



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**EFFECTOS TRIDIMENSIONALES DE
TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN
MIXTA TRANSITORIA Y LAMINAR PARA FLUJO
OPUESTO A TRAVÉS DE UN CILINDRO DE
RELACIÓN DE ASPECTO PEQUEÑA: EFECTO DE
LA FLOTACIÓN Y EL CONFINAMIENTO**

**T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN TERMOFLUIDOS
PRESENTA:**

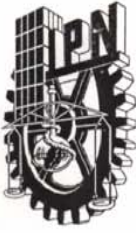
ING. ALBERTO ISAAC SALDAÑA ALVAREZ

DIRECTOR: DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI

MÉXICO D.F.

DICIEMBRE DEL 2015





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 10:00 horas del día 1 del mes de Diciembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME UA para examinar la tesis titulada:

EFFECTOS TRIDIMENSIONALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN MIXTA TRANSITORIA Y LAMINAR PARA FLUJO OPUESTO A TRAVÉS DE UN CILINDRO DE RELACIÓN DE ASPECTO PEQUEÑA: EFECTO DE LA FLOTACIÓN Y EL CONFINAMIENTO.

Presentada por el alumno:

Saldaña
Apellido paterno

Alvarez
Apellido materno

Alberto Isaac
Nombre(s)

Con registro:

B	1	3	0	4	4	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

Maestro en Ciencias en Termofluidos

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui
1er Vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez
Presidente
Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez
Secretario
Dr. Juan Pablo Escandón Colín
2do Vocal
Dr. José Carlos Arcos Hernández
3er Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Manuel Farfán Carbajal Romero
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día **30** del mes de **Noviembre** del año **2015**, el que suscribe **Alberto Isaac Saldaña Alvarez** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Termofluidos**, con número de registro **B130448**, adscrito a al **SEPI ESIME UA**, manifiesto que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui** y cede los derechos del trabajo titulado **Efectos Tridimensionales de Transferencia de Calor por Convección Mixta Transitoria y Laminar para el Flujo Opuesto a Través de un Cilindro de Relación de Aspecto Pequeña: Efecto de la Flotación y el Confinamiento**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones **asaldanaa@hotmail.com** y **lamartinezs@ipn.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alberto Isaac Saldaña Alvarez

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número de registro 592882 para realizar mis estudios de Maestría.

Al Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui por su apoyo, asesorías y la colaboración dedicado para realizar el trabajo experimental asignado.

Al Dr. Israel Rosas Yescas por su apoyo y asesorías prestadas durante la adquisición y procesamiento de los datos obtenidos durante el proceso experimental.

Al Ing. Juan José Mendoza por la asesoría y manufactura en las piezas utilizadas para su instrumentación.

Al cuerpo académico de la SEPI ESIME UA: Dr. Oscar Bautista, Dr. Eric Bautista, Dr. José Carlo Arcos, Dr. Rene Vargas y Dr. Juan Pablo Escandón por su disposición a la superación de los estudiantes.

Al proyecto de investigación financiada por CONACyT, No. De proyecto 167474. Convocatoria de Investigación Científica Básica 2011.

A la Secretaria de Investigación y Posgrado del IPN, por otorgarme la beca BEIFI correspondiente al proyecto con el número de clave SIP20150453.

A la Secretaria de Investigación y Posgrado del IPN, por otorgarme la beca tesis de maestría.

A Dios por la vida prestada y la oportunidad de seguir realizando mi formación profesional y permitirme cumplir mis retos personales.

A mis padres Mario Alberto Saldaña Orta y María del Refugio Esther Alvarez Carbajal por el amor, comprensión y cariño brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermana Ruth Elizabeth Saldaña Alvarez por la compañía brindada durante muchos años.

A las familias Gutiérrez Alvarez, Alvarez Carbajal y Saldaña Orta por la compañía, cariño, apoyo incondicional y los buenos consejos recibidos durante mi vida.

A mis amigos Ángel Quiroz, Christian Cruz y al resto de los integrantes del equipo “KUKULCAN” por colaborar con los primeros proyectos realizados en ESIME UT durante la carrera de ingeniería aeronáutica y por ser parte fundamental de mi desarrollo profesional.

A mis amigos, Alan Paredes, Alejandro Dávila, David Saldaña, Itai Caballero, Ivette Cortes y a todo el resto de los equipos “Run Clan Lindavista” y “UTB” por la compañía y el apoyo incondicional brindado.

A Aldo Gómez, Marcos Mancilla, Alejandro Monroy y el resto de mis compañeros en la SEPI ESIME UA por los momentos compartidos dentro y fuera del campo académico.

**Efectos tridimensionales de
transferencia de calor por convección
mixta transitoria y laminar para flujo
opuesto a través de un cilindro de
relación de aspecto pequeña: efecto de
la flotación y el confinamiento.**

Saldaña Alvarez Alberto Isaac

2015

Índice general

Nomenclatura	VII
Abstract	IX
Resumen	X
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos particulares	7
2. Materiales y métodos	9
2.1. Diseño experimental	9
2.2. Construcción e instrumentación del cilindro	13
2.3. Parámetros de gobierno adimensionales	18
2.4. Reducción de datos	19
2.5. Incertidumbres experimentales	21
3. Resultados	22
3.1. Variación de la distribución de temperatura circunferencial a lo largo de la envergadura del cilindro	22
3.2. Promedio de la distribución de temperatura circunferencial del cilindro	29
3.3. Características globales de transferencia de calor	30
3.4. Correlación para el número de Nusselt promedio	34
3.5. Estructura instantánea del flujo	34
4. Conclusiones	39

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	II
Apéndice	48
A. Cálculo del porcentaje de pérdidas	48

Índice de figuras

2.1.	Diagrama esquemático del diseño experimental: 1) Bomba centrífuga, 2) Pipeta graduada, 3) Válvula de estrangulamiento, 4) Baño térmico con refrigeración, 5) Tanque de almacenamiento, 6) Tubo de rebosadero, 7) Depósito secundario, 8) Tubo de alimentación para el depósito secundario, 9) Sección de pruebas.	10
2.2.	Diagrama esquemático del cilindro de aluminio desarmado que ilustra las dimensiones y distribución angular del arreglo de los termopares y de las resistencias: a) Corte transversal del cilindro sin ensamblar, b) Vista en planta del cilindro desarmado ilustrando los planos de medición a lo largo de su envergadura.	14
2.3.	Cilindro ensamblado mostrando todos sus componentes: 1) Tubo de aluminio, 2) Termopar tipo T, 3) Resistencia eléctrica de aleación Níquel-Cromo, 4) Pasta de alta conductividad térmica, 5) Resina epóxica de alta conductividad térmica, 6) Espuma aislante de poliuretano, Imagen superior: vista transversal, Imagen inferior: vista 3D.	15
2.4.	Diagrama esquemático de la disposición final de los termopares para la obtención de las distribuciones de la diferencia de temperaturas a lo largo de: a) Posición angular (γ_i) para las tres posiciones a lo largo de la envergadura del cilindro, b) La dirección axial o por fila (X_i).	16
3.1.	Valores de la diferencia de temperatura angular promedio (Z_i) y la diferencia de temperaturas promedio por fila (X_i) en condiciones de estado estacionario dinámico para $Re = 170$ y valores selectos del número de Richardson modificado.	23

3.2. Valores de la diferencia de temperatura angular promedio (Z_i) y la diferencia de temperaturas promedio por fila (X_i) en condiciones de estado estacionario dinámico para $Re = 200$ y valores selectos del número de Richardson modificado.	24
3.3. Valores de la diferencia de temperatura angular promedio (Z_i) y la diferencia de temperaturas promedio por fila (X_i) en condiciones de estado estacionario dinámico para $Re = 230$ y valores selectos del número de Richardson modificado.	25
3.4. Valores de la diferencia de temperatura angular promedio (Z_i) y la diferencia de temperaturas promedio por fila (X_i) en condiciones de estado estacionario dinámico para $Re = 260$ y valores selectos del número de Richardson modificado.	26
3.5. Efectos de los números de Reynolds y Richardson modificado en el promedio temporal y espacial de la diferencia de temperaturas circunferencial a lo largo de la envergadura del cilindro.	27
3.6. Valores de la diferencia de temperaturas promedio por filas (X_i) entre la temperatura superficial y la temperatura de referencia $\Delta T = (\bar{T}_{wj} - T_0)$ durante condiciones dinámicas de estado estacionario para diferentes valores de número de Richardson modificado para $Re = 170, 200, 230$ y 260 , respectivamente.	30
3.7. Diferencias de temperatura entre la temperatura de referencia y la temperatura promedio en la superficie del cilindro $\Delta T = (\bar{T}_w - T_0)$ para múltiples valores de los números de Reynolds y Richardson modificado.	31
3.8. Efecto de los números de Reynolds y Richardson modificado en la transferencia de calor global. Aquí, tanto el número de Nusselt promedio en el espacio y el tiempo junto con el coeficiente convectivo de transferencia de calor están graficados como una función del Ri^* para valores del número de Reynolds de $Re = 170, 200, 230$ y 260	32
3.9. Flujo Instantáneo para $Re = 230$ y $Ri^* = 3.6$ ($Gr^* = 1.88^6$). a) Vista frontal del cilindro en el plano Z_1 , b) Vista lateral del cilindro.	35
3.10. Flujo Instantáneo para $Re = 230$ y $Ri^* = 40.1$ ($Gr^* = 2.12 \times 10^6$). a) Vista frontal del cilindro en el plano Z_2 , b) Vista lateral del cilindro.	36

3.11. Flujo Instantáneo para $Re = 260$ y $Ri^* = 3.6$ ($Gr^* = 2.38 \times 10^6$).	
a) Vista frontal del cilindro en el plano Z_1 , b) Vista lateral del cilindro.	37
3.12. Flujo Instantáneo para $Re = 260$ y $Ri^* = 60.7$ ($Gr^* = 4.12 \times 10^6$).	
a) Vista frontal del cilindro en el plano Z_2 , b) Vista lateral del cilindro.	38
A.1. Arreglo del aislamiento circundante al cilindro de aluminio: a) Vista superior, b) Vista frontal indicando la ubicación de los termopares.	49

Índice de cuadros

3.1. Valores promedio en el espacio y el tiempo de la diferencia de temperaturas circunferencial \pm desviación estándar como una función de los números de Reynolds y Richardson modificado a lo largo de las tres posiciones de la envergadura del cilindro.	28
3.2. Efectos de los números de Reynolds y Richardson modificado en los valores promedio en el espacio y tiempo de las diferencias de temperatura y del número de Nusselt global del cilindro.	33
3.3. Coeficientes de ajuste para la Ec. (3.1).	34

Nomenclatura

A_{axi}	área para pérdidas por conducción en dirección axial, m^2
A_{cil}	área superficial del cilindro expuesto al fluido, m^2
A_{rad}	área para pérdidas por conducción en la dirección radial, m^2
AR	relación de aspecto, L/D
BR	radio de bloqueo, D/H
D	diámetro del cilindro (longitud característica), m
DE	desviación estándar
f	frecuencia, Hz
g	aceleración de la gravedad, ms^{-2}
Gr^*	número de Grashof modificado, $g\beta\dot{q}_{conv}D^4/k\nu^2$
h	coeficiente convectivo de transferencia de calor local, $Wm^{-2}K^{-1}$
\bar{h}	coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio, $Wm^{-2}K^{-1}$
H	ancho del canal, m
I	corriente medida, A
k	conductividad térmica, $Wm^{-2}K^{-1}$
L	longitud del cilindro, m
Nu	número de Nusselt local basado en el diámetro del cilindro, hD/k
\overline{Nu}	número de Nusselt promedio, $\bar{h}D/k$
\widetilde{Nu}	número de Nusselt promedio en el espacio y tiempo
P	perímetro del canal, m
Pe	número de Peclet, u_0D/α
Pr	número de Prandtl, ν/α
Q	flujo de calor convectivo neto transferido al fluido, W
\dot{q}_{cond}	pérdidas por conducción, Wm^{-2}
\dot{q}_{conv}	flujo de calor convectivo neto por unidad de superficie transferido al fluido, Wm^{-2}
\dot{q}_{el}	flujo de calor eléctrico por unidad de superficie, Wm^{-2}
\dot{q}_{rad}	pérdidas por radiación hacia el ambiente, Wm^{-2}
Re	número de Reynolds basado en el diámetro del cilindro, u_0D/ν
Ri^*	número de Richardson modificado, Gr^*/Re^2
t	tiempo, s
T_{amb}	temperatura ambiente, K
T_0	temperatura del fluido a la entrada del canal, K
T_{wj}	temperatura local en la superficie del cilindro, K
\overline{T}_w	temperatura promedio en la superficie del cilindro, K
u_0	velocidad del fluido a la entrada del canal, ms^{-1}
V	voltaje medido, V
x, y, z	coordenadas Cartesianas rectangulares
X	coordenada longitudinal adimensional, x/D
Y	coordenada transversal adimensional, y/D
Z	coordenada adimensional, z/L

Símbolos griegos

α	difusividad térmica, m^2s^{-1}
β	coeficiente de expansión volumétrica, K^{-1}
δ	espesor de la capa límite térmica
ΔT	diferencia de temperatura, $T_{wj} - T_0$, K
ε	emisividad
γ_i	referente a la posición angular (ver Fig. 2.4)
ν	viscosidad cinemática, m^2s^{-2}
ρ	densidad del fluido, kgm^{-3}
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
τ	tiempo adimensional

Abstract

Transient laminar opposing mixed convection heat transfer from a circular cylinder confined inside a vertical closed-loop downward rectangular water channel has been studied experimentally. The cylinder is subjected to a constant wall heat flux boundary condition while the other bounding walls are insulated and adiabatic. The cylinder is placed horizontally at the mid-plane with a 40% blockage ratio (BR , ratio between the cylinder diameter and the thickness of the rectangular section) and a cylinder aspect ratio (AR , ratio between the length and diameter of the cylinder) of 6. Experiments are performed for flow conditions with Reynolds number based on cylinder diameter in the range $170 \leq Re \leq 260$, Prandtl number of $Pr = 7$, and for values of the modified Richardson number, $Ri^* = Gr^*/Re^2$, from 2.3 to 142.5. From experimental measurements, the variation in time-averaged local temperature distributions with angular position are obtained at several nondimensional distances of the cylinder span. Also space-averaged surface temperatures and overall Nusselt number are obtained. Results show that variations of the mean temperature distributions along the cylinder span elucidate important three-dimensional effects of the final flow and thermal configuration, with lower mean circumferential temperature distributions achieved at the cylinder midspan and higher values registered as the wall is approached. Finally, a general correlation for the overall Nusselt number has been proposed for the bounded cylinder in cross-flow as a function of the modified Richardson and Reynolds numbers over the range of physical parameters considered in this study.

Resumen

En este trabajo se lleva a cabo un estudio experimental de convección mixta transitoria y laminar para flujo opuesto a través de un cilindro circular confinado dentro de un canal vertical rectangular con un circuito de recirculación. El cilindro se somete a una condición de flujo de calor uniforme, mientras que las paredes circundantes están aisladas y se consideran adiabáticas. El cilindro se coloca de forma horizontal en el plano medio con una relación de bloqueo, BR , del 40% y una relación de aspecto, AR , de 6. Los parámetros BR y AR se definen como la relación del diámetro del cilindro entre el ancho del canal y la relación entre la longitud y el diámetro del cilindro, respectivamente. Los experimentos se realizaron considerando un número de Reynolds delimitado en el intervalo de $170 \leq Re \leq 260$, basado en el diámetro del cilindro, un número de Prandtl $Pr = 7$, y un número de Richardson modificado, $Ri^* = Gr^*/Re^2$, desde 2.3 hasta 142.5. La variación de la distribución de la temperatura local promedio con respecto a la posición angular se obtiene para diferentes distancias adimensionales a lo largo de la envergadura del cilindro. Adicionalmente, el promedio espacial de la temperatura superficial y el número de Nusselt promedio son obtenidos. Las mediciones de temperatura muestran que para todos los valores del parámetro de flotación, la distribución térmica es asimétrica con respecto a la envergadura del cilindro con respecto al plano central del canal. Finalmente, se obtuvo una correlación para el número de Nusselt promedio para el cilindro confinado en función de los números de Reynolds y Richardson modificados.