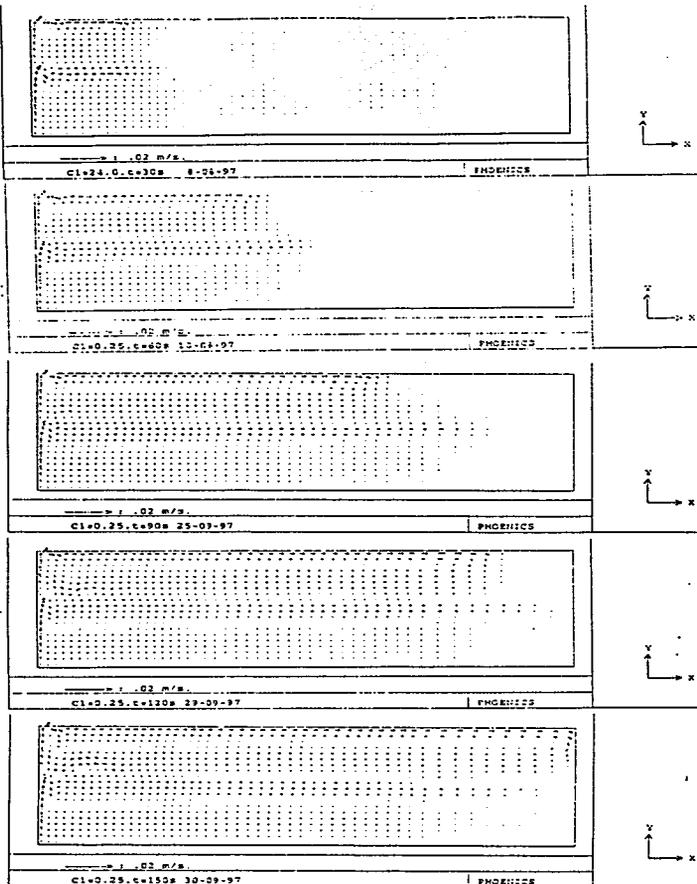


Fig. 5.27 Evolución global de la velocidad en el caso B90.

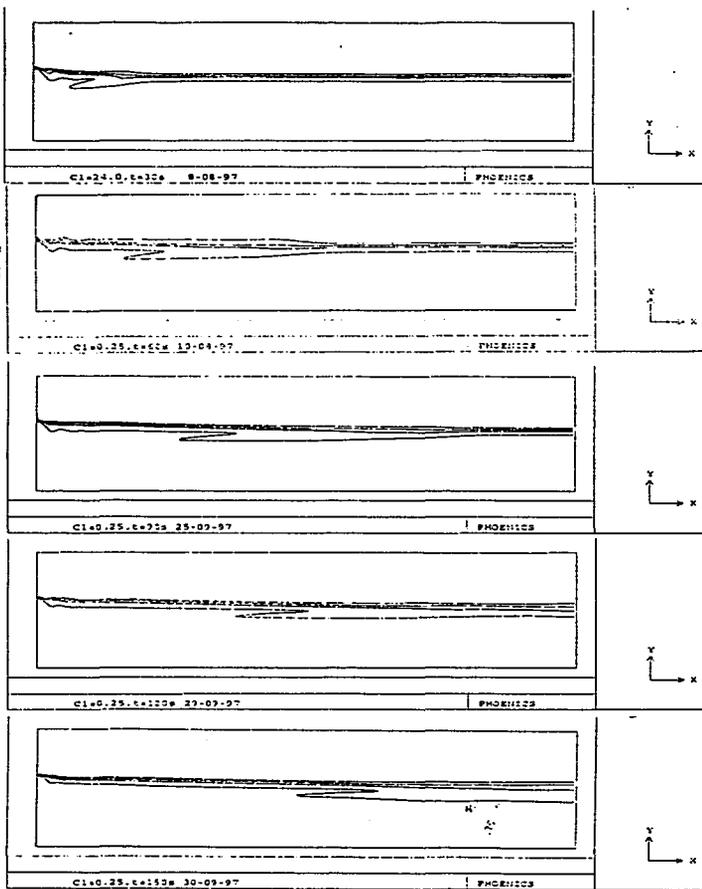


Fig. 5.27 Evolución global de la concentración salina en el caso B90.

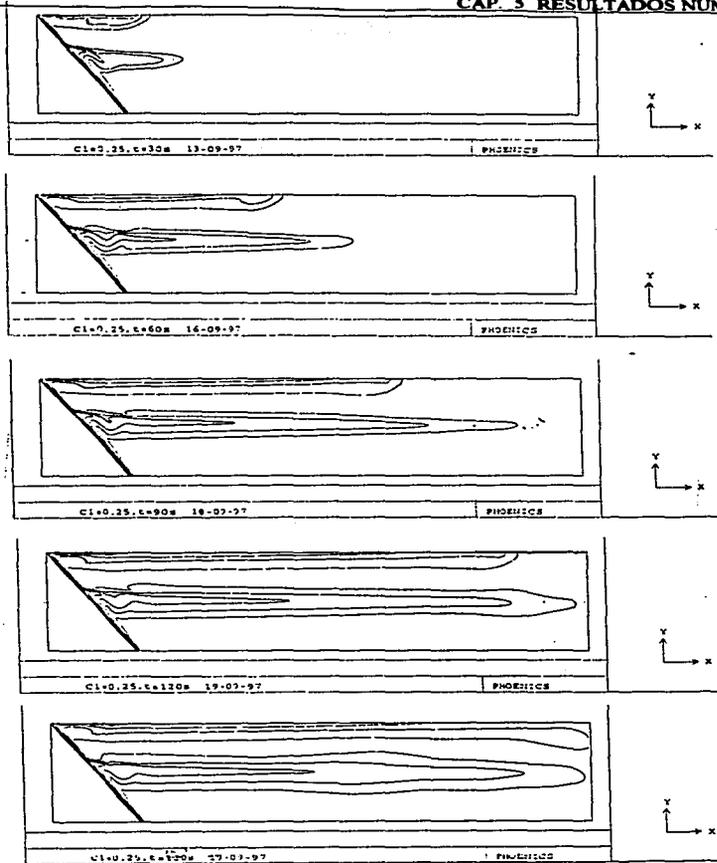


Fig. 5.28 Evolución global de la temperatura en el caso B60.

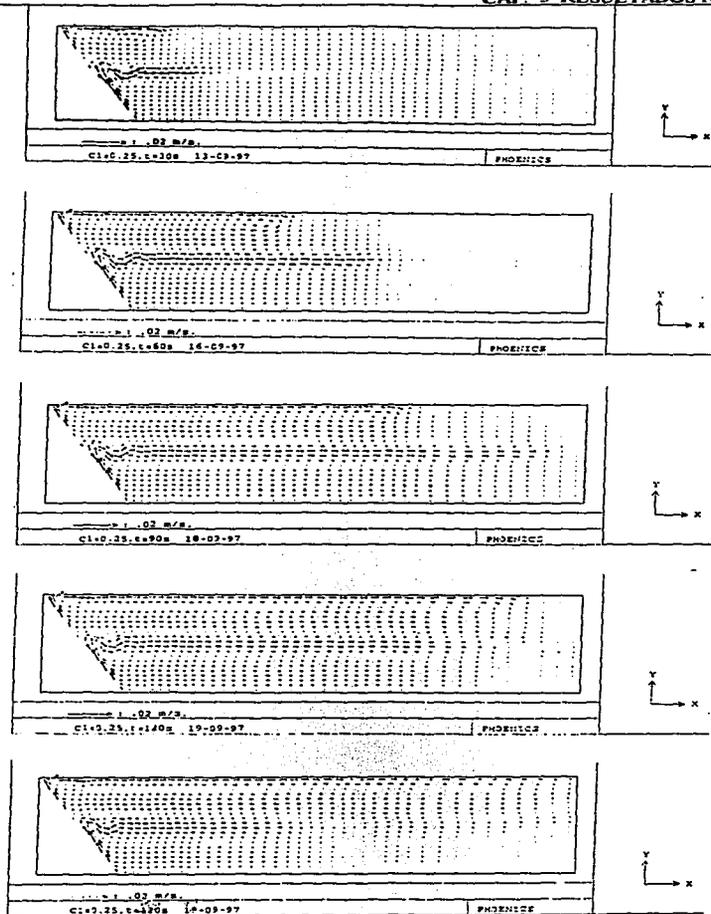


Fig. 5.29 Evolución global de la velocidad en el caso B60.

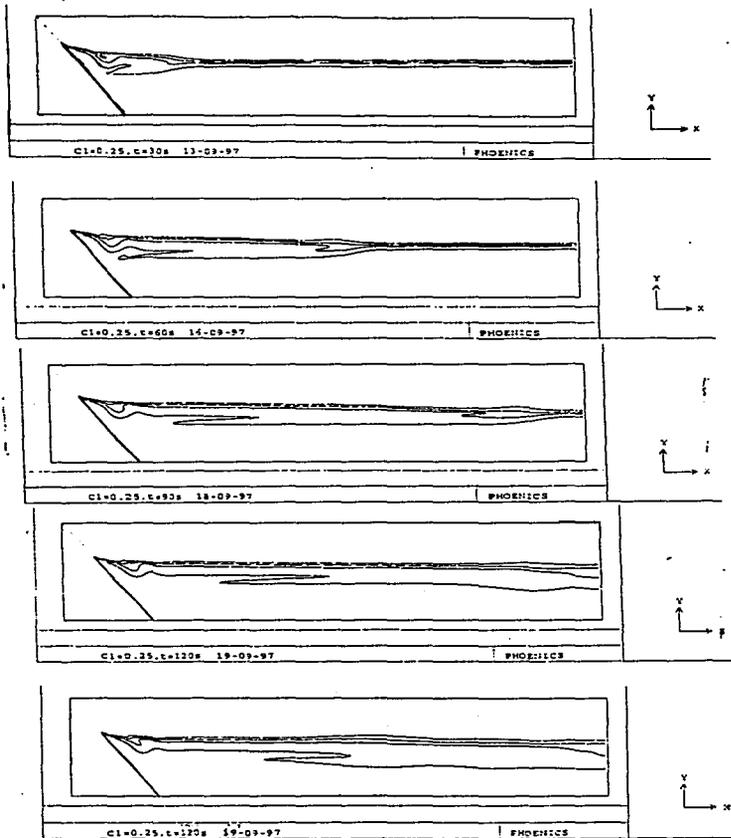


Fig. 5.30 Evolución global de la concentración salina en el caso B60.

6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En los capítulos anteriores se presentaron independientemente los resultados teóricos, experimentales y numéricos, así como también los resultados de P&I pertinentes a este trabajo. En este capítulo se discute la comparación cuantitativa de algunos parámetros que son relevantes a la evolución global del fenómeno. También se presentan algunas gráficas que muestran en detalle la comparación experimental y numérica de la evolución térmica en puntos ubicados en el seno de la cavidad. Se sigue utilizando el caso A90 a manera de ejemplo.

Antes de continuar es necesario dar los valores numéricos de las escalas características mencionadas en el capítulo 2. Los datos conocidos para cada estrato son: $h=5$ cm, $l=30$ cm, $A=0.166$, $\Delta T=5$ °C, y $Pr=6.2$. Substituyéndolos en las correspondientes relaciones resultan las siguientes escalas características del flujo.

Tiempo en que la capa límite alcanza el estado permanente:

$$\tau \sim \frac{h^2}{\alpha Ra^{1/2}} = 5s$$

Número de Rayleigh:

$$Ra \sim \frac{g \beta \Delta T h^3}{\nu \alpha} = 1.42 \cdot 10^7$$

Espesor de la capa límite térmica:

$$\delta_T \sim \frac{h}{Ra^{1/4}} = 1 \text{ mm}$$

Espesor de la capa límite viscosa:

$$\delta_v \sim Pr^{1/2} \delta_T = 2.5 \text{ mm}$$

Velocidad vertical de la capa límite:

$$v \sim \frac{\alpha Ra^{1/2}}{h} = 10 \text{ mm/s}$$

Tiempo en que la intrusión térmica cambia de carácter inercial a viscoso:

$$Tt \sim \frac{h^2}{\alpha Pr^{2/3} Ra^{1/3}} = 31 s$$

Tiempo que tarda en llegar la intrusión horizontal a la pared opuesta:

$$T_v \sim \frac{l^{3/4} h^{3/4}}{\alpha Ra^{7/16}} = 122 s$$

Espesor de la intrusión térmica (viscosa) cuando llega a la pared opuesta

$$\Delta_{vf} \sim \frac{h^{3/4} l^{1/4}}{Ra^{3/16}} = 2 \text{ mm}$$

6.1 Comparación de parámetros relevantes al flujo.

Después de haber alimentado al esquema numérico con la información experimental del perfil inicial de concentración salina se obtuvo una gran mejora ya que los resultados numéricos se aproximaron a los teóricos y a los experimentales. En la Tabla 6.1 se presenta la comparación entre teoría, experimentación y simulación numérica de algunos parámetros relevantes del flujo.

Tabla 6.1 Comparación de parámetros relevantes del flujo para el caso A90.

	TEORIA (P&I)	EXPERIMENTAL	SOLUCIÓN NUMÉRICA
Crecimiento de la capa limite	5 s	15 s	12 s
Espesor de la capa limite térmica	2.5 mm	3 mm	3 mm
Espesor de la capa limite viscosa	6 mm		6 mm
Intrusión térmica superior llega a la pared opuesta	130 s	190 s	150 s
Intrusión térmica inferior llega a la pared opuesta		294 s	230 s
Velocidad de la intrusión térmica superior	2.3 mm/s	1.57 mm/s	2.2 mm/s
Velocidad de la intrusión térmica inferior		1.02 mm/s	1.3 mm/s

Nótese que los tiempos de crecimiento de la capa límite tanto experimental como numérico son mayores que el tiempo característico teórico. Esto se atribuye a que en ambos casos el tiempo característico de calentamiento de la pared es mayor que el tiempo característico de crecimiento de capa límite en el análisis de P&I. Esto da como consecuencia que el tiempo de crecimiento de la capa límite experimental y numérica sea mayor pero dentro del orden de magnitud teórico. Puede verse que los espesores de la capa límite térmica concuerdan excepcionalmente bien en los tres casos. El espesor de la capa límite viscosa sólo se pudo obtener de manera teórica y numérica siendo concordante.

La velocidad de avance de las intrusiones térmicas hacia la pared fría concuerda de manera aceptable para los tres esquemas, aunque es ligeramente menor en el experimento, esto debido a que, mientras que en el esquema de P&I y en el esquema numérico se cumple estrictamente la condición de superficie adiabática, la condición adiabática no se cumple en el esquema experimental.

La evolución hacia estado permanente puede observarse comparando las historias de temperatura experimentales medidas por los termopares con la historias de temperatura obtenidas numéricamente en puntos correspondientes. La Fig. 6.1 muestra las trazas de puntos ubicados en la trayectoria por donde viaja la intrusión superior. La Fig. 6.2 muestra las trazas de puntos análogos para la intrusión inferior.

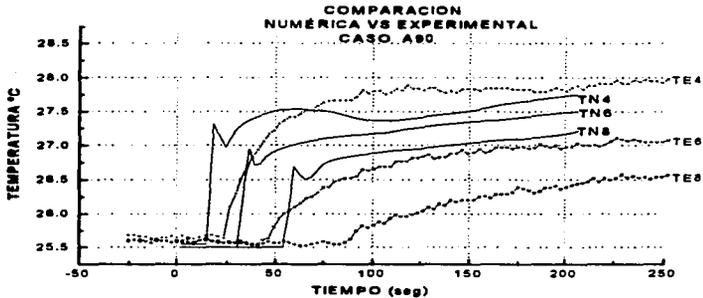


Fig. 6.1 Comparación de la evolución de la temperatura en puntos localizados en la trayectoria de la intrusión térmica horizontal superior. La letra E significa resultados experimentales y la letra N numéricos.

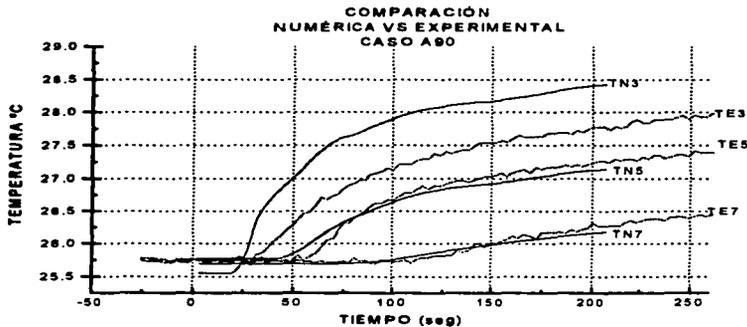


Fig. 6.2 Comparación de las historias de temperatura para puntos localizados en la zona por donde viaja la intrusión inferior. Las letras N ó E se refieren al caso numérico ó experimental respectivamente.

Los cambios abruptos el punto de inflexión de las temperaturas correspondientes a los resultados numéricos para el estrato superior mostrados en la Fig. 6.1 no se observan en las trazas que corresponden a la parte experimental. Las inflexiones más suaves para los resultados experimentales y el retraso con respecto al tiempo del punto de inflexión se pueden atribuir a la condición adiabática no estrictamente satisfecha que se tiene en la superficie del agua en el experimento. Existe mejor concordancia de las historias de temperatura en los puntos correspondientes a la intrusión inferior Fig. 6.2 ya que aquí el esquema numérico permite la transferencia de calor por conducción entre estratos.

Las velocidades de intrusión térmica horizontal de los casos con pared inclinada se han anotado en la Tabla 6.2 y 6.3, la primera para alta concentración y la segunda para baja concentración. Estas tablas contienen la información primaria acerca del tiempo al cual sucede el cambio de inflexión en las Figuras 6.1 y 6.2.

Tabla 6.2 Comparación de las velocidades de la intrusión térmica para alta concentración.

	experimental		numérico	
	superior	inferior	superior	inferior
V 45°	1.56	1.13		
V 60°	1.63	0.93	3.0	2.9
V 90°	1.57	1.02	2.2	1.4

Tabla 6.3 Comparación de las velocidades de la intrusión térmica para alta concentración.

	experimental		numérico	
	superior	inferior	superior	inferior
V 45°	1.68	1.16		
V 60°	1.58	1.25	2.70	3.02
V 90°	1.65	1.07	2.10	1.70

En los cuatro casos (A90, A60, B90 y B60) las velocidades del esquema numérico son mayores que las velocidades experimentales, principalmente en lo referente a los casos con pared inclinada.

6.2 CONCLUSIONES

1. Se encontró que el avance más rápido de la intrusión térmica superior con respecto al avance de la intrusión térmica inferior es una característica general que se presenta en todos los experimentos realizados.
2. Por consiguiente, esta característica es independiente tanto de la concentración inicial como de la inclinación de la pared caliente, al menos dentro de los rangos de nuestros experimentos.
3. Aunque el plan original de este trabajo no incluía la parte numérica se hizo también una simulación, implementando para ella un programa comercial. El programa numérico se alimentó con datos experimentales, encontrándose que los resultados numéricos describen en lo general correctamente los fenómenos globales observados en los experimentos.
4. El avance más lento de la intrusión del estrato inferior se explicó con base a la mayor transferencia de calor por conducción entre la salmuera y el agua (perdiéndose así información térmica hacia arriba y hacia abajo de la intrusión horizontal), en comparación

con la transferencia de calor entre el agua y la capa de aire por encima de ella. Asimismo, esta mayor transferencia de calor entre la salmuera y el agua pudo haber tenido una componente convectiva debido a la erosión de la interfase difusa representada por un considerable ensanchamiento de ella realizado durante un tiempo relativamente pequeño. Esta erosión sería debida al movimiento relativo entre la salmuera y el agua producto del avance convectivo de las intrusiones horizontales.

6. Se encontraron en los resultados experimentales oscilaciones tanto térmicas como hidrodinámicas en el estrato (homogéneo) superior, mientras que en el inferior (con gradiente salino) sólo se observaron oscilaciones hidrodinámicas. En todo caso estas últimas son más débiles que en el estrato superior como pudo observarse en la visualización del flujo.

7. Las oscilaciones térmicas experimentales (en el estrato superior) presentan una riquísima variedad de comportamientos que dependen aparentemente de la posición de los puntos en que se miden, siendo muy activas en una zona cerca de la esquina agua-aire- pared caliente. Estas oscilaciones parecen ser de dos tipos: pequeñas oscilaciones de periodo entre 15 y 20 s, y grandes oscilaciones de periodos de 180 s sobre las cuales parecen viajar las oscilaciones pequeñas. El periodo largo de las grandes oscilaciones podría estar relacionado con la longitud de la cavidad que es una de las escalas características del problema.

8. En los resultados numéricos pueden observarse oscilaciones tanto térmicas como hidrodinámicas en ambos estratos de la cavidad. Estas oscilaciones representan un sinnúmero de detalles interesantes que ilustran la gran complejidad del problema.

9 El esquema numérico simula muy de cerca el incremento de la altura a la cual se desplaza la intrusión horizontal para una concentración baja, indicando que dicha intrusión se desplaza en la zona supuestamente no convectiva. Este último punto puede tener relevancia en cuanto a la construcción de los estanques solares.

10. Además de los conocimientos nuevos enumerados anteriormente y que son producto de este trabajo, se ha desarrollado una infraestructura experimental robusta que permite acercarse a las condiciones planteadas al principio de este trabajo, teniéndose ahora una estructura coherente entre la teoría, la experimentación y la simulación numérica con resultados que concuerdan razonablemente.

TALK=F;RUN(1,1);VDU=TTY

TSTSWP = -1

Conveccion Natural en un tanque con superficie libre y pared inclinada, que inicialmente contiene quince capas de fluido a distintas concentraciones.

Las regiones forman una interfaz salina experimental.

El gradiente de temperatura es de 5 C con funcion tanh.

La malla es de 300x121 (siete celdas extras en la superficie libre)

Condicion de frontera adiabatica en la superficie libre.

LSWEEP=10 TSTEP=0.1 seg Escribe files en M c/3seg

GROUP 1. Run title and other preliminaries

TEXT(C1=24.0,t=30s 7-02-97)

SALINITY EXPANSION COEFFICIENT-----	RG(1)
REFERENCE CONCENTRATION-----	RG(2)
REFERENCE DENSITY -----	RG(3)
GRAVITY ACCELERATION-----	RG(4)
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT-----	RG(5)
KINEMATIC VISCOSITY OF THE MEDIUM---	RG(6)
REFERENCE TEMPERATURE-----	RG(7)
WALL TEMPERATURE-----	RG(8)

REAL (RG(100))

RG(1) = 6.8E-04

RG(2) = 0.0

RG(3) = 997.0

RG(4) = 9.81

RG(5) = 2.9E-04

RG(6) = 8.8E-07

RG(7) = 25.0

RG(8) = 30.0

GROUP 2. Transience; time-step specification

STEADY = F

GRDPWR(T,300,30.,1.0)

GROUP 3. X-direction grid specification

NX=300;XULAST=1.0

XFRAC(1)=-193;XFRAC(2)=0.00030

XFRAC(3)=107;XFRAC(4)=0.0028037

GROUP 4. Y-direction grid specification

GRDPWR(Y,114,0.0965,1.0)

NY=121;YVLAST=1.0

YFRAC(1)=-44;YFRAC(2)=0.00100

YFRAC(3)=4;YFRAC(4)=0.0005000

YFRAC(5)=18;YFRAC(6)=0.00025

YFRAC(7)=4;YFRAC(8)=0.0005000

YFRAC(9)=41;YFRAC(10)=0.0010000

YFRAC(11)=2;YFRAC(12)=0.0005000

YFRAC(13)=8;YFRAC(14)=0.0002500

GROUP 5. Z-direction specification

GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion

GROUP 7. Variables stored, solved & named

SOLVE(P1,U1,V1,H1,C1);SOLUTN(P1,Y,Y,Y,P,P,P);NAME(H1)=TEMP

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices

TERMS(TEMP,N,Y,Y,Y,Y,N)

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

RHO1 = RG(3)

ENUL = RG(6)

PRNDTL(TEMP) = 6.0

PRNDTL(C1) = 553.46

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

NAMFI=PF00

FIINIT(P1)=0.0;FIINIT(U1)=0.0;FIINIT(V1)=0.0;FIINIT(TEMP)=25.0

FIINIT(C1)=0.0

(2)

INICIALIZACION DE LA CONCENTRACION EN LAS QUINCE REGIONES

PATCH(CONBOOT, INIVAL, 1, NX, 1, 38, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONBOOT, C1, 1.0, 24.0)
PATCH(CONF1, INIVAL, 1, NX, 39, 39, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF1, C1, 1.0, 23.5)
PATCH(CONF2, INIVAL, 1, NX, 40, 41, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF2, C1, 1.0, 23.0)
PATCH(CONF3, INIVAL, 1, NX, 42, 43, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF3, C1, 1.0, 22.0)
PATCH(CONF4, INIVAL, 1, NX, 44, 46, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF4, C1, 1.0, 20.1)
PATCH(CONF5, INIVAL, 1, NX, 47, 48, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF5, C1, 1.0, 18.5)
PATCH(CONF6, INIVAL, 1, NX, 49, 51, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF6, C1, 1.0, 16.9)
PATCH(CONF7, INIVAL, 1, NX, 52, 55, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF7, C1, 1.0, 14.5)
PATCH(CONF8, INIVAL, 1, NX, 56, 59, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF8, C1, 1.0, 12.1)
PATCH(CONF9, INIVAL, 1, NX, 60, 63, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF9, C1, 1.0, 9.65)
PATCH(CONF10, INIVAL, 1, NX, 64, 66, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF10, C1, 1.0, 7.2)
PATCH(CONF11, INIVAL, 1, NX, 67, 68, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF11, C1, 1.0, 5.45)
PATCH(CONF12, INIVAL, 1, NX, 69, 70, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF12, C1, 1.0, 3.7)
PATCH(CONF13, INIVAL, 1, NX, 71, 72, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONF13, C1, 1.0, 2.3)
PATCH(CONTOP, INIVAL, 1, NX, 73, NY, 1, 1, 1, 1)
INIT(CONTOP, C1, 1.0, 0.0)

*BLOQUEO DE CELDAS MEDIANTE POROSIDADES

-IY=1

CONPOR(0.0, SOUTH, -193, -193, -1, -1, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 193, 193, 1, 1, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -192, -192, -1, -1, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -192, -192, -1, -1, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -191, -191, -2, -2, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 191, 191, 2, 2, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -190, -190, -2, -2, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -190, -190, -2, -2, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -189, -189, -3, -3, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 189, 189, 3, 3, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -188, -188, -3, -3, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -188, -188, -3, -3, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -187, -187, -4, -4, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 187, 187, 4, 4, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -186, -186, -4, -4, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -186, -186, -4, -4, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -185, -185, -5, -5, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 185, 185, 5, 5, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -184, -184, -5, -5, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -184, -184, -5, -5, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -183, -183, -6, -6, 1, 1, 1)
CONPOR(0.5, WEST, 183, 183, 6, 6, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, SOUTH, -182, -182, -6, -6, 1, 1, 1)
CONPOR(0.0, WEST, -182, -182, -6, -6, 1, 10)

CONPOR (0.0, CELL, 1, 46, 91, 91, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 44, 92, 92, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 42, 93, 93, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 40, 94, 94, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 38, 95, 95, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 36, 96, 96, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 34, 97, 97, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 32, 98, 98, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 30, 99, 99, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 28, 100, 100, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 26, 101, 101, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 24, 102, 102, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 22, 103, 103, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 20, 104, 104, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 18, 105, 105, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 16, 106, 106, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 14, 107, 107, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 12, 108, 108, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 10, 109, 109, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 8, 110, 110, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 6, 111, 111, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 5, 112, 112, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 4, 113, 113, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 3, 114, 114, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 3, 115, 115, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 2, 116, 116, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 2, 117, 117, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 1, 118, 118, 1, 1)
 CONPOR (0.0, CELL, 1, 1, 119, 119, 1, 1)

10
11

INIFLD = T

GROUP 12. Convection and diffusion adjustments

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

ISOTHERMAL WALL. TEMP=30DEG

PATCH (HOTVER, EWALL, NX, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)

COVAL (HOTVER, V1, 1.0, 0.0)

COVAL (HOTVER, TEMP, 1. /PRNDTL (TEMP), 30.0)

*PARED CALIENTE WEST

PATCH (WHOT1, CELL, 193, 193, 1, 1, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT1, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT2, CELL, 192, 192, 1, 1, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT2, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT3, CELL, 191, 191, 2, 2, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT3, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT4, CELL, 190, 190, 2, 2, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT4, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT5, CELL, 189, 189, 3, 3, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT5, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT6, CELL, 188, 188, 3, 3, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT6, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT7, CELL, 187, 187, 4, 4, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT7, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT8, CELL, 186, 186, 4, 4, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT8, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT9, CELL, 185, 185, 5, 5, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT9, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT10, CELL, 184, 184, 5, 5, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT10, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH (WHOT11, CELL, 183, 183, 6, 6, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL (WHOT11, TEMP, FIXVAL, GRND2)

PATCH(WHOT192, CELL, 11, 11, 109, 109, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT192, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT193, CELL, 10, 10, 110, 110, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT193, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT194, CELL, 9, 9, 110, 110, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT194, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT195, CELL, 8, 8, 111, 111, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT195, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT196, CELL, 7, 7, 111, 111, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT196, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT197, CELL, 6, 6, 112, 112, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT197, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT198, CELL, 5, 5, 113, 113, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT198, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT199, CELL, 4, 4, 114, 114, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT199, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT200, CELL, 4, 4, 115, 115, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT200, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT201, CELL, 3, 3, 116, 116, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT201, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT202, CELL, 3, 3, 117, 117, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT202, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT203, CELL, 2, 2, 118, 118, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT203, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT204, CELL, 2, 2, 119, 119, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT204, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT205, CELL, 1, 1, 120, 120, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT205, TEMP, FIXVAL, GRND2)
 PATCH(WHOT206, CELL, 1, 1, 121, 121, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WHOT206, TEMP, FIXVAL, GRND2)

SUPERFICIE LIBRE A 25 C
 PATCH(WTOP, CELL, 2, NX, 121, 121, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WTOP, TEMP, FIXVAL, 25)

*EAST WALL, ADIABATIC BUT WITH FRICTION
 PATCH(COLDVER, EWALL, NX, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(COLDVER, V1, 1.0, 0.0)
 *SOUTH WALL ADIABATIC BUT WITH FRICTION
 PATCH(SADIAC, SWALL, 1, NX, 1, 1, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(SADIAC, U1, 1.0, 0.0)
 *BUILT-IN BOUSSINESQ APPROXIMATION FOR BUOYANCY SOURCE TERM
 PATCH(FLOT, PHASEM, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(FLOT, V1, FIXFLU, GRND)
 *EFFECT OF THE CONCENTRATION IN THE SOURCE TERM
 PATCH(WEIGHT, PHASEM, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(WEIGHT, V1, FIXFLU, GRND1)
 *PRESSURE FIXED TO REFERENCE LEVEL AT NORTH OF CAVITY
 *FREE SURFACE
 PATCH(REFF, CELL, NX, NX, NY/2, NY/2, 1, 1, 1, LSTEP)
 COVAL(REFF, P1, FIXP, 0.0); COVAL(REFF, U1, ONLYMS, 0.0)
 COVAL(REFF, V1, ONLYMS, 0.0)
 COVAL(REFF, TEMP, 1./PRNDTL(TEMP), 25.0)
 COVAL(REFF, TEMP, ONLYMS, SAME)
 GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
 GROUP 15. Termination of sweeps
 LSWEEP=5
 GROUP 16. Termination of iterations
 RESREF(P1) = 1.0E-08; RESREF(U1) = 1.0E-06

```

RESREF(V1) = 1.0E-06;RESREF(TEMP) = 1.0E-06
RESREF(C1) = 1.0E-06
LITER(P1)=-30; ENDIT(P1)=1.E-5; LITER(V1)=1
GROUP 17. Under-relaxation devices
RELAX(U1,FALSDT,0.01);RELAX(V1,FALSDT,0.01)
RELAX(TEMP,FALSDT,10.);RELAX(C1,FALSDT,.5)
GROUP 18. Limits on variables or increments to them
GROUP 19. Special calls from EARTH to GROUND
USEGRX = F
IG(5) = 2
IG(1) = NY/2
IG(2) = NY/2 + 6
IG(3) = NY/2 - 6
IG(4) = NY - 6
GROUP 20. Preliminary print-out
ECHO=T
GROUP 21. Print-out of variables
GROUP 22. Spot-value print-out
IXMON=NX/2;IYMON=NY/2;NXPRIN=NX/10;NYPRIN=NY/10;NPLT=1
NPLT=2;IXMON=98;IYMON=55
GROUP 23. Field print-out and plot control
NTPRIN = 50
*TEMPERATURE AND VELOCITY PROFILES
PATCH(PROF,PROFIL,1,NX,NY/2,NY/2,1,1,1,LSTEP)
PLOT(PROF,V1,0.0,0.0)
PLOT(PROF,TEMP,0.0,0.0)
*TEMPERATURE CONTOURS
PATCH(CONT,CONTUR,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
PLOT(CONT,TEMP,0.0,10.0)
PATCH(CONCEN,CONTUR,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
PLOT(CONCEN,C1,0.0,20.0)
GROUP 24. Dumps for restarts
CSG1=M
ISG2=30
NOWIPE=T
RESTRT(ALL)
SAVE = T
STOP

```

ALK-F;RUN(1, 1);VDU-TTY
TSTSWP = -1

Conveccion Natural en un tanque con superficie libre y paredes verticales, que inicialmente contiene quince capas de fluido de distintas concentraciones.

Las regiones forman una interfaz salina experimental.

El gradiente de temperatura es de 5 C con funcion tanh de 6 seg.

La malla es de 300X124 (diez celdas extras en la superficie libre)
Condicion de frontera de adiabatica superficie libre. Sin porosidad

Paso de tiempo de 0.1 seg con 10 SWEEP. Guarda PHIDAS en F c/3seg

GROUP 1. Run title and other preliminaries

TEXT(C1=24.0,t=30s 2-02-97)

SALINITY EXPANSION COEFFICIENT-----	RG(1)
REFERENCE CONCENTRATION-----	RG(2)
REFERENCE DENSITY -----	RG(3)
GRAVITY ACCELERATION-----	RG(4)
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT-----	RG(5)
KINEMATIC VISCOSITY OF THE MEDIUM---	RG(6)
REFERENCE TEMPERATURE-----	RG(7)
WALL TEMPERATURE-----	RG(8)

REAL (RG(100))

RG(1) = 6.8E-04

RG(2) = 0.0

RG(3) = 997.0

RG(4) = 9.81

RG(5) = 2.9E-04

RG(6) = 8.8E-07

RG(7) = 25.0

RG(8) = 30.0

GROUP 2. Transience; time-step specification

STEADY = F

GRDPWR(T,300,30.,1.0)

GROUP 3. X-direction grid specification

NX=300;XULAST=1.0

XFRAC(1)=-193;XFRAC(2)=0.00030

XFRAC(3)=107;XFRAC(4)=0.0022626

GROUP 4. Y-direction grid specification

GRDPWR(Y,114,0.0965,1.0)

NY=124;YVLAST=1.0

YFRAC(1)=-44;YFRAC(2)=0.00100

YFRAC(3)=4;YFRAC(4)=0.0005000

YFRAC(5)=18;YFRAC(6)=0.00025

YFRAC(7)=4;YFRAC(8)=0.0005000

YFRAC(9)=41;YFRAC(10)=0.0010000

YFRAC(11)=2;YFRAC(12)=0.0005000

YFRAC(13)=7;YFRAC(14)=0.0002500

YFRAC(15)=4;YFRAC(16)=0.0000625

GROUP 5. Z-direction grid specification

GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion

GROUP 7. Variables stored, solved & named

SOLVE(P1,U1,V1,H1,C1);SOLUTN(P1,Y,Y,Y,P,P,P);NAME(H1)=TEMP

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices

TERMS(TEMP,N,Y,Y,Y,N)

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

RHO1 = RG(3)

ENUL = RG(6)

PRNDTL(TEMP) = 6.0

PRNDTL(C1) = 553.46

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

NAMFI=PF00

FIINIT(P1)=0.0;FIINIT(U1)=0.0;FIINIT(V1)=0.0;FIINIT(TEMP)=25.0
FIINIT(C1)=0.0

INICIALIZACION DE LA CONCENTRACION EN LAS QUINCE REGIONES

PATCH(CONBOOT,INIVAL,1,NX,1,38,1,1,1,1)
INIT(CONBOOT,C1,1.0,24.0)
PATCH(CONF1,INIVAL,1,NX,39,39,1,1,1,1)
INIT(CONF1,C1,1.0,23.5)
PATCH(CONF2,INIVAL,1,NX,40,41,1,1,1,1)
INIT(CONF2,C1,1.0,23.0)
PATCH(CONF3,INIVAL,1,NX,42,43,1,1,1,1)
INIT(CONF3,C1,1.0,22.0)
PATCH(CONF4,INIVAL,1,NX,44,46,1,1,1,1)
INIT(CONF4,C1,1.0,20.1)
PATCH(CONF5,INIVAL,1,NX,47,48,1,1,1,1)
INIT(CONF5,C1,1.0,18.5)
PATCH(CONF6,INIVAL,1,NX,49,51,1,1,1,1)
INIT(CONF6,C1,1.0,16.9)
PATCH(CONF7,INIVAL,1,NX,52,55,1,1,1,1)
INIT(CONF7,C1,1.0,14.5)
PATCH(CONF8,INIVAL,1,NX,56,59,1,1,1,1)
INIT(CONF8,C1,1.0,12.1)
PATCH(CONF9,INIVAL,1,NX,60,63,1,1,1,1)
INIT(CONF9,C1,1.0,9.65)
PATCH(CONF10,INIVAL,1,NX,64,66,1,1,1,1)
INIT(CONF10,C1,1.0,7.2)
PATCH(CONF11,INIVAL,1,NX,67,68,1,1,1,1)
INIT(CONF11,C1,1.0,5.45)
PATCH(CONF12,INIVAL,1,NX,69,70,1,1,1,1)
INIT(CONF12,C1,1.0,3.7)
PATCH(CONF13,INIVAL,1,NX,71,72,1,1,1,1)
INIT(CONF13,C1,1.0,2.3)
PATCH(CONTOP,INIVAL,1,NX,73,NY,1,1,1,1)
INIT(CONTOP,C1,1.0,0.0)

*BLOQUEO DE CELDAS MEDIANTE POROSIDADES
*BLOQUEO DE CELDAS INTERNAS MEDIANTE POROSIDADES

GROUP 12. Convection and diffusion adjustments

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

ISOTERMAL WALL. TEMP=30DEG

PATCH(HOTVER,EWALL,NX,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)

COVAL(HOTVER,V1,1.0,0.0)

COVAL(HOTVER,TEMP,1./PRNDTL(TEMP),30.0)

*PARED CALIENTE WEST

PATCH(WHOT1,CELL,1,1,1,124,1,1,1,LSTEP)

COVAL(WHOT1,TEMP,FIXVAL,GRND2)

SUPERFICIE LIBRE ADIABATICA

PATCH(WTOP,CELL,212,NX,124,124,1,1,1,LSTEP)

COVAL(WTOP,TEMP,FIXVAL,25)

COND NO-DESLIZAMIENTO EN LA PARED CALIENTE

PATCH(HOTVER,WALL,1,1,1,NY,1,1,1,LSTEP)

COVAL(HOTVER,V1,1.0,0.0)

*EAST WALL, ADIABATIC BUT WITH FRICTION

PATCH(COLDVER,EWALL,NX,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)

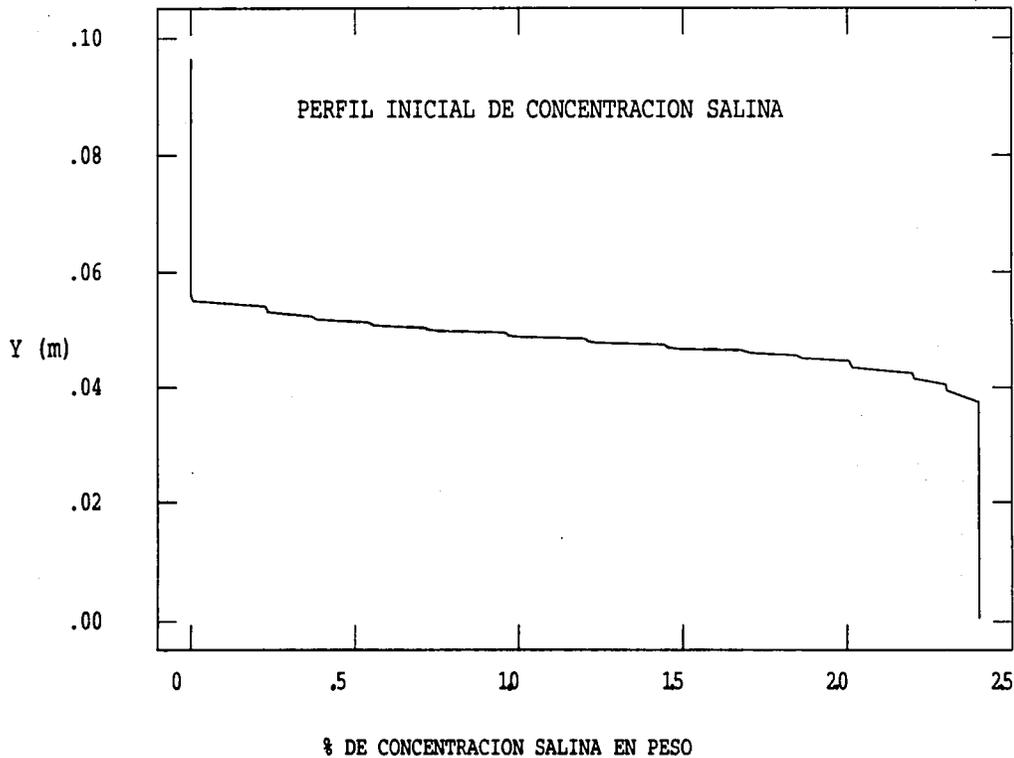
COVAL(COLDVER,V1,1.0,0.0)

*SOUTH WALL ADIABATIC BUT WITH FRICTION

```

PATCH(SADIAC, SWALL, 1, NX, 1, 1, 1, 1, 1, LSTEP)
COVAL(SADIAC, U1, 1.0, 0.0)
      *BUILT-IN BOUSSINESQ APPROXIMATION FOR BUOYANCY SOURCE TERM
PATCH(FLOT, PHASEM, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
COVAL(FLOT, V1, FIXFLU, GRND)
      *EFFECT OF THE CONCENTRATION IN THE SOURCE TERM
PATCH(WEIGHT, PHASEM, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
COVAL(WEIGHT, V1, FIXFLU, GRND1)
      *PRESSURE FIXED TO REFERENCE LEVEL AT NORTH OF CAVITY
      *FREE SURFACE
PATCH(REFF, CELL, NX, NX, NY/2, NY/2, 1, 1, 1, LSTEP)
COVAL(REFF, P1, FIXP, 0.0); COVAL(REFF, U1, ONLYMS, 0.0)
COVAL(REFF, V1, ONLYMS, 0.0)
      COVAL(REFF, TEMP, 1./PRNDTL(TEMP), 25.0)
COVAL(REFF, TEMP, ONLYMS, SAME)
GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
GROUP 15. Termination of sweeps
LSWEEP=10
GROUP 16. Termination of iterations
RESREF(P1) = 1.0E-08; RESREF(U1) = 1.0E-06
RESREF(V1) = 1.0E-06; RESREF(TEMP) = 1.0E-06
RESREF(C1) = 1.0E-06
LITER(P1)=-30; ENDIT(P1)=1.E-5; LITER(V1)=1
GROUP 17. Under-relaxation devices
RELAX(U1, FALSDT, 0.01); RELAX(V1, FALSDT, 0.01)
RELAX(TEMP, FALSDT, 10.); RELAX(C1, FALSDT, .5)
GROUP 18. Limits on variables or increments to them
GROUP 19. Special calls from EARTH to GROUND
USEGRX = F
IG(5) = 2
IG(1) = NY/2
IG(2) = NY/2 + 6
IG(3) = NY/2 - 6
IG(4) = NY - 6
GROUP 20. Preliminary print-out
ECHO=T
GROUP 21. Print-out of variables
GROUP 22. Spot-value print-out
IXMON=NX/2; IYMON=NY/2; NXPRIN=NX/10; NYPRIN=NY/10; NPLT=1
NPLT=2; IXMON=98; IYMON=55
GROUP 23. Field print-out and plot control
NTPRIN = 50
      *TEMPERATURE AND VELOCITY PROFILES
PATCH(PROF, PROFIL, 1, NX, NY/2, NY/2, 1, 1, 1, LSTEP)
PLOT(PROF, V1, 0.0, 0.0)
PLOT(PROF, TEMP, 0.0, 0.0)
      *TEMPERATURE CONTOURS
PATCH(CONT, CONTUR, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
PLOT(CONT, TEMP, 0.0, 10.0)
PATCH(CONCEN, CONTUR, 1, NX, 1, NY, 1, 1, 1, LSTEP)
PLOT(CONCEN, C1, 0.0, 20.0)
GROUP 24. Dumps for restarts
CSG1=F
ISG2=30
NOWIPE=T
      RESTRT(ALL)
SAVE = T
STOP

```



TIEMPO DE CALENTAMIENTO DE LA PARED CALIENTE

