UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIGALGO

INTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

"SIMULACION FISICA Y MATEMATICA PARA LA OPTIMIZACION DEL DISEÑO DE UNA BUZA PARA EL MOLDE DE COLADA CONTINUA DE PLANCHON DELGADO"

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Metalurgia y Ciencias de los Materiales

PRESENTA:
HUGO ARCOS GUTIERREZ

ASESOR:
PhD. GERARDO BARRERA CARDIEL

MORELIA, MICHOACAN FEBRERO DEL 2016.

Agradecimientos.

A mis padres Silvia y Gustavo quienes me dieron los valores y formación que se convirtieron en las herramientas necesarias para cumplir mis metas.

A mi esposa Carmen y mis hijos Yaretzi y Hugo Yerik por la ternura, calidez y amor que no han dejado caer mi ánimo para seguir adelante.

A mis hermanos Jesús, Gustavo, Horacio, Josué, Leonardo, Omar y Luis Alberto por su apoyo y en compensación por los momentos de mi vida lejos de ustedes.

En especial y que son ustedes a quienes dedico mi trabajo.

Al Dr. Gerardo Barrera Cardiel por compartir conmigo sus invaluables conocimientos que serán de gran utilidad en mi futuro y por asesorar mi tesis.

Al Dr. Ramiro Escudero García por sus consejos y enseñanzas que han fortalecido mi trabajo de investigación y por el tiempo dedicado a la revisión de la tesis.

Al Dr. Alberto Ruiz Marines por sus regaños que me han hecho ponerme a estudiar y estar a la altura de las exigencias del programa Doctoral y por el tiempo dedicado a la revisión de la tesis.

Al Dr. Ignacio Mejía Granados por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y compartir sus conocimientos.

Al Dr. Gerardo Trapaga Martínez por aceptar revisar la tesis y formar parte de tan excepcional mesa sinodal.

A mis compañeros y amigos del departamento de simulación matemática Eloy, José Enrique, Jonathan, Koffi, Jorge por su apoyo en cada una de las etapas del desarrollo de la investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en especial al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas por permitirme utilizar sus aulas e instalaciones para adquirir los conocimientos para concluir con éxito mi trabajo de investigación doctoral.

Al CONACYT por su apoyo económico que fue el sustento para lograr concluir esta investigación.

Al Dr. José de Jesús Barreto Sandoval por sus sabios consejos y por motivarme a continuar con mi preparación.

Al Dr. Saúl García Hernández por tu amistad, ayuda y consejos para lograr llegar hasta estas instancias.

Resumen.

Entender el comportamiento de las oscilaciones de los chorros al interior del molde de planchón delgado tipo embudo es esencial para asegurar una entrega de acero líquido constante, mejorar el control de los patrones de flujo y consecuentemente incrementar la productividad de la planta y la calidad del producto final. Para lograr esto se llevó a cabo un estudio del efecto del diseño interno de la buza sobre la fluido-dinámica del molde, intentando determinar el origen de las oscilaciones de los chorros. Se hizo uso de la simulación matemática y física para estudiar éstos fenómenos.

Para la modelación matemática, se recurrió a las ecuaciones fundamentales, el modelo de turbulencia RSM y el modelo Multifásico VOF. Las ecuaciones gobernantes son discretizadas y resueltas mediante el método iterativo-segregado implícito implementado en FLUENT®.

Para la simulación física, se diseñaron y construyeron todos los componentes de una máquina de colada continua en acrílico transparente. Se utilizó un colorante (permanganato de potasio), para revelar los patrones de flujo creados por la buza original, además, se colocó un sensor de vibraciones sobre la pared delgada del molde, esto con el fin de medir la cantidad de energía disipada sobre cuatro puntos críticos, tomados de la interpretación de resultados de la simulación matemática.

Los resultados, de la simulación matemática, muestran que aun para diseños de buza con un comportamiento operacional estable, las oscilaciones de los chorros permanecen presentes y se hacen más intensos para altas velocidades de colada e inmersiones de buza profundas. El análisis de cada una de las buzas simuladas muestran que la geometría interna origina perturbaciones en el flujo en las zonas donde las áreas transversales internas cambian, generando presiones dinámicas altas y bajas promoviendo una tendencia para que el acero líquido salga preferentemente por uno de los puertos. Se encontró un delicado balance de fuerzas, en el orden de las micro-escalas, y se da sobre sobre la punta de la bifurcación interna de la buza. Este balance está relacionado con las velocidades fluctuantes y la presión ferrostática. Sí este balance es roto las oscilaciones son más

intensas, originando variaciones permanentes de la velocidad de flujo másico de un puerto a otro.

Los resultados de la simulación física y la simulación matemática muestran que éstos se correlacionan muy bien para la buza original a ambas profundidades de inmersión de buza y velocidades de colada. Se pudo apreciar claramente la oscilación de los chorros, que es provocada por los fenómenos antes citados en la simulación matemática.

El acelerómetro demostró ser una herramienta capaz de predecir el comportamiento de las oscilaciones de los chorros provenientes de la buza y del efecto que pudieran tener éstas sobre la costra de acero solidificado y sobre la calidad del producto final. Consecuentemente, se concluye que la oscilación de los chorros tiene su origen en el interior de la buza (SEN), y que sus efectos adversos pueden ser corregidos mediante la modificación interna de la geometría de la buza, el control de la velocidad de colada y del monitoreo continuo éste tipo de sensores.

PALABRAS CLAVE: simulación física y matemática; molde de planchón delgado; oscilaciones de los chorros; diseño de buza; geometría interna de la buza.

Abstract.

Understanding the behavior of the oscillations of the jets into the mold of thin slab funnel is essential to ensure a constant supply of liquid steel, improve control of the flow patterns and consequently increase plant productivity and the final product quality. To achieve this, we conducted a study of the effect of the internal design of the nozzle on the fluid dynamics of the mold, trying to determine the origin of the oscillations of the jets. Use of mathematical and physical simulation was done to study these phenomena.

For the mathematical modeling it resorts to the fundamental equations, the RSM turbulence model and VOF multiphase model. The governing equations are discretized and solved by iteration-segregated implicit method implemented in FLUENT®.

For physical simulation, they were designed and built all of the components of a continuous casting machine in clear acrylic. A dye (potassium permanganate) was used to reveal the flow patterns created by the original nozzle also a vibration sensor on the thin wall of the mold was placed, this in order to measure the amount of energy dissipated over four critical points, taken from the interpretation of results of the mathematical simulation.

The results of the mathematical simulation are showing that even for a nozzle designs with a stable operational performance, the oscillations of the jets remain present and become more intense for high casting speeds and deeper nozzle. The analysis of each of the simulated nozzles show that the internal geometry causes flow disturbances in areas where the internal cross-sectional areas change, generating high and low dynamic pressures and promoting a tendency for the liquid steel to exit preferably by one of the ports. A delicate balance of forces, in the order of micro-scales, was found and is given on the tip of the internal bifurcation of the nozzle. This balance is related to the fluctuating speeds and the ferrostatic pressure. If this balance is broken the oscillations are more severe, causing permanent changes in the mass flow rate from one port to another.

The results of the physical and mathematical simulations show that they correlate very well, for the original nozzle, both nozzle immersion deeps and casting speeds.

It could clearly see the oscillation of the jets, which is caused by the above-described phenomena in the mathematical simulation.

The accelerometer has proved to be a tool capable of predicting the behavior of the oscillations of the jets from the nozzle and the effect that they may have on the crust solidified steel and on the quality of the final product. Consequently, it is concluded that the oscillation of the jets originates inside the nozzle (SEN), and its adverse effects can be corrected by internal modification of the geometry of the nozzle, the control of the casting speed and the continuous monitoring this type of sensors.

TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos i
Resumen ii
Abstract iv
Tabla de Contenidos vi
Lista de Símbolos ix
Lista de Figuras xii
Lista de Tablas xviii
CAPITULOS
CAPITULO I 1
1. INTRODUCCIÓN. 1
1.1. JUSTIFICACIÓN 3
1.2. Hipótesis. 4
1.3. Objetivo General. 4
1.3.1. Objetivos Particulares. 5
1.3.2. Metas Científicas. 5
CAPITULO II. 6
2. ESTADO DEL ARTE. 6
2.1. Flujo de Fluidos en la Buza. 17
2.2. Flujo en el Molde. 18
2.3. Profundidad de Inmersión de la Buza. 19
2.4. Dinámica de Fluidos Computacional. 19
2.4.1. Modelación de Flujo de Fluidos. 20
2.4.2. Ecuaciones Fundamentales de transporte. 20
2.4.3. Conservación de Masa (Continuidad). 21
2.4.4. Conservación de Movimiento en las Tres Direcciones. 22
2.4.5. Flujo Turbulento. 23
2.4.6. La Naturaleza de la Turbulencia. 24
2.4.7. Propiedades Observables de Flujos Turbulentos. 24
2.4.8. Modelo k-ε. 27
2.4.9. Ecuaciones de transporte para el modelo k-ε. 27
2.4.10. Modelo de los esfuerzos de Reynolds (RSM). 28
2.4.10.1. Ecuaciones de transporte de Reynolds. 28

2.4.10.2. Modelado de la energía cinética turbulenta (k). 28
2.4.10.3. Modelado de la disipación de la energía cinética turbulenta (ε). 29
2.5. Modelo Multifásico (VOF). 29
2.5.1. Ecuación de la fracción de volumen. 30
2.5.2. Ecuación de Momento. 31
2.5.3. Tensión Superficial. 31
2.6. Simulación Física. 33
2.6.1 Criterios de Similitud. 34
2.6.2. Criterios de Similitud Número de Reynolds y Froude. 35
2.6.3. Desarrollo De Modelos Con Agua. 37
CAPITULO III 38
3. SIMULACIÓN MATEMÁTICA EN INGENIERÍA. 38
3.1. Metodología de la Simulación Matemática. 38
3.1.1. Pre-procesamiento. 40
3.1.2. Procesamiento. 44
3.1.3. Post-procesamiento. 45
3.2. Condiciones de la Simulación Matemática. 45
CAPITULO IV 47
4. MODELADO FISICO. 47
4.1. Diseño y Construcción del Modelo. 47
4.2. Sistema de Conversión de Señales de Analógico a Digital. 51
4.3. Instrumentación del Equipo. 51
4.3.1. Vibraciones (Acelerómetro). 51
4.4. Software para la Digitalización y Tratamiento de las Señales Analógicas. 52
4.5. Metodología, Fase de la Simulación Física. 53
CAPITULO V 57
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. 57
5.1. Efecto de la Geometría Interna de la Buza Sobre los Fenómenos de Flujo de Fluidos Presentados al Interior del Molde. 57
5.2 Modificaciones a la buza I. 71
5.2.1 Análisis al interior de la buza modificada I. 71
5.2.2. Efectos de la modificación I de la SEN sobre los patrones de flujo 74
5.3. Modificación a la buza II. 79
5.3.1. Análisis al interior de la buza modificada II. 79

5.3.2. Efectos de la modificación II de la SEN sobre los patrones de flujo. 82
5.4. Modificación a la buza III. 87
5.4.1. Análisis al interior de la buza modificada III. 88
5.4.2. Efectos de la modificación III de la SEN sobre los patrones de flujo. 92
5.5. Validación del modelo matemático. 99
5.6. Validación del uso del acelerómetro. 109
Conclusiones. 118
Originalidad del proyecto. 121
Bibliografía. 123

Lista de Símbolos.

A = Área

C_{μ} = Constante de viscosidad turbulenta

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ = Constantes del modelo k-ε

C_{ij} = Termino convectivo de la ecuación de transporte de Reynolds

$D_{L,ij}$ = Difusión molecular de la ecuación de transporte de Reynolds

$D_{T,ij}$ = Difusión turbulenta de la ecuación de transporte de Reynolds

F_{ij} = Termino de producción por rotación de la ecuación de transporte de Reynolds

g = Aceleración gravitacional

G_{ij} = Producción debido a los efectos de flotación de la ecuación de transporte de Reynolds

G_{k} = Generación de k debido a los gradientes de velocidad media

G_{b} = Generación de k debido a las fuerzas de flotación

Fr = Numero de Froude

V = Velocidad

F_B = Termino Fuente

k = Energía cinética Turbulenta

L = Longitud

L_m = Longitud del modelo

L_p = Longitud del prototipo

P = Presión

p' = Presión fluctuante en la dirección <i>

$\bar{p}$ = Presión promedio en la dirección <i>

p = Presión instantánea en la dirección <i>

$p = \bar{p} + p'$ = Descomposición de Reynolds para la presión

P_{ij} = Producción de esfuerzos de la ecuación de transporte de Reynolds

$\mathcal{P}$ = Producción de energía cinética turbulenta

Q_m^0 = Flujo cinemático en el modelo

Q_p^0 = Flujo cinemático en el prototipo

Re = Numero de Reynolds

Re_T = Numero de Reynolds turbulento

S_κ, S_ε =Términos fuente o constantes del modelo k-ε

S_{ij} = Velocidad de cambio promedio del tensor de esfuerzos

t_m = Tiempo en el modelo

t_p = Tiempo en el prototipo

u = velocidad instantánea en la dirección <i>

u' = Velocidad fluctuante en la dirección <i>

$\bar{u}$ = Velocidad promedio en la dirección <i>

$u = \bar{u} + u'$ = Descomposición de Reynolds para la velocidad

$\langle u_i' u_j' \rangle$ = Esfuerzos de Reynolds

u, v, w = Velocidades en los ejes coordenados (x, y, z)

$\overline{u'v'}$ = Velocidad fluctuante promedio en (x, y)

V_m = Velocidad en el modelo

V_p = Velocidad en el prototipo

Y_M = Contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible

x, y, z = Ejes en coordenadas cartesianas

Símbolos Griegos.

α = Fracción volumétrica

α_q = Fracción volumétrica de la fase q-esima

ε = Velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta

κ = Curvatura de la interfase

λ = Factor de escala

μ = Viscosidad dinámica

μ_{eff} = Viscosidad efectiva

μ_t = Viscosidad turbulenta

ν = Viscosidad cinemática

ρ = Densidad

σ = Tensión superficial

σ_κ, σ_ε = Números de Prandtl turbulentos para k-ε

σ_{xx} = Esfuerzo normal a la superficie x

τ = Esfuerzo cortante

τ_{xy} = Esfuerzo de corte en la superficie (y) dirección (x)

τ_{xy} = Componente i del flujo de momentum sobre la superficie j

ω = Velocidad de disipación de la energía cinética turbulenta especifica

Δ = Desplazamiento, incremento

Φ_{ij} = Presión de deformación de la ecuación de transporte de Reynolds

Ω = Velocidad angular

Ω_{ij} = Velocidad de cambio promedio del tensor de rotación

$\nabla \cdot$ = Divergencia

∇ = Gradiente

Lista de Figuras

Figura 2.1. Esquema de la sección transversal del diseño de buza de cuatro puertos. 11

Figura 2.2. Partes más importantes del distribuidor y el molde……. 18

Figura 2.3. Señal turbulenta. 25

Figura 2.4. Diagrama que ilustra la tendencia de la turbulencia a la isotropía. 25

Figura 3.1. Diagrama de los pasos en las simulaciones con software para dinámica de fluidos computacional (CFD). 39

Figura 3.2. Esquema de las geometrías para a)-b) el molde planchón delgado tipo embudo, c)-d) la buza (SEN), e) interna de la buza original (SEN), f) interna de la buza modificada I (SEN), g) interna de la buza modificada II (SEN) y h) interna de la buza modificada III (SEN)..... 41

Figura 3.3. Malla del modelo virtual tridimensional a escala 1:1. 42

Figura 4.1. Esquema de la geometría del molde para la modelación física: a)-b) molde de planchón delgado tipo embudo, c)-d) la buza (SEN) y e) geometría interna de la punta de la buza. 48

Figura 4.2. Esquema del recipiente receptor del agua proveniente del molde. 49

Figura 4.3. Diagrama de la instalación hidráulica del modelo físico del molde y la buza. 50

Figura 4.4. Fotografía del rotámetro utilizado. 50

Figura 4.5. Acelerómetro y unidad de suministro de energía 52

Figura 4.6. Diagrama del programa escrito tanto para la digitalización de la señal obtenida con el acelerómetro como del tratamiento de los datos…… 54

Figura 4.7. Diagrama del programa escrito para eliminar el ruido de los datos normalizados para las distintas posiciones del acelerómetro, velocidades de colada e inmersión de buza……. 54

Figura 4.8. Lugares donde el acelerómetro fue colocado. 55

Figura 5.1. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min…… 59

Figura 5.2. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 60

Figura 5.3. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 61

Figura 5.4. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 61

Figura 5.5. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 62

Figura 5.6. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 63

Figura 5.7. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión b) y d) 34cm de inmersión..... 64

Figura 5.8. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión, b) y d) 34cm de inmersión. 65

Figura 5.9. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión, b) y d) 34cm de inmersión. 65

Figura 5.10. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza. 68

Figura 5.11. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza. 68

Figura 5.12. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza. 69

Figura 5.13. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 72

Figura 5.14. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza..... 72

Figura 5.15. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 73

Figura 5.16. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza original lado izquierdo y modificada l lado

derecho a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min. 73

Figura 5.17. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada I a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 74

Figura 5.18. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada I a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 75

Figura 5.19. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 76

Figura 5.20. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 77

Figura 5.21. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 78

Figura 5.22. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 78

Figura 5.23. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 80

Figura 5.24. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 80

Figura 5.25. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 81

Figura 5.26. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza, original lado izquierdo, en medio modificada I y lado derecho modificada II a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min. 82

Figura 5.27. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada II a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min 83

Figura 5.28. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada II a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min 84

Figura 5.29. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min..... 85

Figura 5.30. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m /min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min..... 85

Figura 5.31. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 86

Figura 5.32. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 87

Figura 5.33. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 88

Figura 5.34. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 89

Figura 5.35. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza. 89

Figura 5.36. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza de izquierda a derecha original, modificada I, modificada II y modificada III a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min. 91

Figura 5.37. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada III a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 93

Figura 5.38. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada III a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min 94

Figura 5.39. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 96

Figura 5.40. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min. 96

Figura 5.41. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4 m/min, b) 5 m/min, c) 6 m/min, d) 7 m/min y e) 8 m/min. 98

Figura 5.42. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4 m/min, b) 5 m/min, c) 6 m/min, d) 7 m/min y e) 8 m/min. 98

Figura 5.43. Modelo matemático (parte superior) y modelado físico (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 100

Figura 5.44. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 5m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 101

Figura 5.45. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 6m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 102

Figura 5.46 Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 7m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 103

Figura 5.47. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 105

Figura 5.48. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 106

Figura 5.49. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 107

Figura 5.50. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s. 108

Figura 5.51 Magnitud de las vibraciones en función del flujo volumétrico. 110

Figura 5.52. Lugares donde el transductor fue colocado. 111

Figura 5.53. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde y lugares donde el transductor fue colocado. 112

Figura 5.54. Comparación de los niveles de vibraciones a distintas velocidades y diferentes posiciones sobre la pared delgada del molde (Puntos 1 y 4). 112

Figura 5.55. Comparación de los niveles de vibraciones a distintas velocidades y diferentes posiciones sobre la pared delgada del molde (Puntos 2 y 3). 114

Figura 5.56. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 190s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática. 115

Figura 5.57. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 200s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática. 116

Figura 5.58. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 210s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática. 116

Lista de Tablas.

Tabla II-I: Propiedades físicas del agua a y del acero. 37

Tabla III-I. Casos a simular, modelado matemático. 40

Tabla III-II. Velocidades de colada utilizadas en la simulación matemática a ambas profundidades de inmersión de buza. 43

Tabla III-III. Propiedades de las fases involucradas en la simulación. 44

Tabla III-IV. Equivalencias del procesamiento, para los diferentes modelos de turbulencia. 45

Tabla III-V. Variables utilizadas para cada una de las diferentes buzas a ambas profundidades de inmersión de buza. 46

Tabla IV-I. Especificaciones del acelerómetro de cuarzo modelo PCB-482A. 52

Tabla IV-II. Desarrolló experimental de la simulación física. 53

Tabla IV-III. Posiciones del transductor en la pared delgada del molde de acuerdo a la escala usada para la simulación física 1: ½ y la modelación matemática 1:1. 55

Tabla IV-IV. Parámetros a utilizar en la simulación. 56

Tabla V-I. Posiciones del transductor sobre la pared delgada, de acuerdo a la escala usada para la simulación física (1 a ½) y modelación matemática (1 a 1). 115

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN.

Con la creciente demanda de acero que existe hoy en día en el mundo y las rigurosas normas de calidad impuestas, exigidas por el mercado, a este material, se ha vuelto un reto para las empresas siderúrgicas incrementar la producción sin sacrificar la calidad del acero producido. Actualmente la colada continúa de planchón delgado, en molde tipo embudo, ha ido posicionándose y teniendo gran aceptación debido al espesor del planchón, a su relativamente alta velocidad de colada y a que en éste proceso se llega al producto final en menos pasos, comparado con la colada en moldes de planchón convencional. Incrementando con esto el ahorro de energía y disminuyendo la inversión en instalaciones ya que estas son más compactas al eliminar pasos de laminación.

El estudio de los fenómenos producidos por el flujo de fluidos al interior tanto de la buza como del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo, juegan un papel crucial en el estudio de los problemas operacionales y en la elaboración de propuestas para su solución. Estos fenómenos son complejos y no han sido del todo entendidos debido a las diversas geometrías empleadas en el sistema molde-buza y a las altas velocidades de colada. Estas múltiples combinaciones en los diseños han producido diferentes fenómenos de flujo que han sido estudiados mayormente cuando el fluido abandona la buza y que se han relacionado fuertemente con las oscilaciones de los chorros de descarga.

Algunos estudios se han enfocado en el análisis del efecto de los patrones de flujo sobre la estabilidad en el menisco tanto para el planchón convencional[1-3)] como para planchón delgado[4-11)], encontrando que a mayor velocidad de colada la inestabilidad del menisco es mayor y que la geometría e inmersión de la buza tienen un efecto directo también sobre dicha estabilidad; incluso han empleado frenos electromagnéticos para lograr una mayor simetría y estabilidad en el menisco[7-11)]. Otros trabajos se han orientado al estudio de la transferencia de calor en el molde[12-14)], encontrando que los gradientes de temperatura generan esfuerzos sobre las

paredes del molde, principalmente por debajo del menisco y en la zona del embudo afectando negativamente la vida útil del molde[13)].

Se han usado frenos electromagnéticos para frenar el flujo e incrementar la temperatura en el menisco por efecto de la homogeneidad térmica provocada por esta herramienta[14)]. Por otro lado, se han desarrollado diferentes trabajos enfocados al estudio de los patrones de flujo al interior del molde, tanto por modelado físico, simulación matemática y ambas[15-21)]. En varios de estos trabajos se estudiaron las asimetrías de las recirculaciones superiores en el molde encontrando que éstas, afectan fuertemente la forma del menisco y que dependen directamente de las fluctuaciones de los chorros de descarga[15-19)]. Estas fluctuaciones fueron estudiadas a mayor detalle por E. Torres y colaboradores[6, 20)] a las cuales, debido a su intensidad y periodicidad, les denominaron distorsiones dinámicas. Determinaron que su origen está vinculado a un desbalance de la energía cinética, consecuencia de la generación de una velocidad positiva.

Debido a que el flujo debe mantener el suministro de energía; que el fluido transportara a través de los mecanismos de convección media y presión viscosa, fomentando el incremento en la transferencia de movimiento durante un corto tiempo, dando lugar a las distorsiones dinámicas. Morales y colaboradores[21)] determinaron que éstas oscilaciones pueden disminuirse considerablemente al rediseñar la buza de alimentación y con ello reducir los efectos de corte excesivos con el fluido a su alrededor, los cuales de acuerdo a sus resultados inducen una severa disipación de energía cinética promoviendo fuertes oscilaciones de los chorros de descarga. Sin embargo, éste trabajo se enfoca en el comportamiento de los patrones creados por los fenómenos de flujo asociados con la creación y destrucción de la turbulencia al interior del molde mediante el uso de tres buzas con geometrías diferentes con tres autorías diferentes, es decir, en realidad se trata de un resumen de tres trabajos diferentes.

A pesar de todos estos esfuerzos, el origen de las oscilaciones de los chorros no ha quedado claro del todo y en la mayoría de los trabajos se ha demostrado y comprobado que modificando la buza es cuando se logra un mejor control y

disminución de las oscilaciones de los chorros. Considerando lo anterior, uno de los objetivos del presente trabajo es estudiar a mayor detalle el efecto del diseño interior de la buza sobre la estabilidad y oscilación de los chorros, buscando determinar el origen de dichas oscilaciones.

1.1. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la tendencia a incrementar la demanda de una mayor calidad en los productos terminados de acero, generando la necesidad de continuar analizando minuciosamente los fenómenos turbulentos de flujo de fluidos que se desarrollan al interior del molde de planchón, así como al interior de la buza, para así tener una mejor comprensión de éstos y lograr encontrar la mejor técnica del control del flujo de fluidos posible.

La importancia de tener un flujo con buenas características en el interior del molde de colada continua para la producción de aceros limpios y libres de defectos siempre ha sido uno de los principales objetivos de los técnicos de producción u operarios de colada continua. Para alcanzar las características de flujo deseadas, un buen diseño de la buza y las velocidades volumétricas de flujo son algunos de los pre-requisitos que primero se deben de cumplir. Para asegurar la efectividad del molde y optimizar el diseño de la buza, se hace uso de modelos físicos y matemáticos para simular el flujo al interior; tanto de la buza como del molde.

El flujo de fluidos en el molde y buza tienen una enorme influencia sobre varios fenómenos, los cuales pueden tener consecuencias de gran magnitud sobre la calidad del producto final. Éstos son, entre otros:

- Flujo de fluidos transitorios y turbulentos a través de la buza de entrada de geometría compleja al interior de la cavidad del molde.
- Las influencias de algunos parámetros de operación sobre esos fenómenos incluyen; geometría de buza, inyección de argón si existe y las fuerzas electromagnéticas, en caso de usar frenos electromagnéticos.

- Transporte de inclusiones a través del acero líquido, incluyendo efectos boyantes, interacciones turbulentas y posible atrapamiento de éstas sobre las paredes de la buza, capa de acero solidificada y la superficie libre.
- Fenómenos relacionados al transporte del sobrecalentamiento incluyendo los efectos de las fuerzas de flotación (boyancia) térmica sobre el fluido, solidificación del menisco, adelgazamiento de la capa solidificada debido al impacto del chorro de acero proveniente de la buza, unido al análisis de esfuerzos térmicos para la predicción de grietas, etc.

En el presente trabajo de investigación otro de los objetivos es optimizar el comportamiento de los patrones de flujo presentes en el interior del molde a partir de la modificación de la geometría interna de la buza sumergida (SEN).

1.2. Hipótesis.

Al modificar la geometría interna de la buza propuesta se mejorará el flujo de fluidos al interior del molde. Se logrará la disminución de las oscilaciones de los chorros de acero provenientes de los puertos de la buza sobre todo a profundidades de inmersión menores, así como las fluctuaciones en el menisco, formación de vórticidades y formación de ondas en la interfase metal-escoria. Con esto se tendrá una capa de acero solidificado y lubricación de las paredes del molde más uniforme, menor probabilidad de rompimientos del hilo, menor arrastre de escoria, menos inclusiones y por lo tanto un acero más limpio y de mejor calidad.

1.3. Objetivo General.

Optimizar el diseño de la buza de colada continua de planchón delgado mediante simulación física y matemática haciendo uso del software comercial Gambit® y Fluent®. Además, tener una menor distorsión dinámica de la interfase metal-escoria, mejorar los patrones de flujo en el molde sin producir un rompimiento de la capa de acero solidificado en las paredes del molde y además evitar el atrapamiento de inclusiones.

1.3.1. Objetivos Particulares.

(i). Diseñar una nueva geometría de buza, basándose en una utilizada actualmente en la industria, que permitirá tener un flujo menos turbulento y con mejores características al interior del molde.

(ii). Con el modelado matemático se medirá la energía de disipación en las zonas de impacto en el molde de colada continua mientras que en el modelo físico se medirá ésta con acelerómetros.

(iii). Simular físicamente dos inmersiones de buza original, 11 y 17cm debido al factor de escala seleccionado 1:0.5 a velocidades de colada de 4, 5, 6 y 7 m/min, tomadas de casos reales de la industria.

(iv). Simular matemáticamente la buza original y tres modificaciones de esta a dos inmersiones de buza, 22 y 34cm debido al factor de escala seleccionado 1:1 a velocidades de colada de 4, 5, 6, 7 y 8 m/min, tomadas de casos reales de la industria.

(i). Comparar los resultados del modelado matemático obtenidos de la buza original, con los resultados del modelado físico por medio de dos técnicas; análisis de vibraciones y de imágenes.

1.3.2. Metas Científicas.

Evaluar la influencia de diferentes condiciones operativas de la máquina de colada continua para lograr establecer conclusiones de distintos casos en lo que respecta al sistema buza – molde.

Se plantea experimentar tanto en el modelo físico como el matemático algunas de las variables en juego como: geometría de buza, velocidad de colada y profundidad de inmersión de buza.

Los cálculos y experimentos que se realizarán permitirán comparar el comportamiento del sistema buza–molde para algunas combinaciones de las variables antes mencionadas.

Se plantea el uso de medición de vibraciones para cuantificar la energía de disipación en las paredes del molde de colada continua y usarla como elemento de control de la calidad del planchón solidificado.

CAPITULO II.

2. ESTADO DEL ARTE.

Dado que recientemente los investigadores han enfocado sus estudios tanto físicos como matemáticos en el análisis de los patrones de flujo presentes en el interior de moldes de colada continúa. No obstante, la mayoría de estos trabajos se han centrado en geometrías simples como la del molde para la producción de planchón convencional, palanquilla y tocho. Por lo que hasta el presente existe muy poca información en la literatura del comportamiento de los patrones de flujo al interior del molde de planchón delgado de paredes rectas y tipo embudo y mucho menor con respecto al estudio del comportamiento del flujo al interior del molde haciendo uso de las distintas buzas hasta ahora existentes.

Por lo que, a continuación, se hace mención de los trabajos de investigación de mayor relevancia en relación al flujo de fluidos al interior del molde, a las oscilaciones de los chorros de descarga provenientes de la buza sumergida y a la fluctuación de la superficie libre.

Torres-Alonso y colaboradores[6, 20)], estudiaron las oscilaciones de los chorros de descarga de una buza bifurcada en un molde de planchón delgado, esto mediante el uso de varias técnicas experimentales tales como velocimetría de partículas por imágenes (PIV, por sus siglas en inglés Particle Image Velocimetry), simulación física y matemática encontrando que, las distorsiones dinámicas incrementan las oscilaciones permanentes de los chorros de descarga produciendo gradientes considerables de los esfuerzos de Reynolds con el flujo a su alrededor. Los cuales, a su vez originan gradientes en la velocidad de disipación de la energía cinética a través de los chorros de descarga generando remolinos grandes y pequeños los cuales transportan esta energía hacia la superficie libre del molde utilizado, refinando la estructura del flujo justo por debajo de la punta de la buza (SEN). Concluyendo que, periodos de distorsión dinámica de por lo menos 10s son

observados los cuales intensifican la formación de vórtices sobre la superficie, así como la inestabilidad del menisco dando lugar a grandes asimetrías en el flujo.

M. H. Zare y colaboradores[27] llevaron a cabo la modelación matemática tridimensional y modelación física en la región del molde de la máquina de colada continua de planchón delgado, usando las dimensiones geométricas reales desde el puerto de entrada de la buza. Los resultados indican un patrón de flujo en el interior del molde cuando se usa una buza de cuatro puertos (Fig. 2.1). Dicho patrón está compuesto de dos zonas grandes de recirculación hacia arriba y hacia abajo del molde con un clásico doble giro y la generación de dos pequeños vórtices provocados por el flujo saliente de los dos puertos superiores de esta buza. En el cual los resultados de los patrones de flujo obtenidos concuerdan bien con la observación real en un modelo con agua escala 1-1.

En dicho estudio se investigó el comportamiento de las ondas interfaciales y el mecanismo mediante el cual, se llega al rompimiento de la interfase metal-escoria; y como consecuencia de esto la introducción de impurezas dentro del producto final de acero. Demostraron que la altura máxima de onda es producida por el contacto directo del fluido proveniente de los puertos superiores de la buza con la superficie. Además, una velocidad de colada crítica fue definida como la velocidad de colada que conduce a la inestabilidad de las ondas producidas en la interfase, la cual, es principalmente asociada con la creación de un oleaje continuo en la en esta lo cual agitará en demasía la escoria, provocando aperturas en la misma y arrastre de escoria hacia el seno del metal liquido debido a la formación continua de vórtices. Esto provocaría la oxidación del acero líquido en contacto con la atmosfera y con esto la degradación de la calidad del producto final.

Honeyands[15] y colaboradores realizaron un estudio del flujo de fluido, en un molde de planchón delgado, utilizando un modelo con agua demostrando que dicho flujo no es estable ni simétrico y aún más que oscila periódicamente. Puntualizaron que las perturbaciones observadas sobre la superficie están asociadas a las oscilaciones auto-sostenibles de los chorros que salen desde los puertos de la buza (SEN). Mencionan que el flujo de recirculación ascendente cerca de la cara estrecha

es el responsable de la elevación de la superficie libre y de la magnitud de las ondas; y que la altura máxima de las ondas es función de la velocidad de colada. Dicha investigación se llevó a cabo en un molde paralelo con una buza recta y por lo tanto sus resultados no son aplicables a un molde tipo embudo con geometría compleja.

Hans Jurgen Odenthal y colaboradores[23)] llevaron a cabo la simulación de una buza sumergida mediante simulación física en un modelo de escala 1-1 utilizando velocimetría de partículas por imágenes y simulación matemática. Utilizando diferentes velocidades de colada y dos geometrías diferentes de buza. Reportando que la buza de un solo puerto muestra un patrón de flujo con una doble recirculación el cual conduce a altas ondas superficiales estacionarias. Por otro lado, los chorros provenientes de la buza bifurcada oscilan y producen un patrón de flujo transitorio con amplitudes de onda bajos. Las amplitudes de onda para la buza de un solo puerto muestran una variación lineal con la velocidad de flujo volumétrico. Concluyendo que los resultados experimentales concuerdan bien con los resultados obtenidos con el modelo matemático lo que conduce a hacer una buena interpretación de los fenómenos de flujo.

Bingzhen SHEN y colaboradores[4, 5)], estudiaron la inestabilidad del flujo de fluidos y el nivel de fluctuación en un molde de planchón delgado, por medio de simulación física con agua en un modelo a escala 1:1 y el uso de sensores de presión, velocimetría de partículas por imágenes, para establecer la relación que existe entre la inestabilidad del flujo y el nivel de fluctuación en el molde. Encontraron que el centro de la recirculación superior oscila provocando que el perfil del menisco fluctué con el tiempo, dependiendo la altura de la deformación principalmente de la posición de la recirculación con parámetros de proceso constantes. Concluyen que la altura de la deformación tiene una relación inversa con el centro de la posición de la recirculación con la altura del molde, disminuyendo su altura con el descenso de la recirculación.

X.-Y. Tian[10)] y Heping LIU[14)], Baokuan LI[8, 11)] investigaron la influencia de diferentes velocidades de colada sobre la formación de vórtices, el flujo de fluidos, transferencia de calor y solidificación en el molde de planchón delgado mediante el

uso de frenos electromagnéticos. Encontraron que el patrón de flujo, nivel de fluctuación, disipación del sobre calentamiento, distribución de temperatura y crecimiento de la costra de acero solidificado presentan diferentes características. La geometría de la buza afecta fuertemente la altura de impacto de los chorros de descarga provenientes de la misma y la manera en la cual se lleva a cabo la disipación del sobre calentamiento y el crecimiento uniforme de la costra de acero solidificado. Concluyen que el uso de frenos electromagnéticos en moldes de planchón delgado causa un cambio dramático en el patrón de flujo y distribución de temperatura, lo cual da como resultado la eliminación casi por completo de las fluctuaciones en el menisco, así como el incremento de la temperatura en esta región del molde y zonas por debajo del lugar de impacto de los chorros con las paredes delgadas del molde.

QUAN YUAN y colaboradores[17)] estudiaron los flujos transitorios en el molde mediante simulación matemática y física, con modelos con agua a escala 1:1. Encontraron que, los patrones de flujo simulados concuerdan bien con las medidas obtenidas con la técnica de hilo caliente e inyección de trazador en el modelo de agua. Las simulaciones muestran que las asimetrías incluyen asimetrías de termino corto esto en el puerto de la buza y a lo largo del chorro y asimetrías intermitentes de termino largo sobre la superficie del molde y en la recirculación inferior, siendo éstas causadas por la naturaleza turbulenta del fluido. Encontraron además que la interacción entre la parte izquierda y derecha del dominio provocan flujos transitorios importantes tales como repentinos cambios en la velocidad en la superficie del molde. Concluyendo que las asimetrías inducidas suprimen los cambios repentinos en la velocidad en la superficie del molde y flujos transitorios de baja frecuencia en las recirculaciones inferiores del molde.

D. GUPTA y colaboradores[1, 2)] estudiaron la magnitud del flujo asimétrico en diferentes modelos físicos con agua de moldes de colada continúa haciendo uso de dos diferentes configuraciones. La primera en donde el fluido es descargado a través de múltiples orificios en el fondo del molde, el patrón de flujo en la porción inferior de este depende del tamaño de las dos recirculaciones inferiores presentes

en el fondo del molde. Si estas alcanzan el fondo del molde, el patrón de flujo en la porción del fondo del molde es simétrico cerca del plano central de este; de lo contrario es asimétrico. Por otro lado, en el molde donde el fluido es descargado a través de la sección transversal completa del molde, el patrón de flujo es siempre asimétrico si la relación de aspecto es 1:6.25 o más. El chorro de fluido gira mientras emerge por la buza. Por lo que, la interacción del giro de los chorros provenientes de la buza con las paredes amplias del molde incrementan el flujo asimétrico en el interior del molde. Mientras que, en moldes con una relación de aspecto menor, donde los chorros no tocan las paredes amplias laterales, el patrón de flujo es simétrico en el plano central.

Fady M. Najjar y colaboradores[30)] realizaron un estudio del comportamiento del flujo turbulento a través de buzas bifurcadas, esto mediante el uso de simulación numérica tridimensional en estado estable. Mostrando sus resultados que el ángulo del chorro de descarga proveniente de los puertos de la buza es controlado principalmente por el ángulo del puerto, aunque los chorros siempre salen a un ángulo más pronunciado hacia abajo que el ángulo del puerto de la buza. Se llega a una significativa asimetría en el flujo mediante el bloqueo de una parte del área de entrada o dirigiendo el flujo angulado través de la entrada. Cada uno de estos efectos disminuye el flujo másico e incrementa el ángulo del chorro a un puerto con su correspondiente cambio opuesto en el otro puerto. Los efectos pueden parcialmente cancelarse uno con otro. Además, concluyen qué, sí se varía el tamaño de puerto, relativo o la curvatura de las paredes superiores del puerto, se inducen efectos asimétricos similares.

Hajari y colaboradores[19)] estudiaron la turbulencia superficial del molde usando modelo físico con agua, a una escala 1:1 de un molde de planchón delgado tipo embudo con una buza sumergida de cuatro puertos. El objetivo principal fue determinar los parámetros de operación óptimos. Los resultados muestran que el diseño de la buza de cuatro puertos (Fig. 2.1), conduce a un patrón de flujo en la cavidad del molde con 2 recirculaciones en la parte inferior y 4 en la parte superior del molde provocadas por los 2 puertos colocados en la parte superior de la buza y

los 2 en la parte inferior de ésta. Concluyendo que, a mayor velocidad de colada y menor profundidad de inmersión de buza se incrementa la turbulencia superficial y con esto la formación de vórtices y el arrastre de escoria.

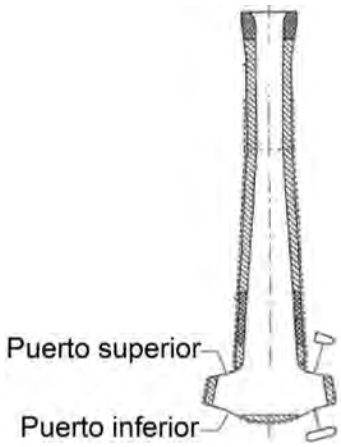

Figura 2.1. Esquema de la sección transversal del diseño de buza de cuatro puertos[27, 39].

H. Trippelsdorf y colaboradores[7] realizaron un estudio sobre la calidad superficial de lámina, obtenidas en máquinas de colada continua de planchón delgado. En éste, muestran un resumen de los resultados obtenidos a través de la simulación física y matemática, para la optimización de la geometría del molde y la buza. El objetivo, obtener un patrón de flujo con una buena estabilidad de la interfase metal-escoria e incrementar la limpieza del producto final, para velocidades de colada por debajo de los 6m/min ya que, por encima de esta velocidad se incrementa la inestabilidad del flujo y por lo tanto los efectos adversos sobre la calidad superficial. Recomiendan la utilización de frenos electromagnéticos para el control de las condiciones de flujo en el molde en función de la velocidad de colada, ancho del molde, grado de acero, sobre calentamiento y geometría de la buza. Sugieren que usando frenos electromagnéticos es posible alcanzar una buena, y reproducible calidad superficial de la lámina, dentro de un amplio rango de velocidades y grados de acero, asegurando además una alta seguridad operacional.

Rodolfo D. Morales y colaboradores[21] diseñaron una buza sumergida para moldes de planchón delgado operando a altas velocidades de colada, usando simulación matemática y física con modelos escala 1:1. Utilizaron técnicas experimentales tales

como inyección de trazador para observar los patrones de flujo, cámara de alta velocidad, análisis de imágenes para seguir los cambios dinámicos del nivel del menisco y velocimetría de partículas por imágenes PIV para medir la velocidad del agua en el molde. Este diseño fue comparado con otros dos diseños de buza de uso comercial, usados en varios moldes de planchón delgado. De acuerdo a sus resultados con las comparaciones de las simulaciones matemáticas física de las tres buzas, la buza propuesta entrega flujos más estables independientemente de la velocidad de colada y la profundidad de inmersión de buza. Donde el patrón de flujo entregado por ésta, al molde, está compuesto de una doble recirculación sin la generación de vórtices superficiales, mientras que para las otras dos los chorros de descarga son inestables debido a los efectos de corte excesivos con el fluido a su alrededor, induciendo a una severa disipación de energía cinética lo que provoca severas oscilaciones de éstos e induciendo fuertes oscilaciones en el menisco. Concluyen que este diseño de buza ha reportado un buen funcionamiento en la industria y una vida en operación mayor, debido a que la zona de protección de la buza (zona de la buza en contacto con la línea de escoria) sufre menos desgaste debido a las bajas velocidades del fluido en contacto con las paredes de la buza.

Mehmet Metin Yavuz[9)] realizo un trabajo de investigación sobre el efecto de los frenos electromagnéticos sobre el flujo de acero líquido en el molde planchón delgado. Utilizó dos tipos de geometrías de buza. Hizo simulación matemática, modelado magneto-hidrodinámico, además de simulación física. Esto para realizar la validación de los resultados del modelo matemático apoyándose en el uso de velocimetría de partículas por imágenes (PIV). Resultando que, existen diferencias significativas entre las estructuras de flujo obtenidas con ambas buzas, a pesar de que ambos diseños de buzas tengan similitudes fundamentales y tengan cuatro puertos. Mencionando además que, el uso de frenos electromagnéticos reduce las velocidades en el menisco para la buza 2, mientras que para la buza 1, la penetración del chorro de acero proveniente de los puertos de debajo de la buza hacia abajo es significativamente lento. Concluyendo que, a ambas profundidades de inmersión de buza poco profunda y profunda, los efectos del freno sobre las velocidades del menisco son más pronunciados. Reduciendo la resistencia del freno

para una inmersión de buza poco profunda e incrementando la resistencia para una inmersión profunda ayuda a mantener una actividad de flujo en el menisco similar.

Cesar Real y colaboradores[22)] realizaron un estudio sobre la caracterización interna del flujo transitorio de una buza sumergida bifurcada, utilizando simulación matemática. Se hace una comparación entre los modelos de turbulencia k-ε y LES por sus siglas en inglés (LARGE EDDY SIMULATION). Los resultados muestran que el comportamiento periódico en la formación de vórtices es una consecuencia de la interacción dinámica entre el fluido estancado en la buza y el fluido ligeramente por encima de esta zona. Además, encontraron que las características del comportamiento periódico dependen de la velocidad de colada. Sugieren que los efectos de las variables del proceso deben ser reanalizadas con el modelo de turbulencia LES.

Raúl Miranda y colaboradores[3)] hicieron un análisis, modelado físico y matemático, de la superficie libre de un molde de colada continua. El modelo físico con agua se hizo a una escala de 1/3. Las mediciones del nivel de agua se hicieron con sensores de distancia ultrasónicos y registrados con tarjeta DAQ en una computadora. Encontraron que, las oscilaciones en la superficie libre están compuestas de varias componentes periódicas, existiendo una frecuencia fundamental de 1.2 Hz, además, encontraron otras dos frecuencias de 1.8 y 2.1 Hz cuya contribución al comportamiento dinámico de la superficie libre, depende de la posición espacial y de algunos parámetros del proceso, tales como, velocidad de flujo volumétrico y profundidad de inmersión de buza. Concluyen que sí se determina la manera en la cual los componentes periódicos del perfil de la superficie libre pueden ser modificados, mejoraría eventualmente la calidad del acero colado por ésta vía.

Young Jin Jeon[29)] y colaboradores llevaron a cabo un estudio cuyo objetivo fue investigar las oscilaciones del flujo y las fluctuaciones del menisco en un molde de planchón delgado tipo embudo haciendo uso de varios diseños de buza. Construyeron de un modelo físico con agua a escala real, se llevaron a cabo mediciones con velocimetría de partículas por imágenes (PIV). Encontraron que la relación del espesor del molde al ancho del molde influencia las fluctuaciones del

menisco y que la resistencia de las oscilaciones está relacionada con el tamaño del embudo.

Brett M. Gebert y colaboradores[31] hicieron una simulación matemática modelando el flujo de líquido inyectado a través de una buza sumergida al molde. Observaron la oscilación de los chorros en el molde de colada continua de planchón delgado. Encontraron que la oscilación depende del intercambio de fluido entre elementos re-circulantes a ambos lados del chorro, vía cruce de flujo a través del hueco entre la buza y la pared amplia del molde. Las características del chorro oscilante son investigadas, esto variando la resistencia al cruce de flujos; dado que ésta resistencia ocurre naturalmente, ya que la buza obstruye el cruce de flujos. Concluyen que las oscilaciones pronosticadas pueden ser manipuladas alterando el cruce de flujos (esto a través del uso de una fuerza de resistencia efectiva K en la ecuación de movimiento) o deteniéndolos completamente para formar un patrón de flujo asimétrico estático. Los cálculos del flujo son llevados a cabo usando un modelo de flujo de fluidos turbulento, bidimensional en estado transitorio. Hay que notar que el aporte de este trabajo tiene una orientación más hacia el entendimiento de los patrones oscilantes del flujo que se presentan al interior del molde, provocados por la entrada de movimiento de los chorros de la buza hacia el metal a su alrededor, que hacia la solución o entendimiento de dichas oscilaciones. Además de que físicamente sería muy difícil poder lograr detener el cruce de flujos y mantener un patrón de flujo asimétrico hacia solamente uno de los chorros de la buza. Además, el trabajo fue realizado solo 2D, por lo que no puede tener la relevancia de un trabajo realizado en 3D.

YU Hai-qi y colaboradores[24] estudiaron, mediante simulación numérica el campo de flujo del acero líquido y el comportamiento entre las fases del acero líquido y la capa de escoria en un molde de colada continua de planchón delgado con inyección de argón. En el cual, los efectos de la profundidad de inmersión de buza, ángulo del puerto, velocidad de colada y flujo de gas argón sobre el flujo y el nivel de fluctuación de acero líquido fueron considerados. Mostrando sus resultados que el acero líquido que sale de la buza con tres puertos al interior del molde forma tres zonas de

recirculación incluyendo una zona de recirculación superior a cada lado de la buza y dos zonas de recirculación inferiores. La inyección de gas argón da como resultado la formación de vórticidades secundarias en el flujo en la zona superior junto a la buza. Concluyendo que, para una velocidad de colada dada y flujo de gas argón, incrementando el ángulo del puerto y la profundidad de inmersión de la buza puede efectivamente restringir la fluctuación entre las fases acero-escoria. Sí se incrementa la velocidad de colada el nivel de fluctuación se modifica notablemente. Para una velocidad de colada fija el flujo de argón tiene un valor crítico, una vez que la fluctuación entre fases es más fuerte cuando el flujo de argón es menor a un cierto valor crítico, pero, cuando el flujo de argón excede dicho valor el nivel de fluctuación es menos intenso que sí no se inyectara argón.

R. Chaudhary y colaboradores[32)] realizaron de la influencia de la forma de la buza en los patrones de flujo en el molde de colada continua bajo condiciones transitorias y en estado estable. Éste trabajo fue realizado haciendo modelación matemática y física, éste último usando un modelo con agua a una escala de 1/3 para caracterizar los flujos en la buza y el molde, y evaluar el funcionamiento de la buza de fondo profundo y de forma convexa. Las velocidades pronosticadas con el modelo de turbulencia tridimensional k-ε concuerdan con las mediciones realizadas mediante velocimetría de partículas por imágenes (PIV) y sondas de impulso-velocidad en el modelo físico. La velocidad del chorro en estado estable y el ángulo de salida de los puertos fue similar para los dos diseños de fondo de buza. Sin embargo, los resultados muestran que la buza con el fondo abultado es más susceptible a de asimetría en el flujo, variaciones en flujo superficial de baja frecuencia y velocidades superficiales excesivas. Las mismas ventajas de la buza de fondo profundo son predichas por el flujo en el molde de colada continua de acero. Los resultados deben de verse con reserva ya que el método de medición es invasivo y además fue realizado en planchón convencional.

B. Zhao y colaboradores[28)] investigaron mediante modelación matemática, modelación física y experimentos en planta, el flujo turbulento de acero líquido y el transporte del sobre calentamiento en la región del molde de una máquina de colada

continua de planchón delgado. Las velocidades del fluido pronosticadas concuerdan con las medidas tomadas de los experimentos de inyección de trazador en el modelo físico con agua escala 1:1 del proceso. Concluyendo que los chorros provenientes de los puertos de la buza mostraron variaciones caóticas, produciendo fluctuaciones de la temperatura, en la región superior del líquido en el molde, de ±4°C y picos en el flujo de calor de ±350 kW/m^2.

N. J. Lawson y M. R. Davidson[26] llevaron a cabo un trabajo de investigación, en el cual, mediante modelación física y modelación matemática de dinámica de fluidos bidimensional, incorporando un coeficiente de resistencia para el flujo cruzado. La geometría básica representa un modelo a escala de un molde típico de colada continua de planchón delgado. Usaron herramientas como LDA (Laser Doppler Anemometry, por sus siglas en inglés) y velocimetría de partículas por imágenes (PIV). Estudiaron la oscilación auto-sostenible de los chorros de agua en una cavidad rectangular, el cual la relación espesor/amplitud es relativamente pequeño. Encontrando que la frecuencia de la oscilación es independiente del espesor de la cavidad, incrementando cuando la amplitud de la cavidad decrece hasta un valor crítico después del cual, la oscilación cesa. Observaron que la frecuencia de ésta incrementa con el diámetro de la buza y que disminuye con el incremento de la relación longitud/amplitud de la cavidad. El modelo numérico con un coeficiente de resistencia al flujo cruzado adimensional demostró que pronostica el número de Strouhal, extremadamente bien, la oscilación y los perfiles de velocidad media adimensionales en el chorro.

R. Kalter y colaboradores[25] investigaron la dinámica de la superficie libre y el comportamiento de flujo sub-superficial en una cavidad delgada llena con agua con una buza bifurcada. Usaron la técnica de visualización de la superficie libre y velocimetría de partículas por imágenes (PIV). Se identificaron tres regímenes diferentes en el comportamiento de la superficie libre, dependiendo de la profundidad de buza y la velocidad de entrada. Para profundidades de buza pequeñas, se observa una superficie libre irregular sin periodicidades claras. Para profundidades intermedias de buza y velocidades de entrada altas se presentan

oscilaciones consistentes de modo natural con la aparición de cierto oleaje. A mayores profundidades de buza ocurren oscilaciones asimétricas auto sostenibles de baja frecuencia. Para el último caso, las mediciones hechas mediante el PIV del flujo por debajo de la superficie libre, indican una fuerte oscilación de la dirección con la cual, cada uno de los dos chorros provenientes de la buza es eyectado. La frecuencia de oscilación del chorro es idéntica a la frecuencia de oscilación de la superficie libre. Los dos chorros oscilan en anti fase causando la oscilación asimétrica de la superficie libre. Los chorros interactúan a través del cruce de flujos en los huecos entre el canal de entrada y las paredes frontal y posterior de la cavidad del molde.

2.1. Flujo de Fluidos en la Buza.

Actualmente se reconoce que la geometría de la buza tiene una influencia determinante en las condiciones de flujo dentro del molde[3, 19, 22, 30, 33-35, 39)]. Mediante la comparación entre modelos físicos y matemáticos, se ha observado que el flujo a la salida cambia dependiendo de ciertas características geométricas de la buza como son su longitud, forma y dimensiones internas de la buza, altura metalúrgica y el tamaño y la forma de los puertos de salida. Algunas de estas características cambian de manera natural debido a las condiciones de operación de la máquina de colada continua. El ejemplo más claro de esto es la modificación de la geometría de los puertos debido al desgaste de la buza ocasionada por erosión y por la formación de acreciones. Por lo tanto, para lograr una caracterización correcta del comportamiento del flujo dentro de la buza, es necesario reproducir las condiciones a diferentes regímenes de operación y determinar el efecto de las condiciones geométricas iníciales de diseño.

La buza sumergida (SEN) conecta al distribuidor con el molde como se puede ver en la Fig. 2.2. El flujo a través de la buza influencia el taponamiento, entrada de aire, y lo más importante, controla las condiciones del flujo entrante al molde. Esas condiciones incluyen el ángulo, velocidad y la oscilación de los chorros provenientes de los puertos de la buza, su nivel de turbulencia, recirculación y extensión y el tamaño y la distribución de burbujas de gas e inclusiones acompañantes. Por lo que

la modelación del flujo precisa, requiere de una atención cuidadosa a dichas condiciones de entrada.

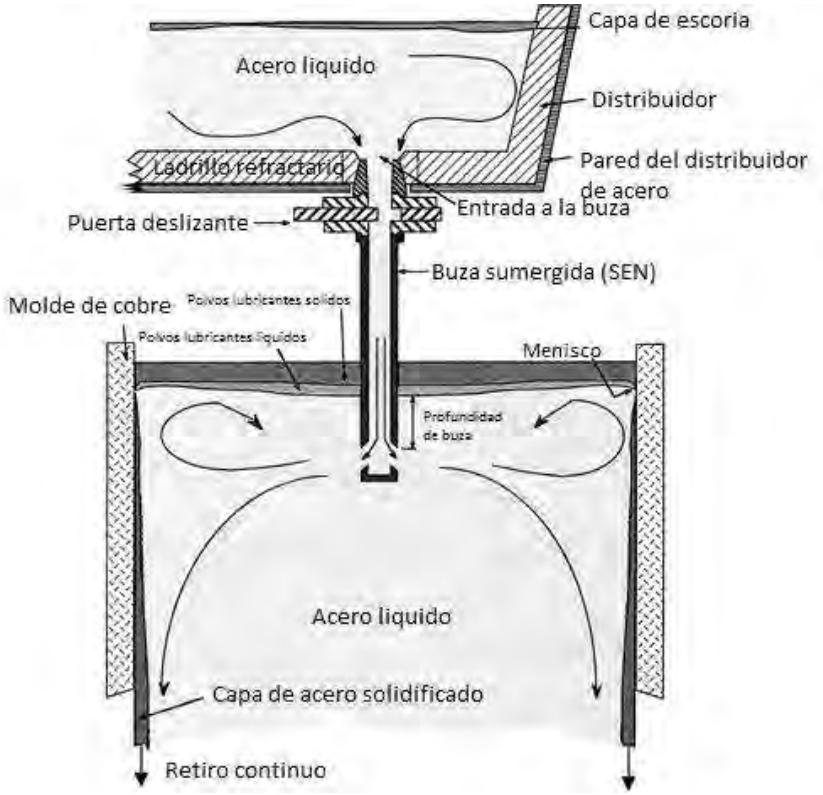

Figura 2.2. Partes más importantes del distribuidor y el molde[33)].

2.2. Flujo en el Molde.

El comportamiento del flujo de fluidos durante la colada continua gobierna la calidad del producto final. Algunos investigadores[19, 30, 33)] han estudiado los flujos transitorios en el interior del molde haciendo uso de modelación física y matemática. La oscilación de los patrones del flujo eliminará o reducirá la falta de uniformidad en el crecimiento de la capa de acero solidificada. Por lo que, el control del flujo de fluidos en el molde juega un papel muy importante para conseguir un producto de mejor calidad.

2.3. Profundidad de Inmersión de la Buza.

La profundidad de inmersión de la buza, no es constante durante el proceso, esto como una medida para minimizar la erosión de la buza sumergida en la interfase metal-escoria. Los efectos de la inmersión de la buza sobre la calidad del acero deben ser tomados en cuenta[36)].

Incrementando la profundidad de inmersión de la buza naturalmente cambia el patrón del flujo ascendente, impidiendo que este llegue con una alta velocidad a la interfase metal-escoria; disminuyendo así, la amplitud de las ondas, inestabilidad y fluctuación en la interfase metal-escoria. De esta forma inmersiones más profundas disminuyen el atrapamiento de escoria.

Sin embargo, incrementar demasiado la profundidad de la buza tiene sus consecuencias. Una inmersión muy profunda puede enviar inclusiones dentro de las zonas de recirculación, donde una gran cantidad de estas podrían quedar atrapadas como defectos permanentes en el producto final. Por otro lado, el acero que fluye dentro del molde se vuelve más lento y frio produciendo un mezclado insuficiente.

Así cada buza tiene una profundidad de inmersión optima la cual estará en función del ángulo de los puertos, velocidad de colada, dimensiones del molde, etc.

2.4. Dinámica de Fluidos Computacional.

Para asegurar la eficacia de un diseño de buza dado, se ha simulado el flujo del metal liquido al interior del molde matemáticamente, usando como prototipo el diseño en la producción industrial actual. La modelación matemática ha sido usada para predicciones del comportamiento del flujo. Existen varios paquetes computacionales comerciales los cuales pueden ser usados para predecir el comportamiento de los patrones de flujo al interior del molde. Los resultados obtenidos por esos modelos computacionales, como cualquier otro modelo computacional, son dependientes de las suposiciones y las condiciones de frontera usadas en su solución. Así, cualquier condición de frontera inapropiada puede conducir a resultados erróneos y engañosos. Es por lo tanto recomendado que los

resultados de un modelo matemático deban ser validados por experimentos reales, ya sea en planta o con modelación usando agua.

2.4.1. Modelación de Flujo de Fluidos.

Un modelo típico de flujo de fluidos tridimensional resuelve la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos Newtonianos incompresibles los cuales están basados en la conservación de masa (una ecuación) y momento (tres ecuaciones) en cada punto del dominio computacional. La solución de esas ecuaciones, nos dan los componentes de la presión y la velocidad en cada uno de los puntos del dominio. Debido a las altas velocidades de flujo involucradas en este proceso, estos modelos deben de incorporar flujo de fluidos turbulentos.

Diferentes modelos de turbulencia han sido usados por diferentes investigadores[17, 20-22, 27, 32] para simular el flujo de fluidos en el molde de colada, tales como los modelos de una sola ecuación (viscosidad turbulenta más una escala de longitud dada), modelos de turbulencia de dos ecuaciones tales como el modelo k-ε, LES (simulación de grandes remolinos) y el modelo de turbulencia de siete ecuaciones RSM (modelo de los esfuerzos de Reynolds), el modelo de los esfuerzos de Reynolds es anisotrópico es decir, las velocidades de deformación no son iguales en todas las direcciones.

La mayoría de los modelos de flujo previos, han usado el método de diferencias finitas y volumen de control debido a la disponibilidad de métodos de solución muy rápidos y eficientes. Los códigos más populares de propósito general son, entre otros: FLUENT, FLOW3D y PHOENICS.

2.4.2. Ecuaciones Fundamentales de transporte.

Los problemas que involucran flujo de fluidos raramente existen o son independientes en las operaciones de procesamiento de materiales, donde el principal objetivo es fundir, solidificar o alterar substancias químicamente, estructuralmente, o en términos de su forma. Sin embargo, puesto que la mayoría de dichos materiales están en un estado fluido (vapor o líquido) durante al menos

parte de la secuencia del procesamiento, el movimiento del fluido juega un papel crucial en varias de esas operaciones. Un mejor entendimiento de la mecánica de fluidos ha dado como resultado, mayores avances en la tecnología del procesamiento de materiales. La formulación general de problemas de flujo de fluidos es llevada a cabo a través de los enunciados de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales están constituidas por la ecuación de continuidad o conservación de masa, que es en esencia un balance de masa, y la ecuación de movimiento, la cual expresa un balance de momento.

Para describir completamente el flujo de un fluido se deben conocer las siguientes propiedades del sistema; Densidad (ρ), Presión (P), Temperatura (T) y Velocidad en las tres direcciones espaciales del problema (*u, v, w*), correspondientes a los ejes (*x, y, z*). Puesto que el sistema está constituido por 6 incógnitas, se necesitan seis ecuaciones para encontrar la solución al flujo tridimensional. Junto con la Ley de los Gases Ideales, las cinco ecuaciones restantes son las ecuaciones de Navier-Stokes[40-42)].

2.4.3. Conservación de Masa (Continuidad).

La primera de las ecuaciones gobernantes de movimiento de fluidos, expresa la ley de conservación de masa en el flujo con densidad ρ(x, y, z, t) y la velocidad V(x, y, z, t).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=-\frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad (1)$$

En varios tipos de flujos, la compresibilidad del fluido puede ser rechazada, si este es el caso, se puede considerar que la densidad es constante (ρ = constante) y la ecuación (1) reducirse a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (2)$$

2.4.4. Conservación de Movimiento en las Tres Direcciones.

La segunda ley de Newton indica que la velocidad de cambio de movimiento de una partícula de fluido es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre la partícula:

Velocidad de incremento de movimiento de una partícula de fluido	=	Suma de fuerzas sobre la partícula de fluido

La cual, indica que la velocidad de cambio de movimiento de un cuerpo es proporcional al desequilibrio de fuerzas que actúan sobre este y tienen lugar en la dirección de la fuerza. Es útil considerar las fuerzas que una partícula de fluido puede experimentar. Estas incluyen:

- Fuerzas de cuerpo tales como la gravitacional y electromagnetismo;
- Fuerzas debido a la presión;
- Fuerzas debido a la acción viscosa;
- Fuerzas debido a la rotación.

Siendo el agua un fluido incompresible para el cual la densidad y la temperatura se consideran constantes el sistema se reduce a:

$$\underbrace{\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)}_{\text{Termino Inercial}}=\underbrace{-\frac{\partial \rho}{\partial x}}_{\text{Gradiente de Presión}}+\underbrace{\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)}_{\text{Termino Viscoso}}+\underbrace{\rho g_x}_{\text{Fuerza de Cuerpo}}+\underbrace{F_B}_{\text{Termino Fuente}} \quad (3)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial \rho}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+\rho g_z+F_B \quad (4)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial \rho}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\rho g_y+F_B \quad (5)$$

El fluido será tratado como continuo para el análisis del flujo de fluidos a escalas de longitud macroscópicas (es decir de 1µm y mayores), donde la estructura molecular de la materia y los movimientos moleculares pueden ser ignorados.

2.4.5. Flujo Turbulento.

La transición de flujo laminar a turbulento ocurre a números de Reynolds críticos[41-47]. El número de Re expresado por la ecuación (16) es la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas. La naturaleza de cualquier flujo depende de la magnitud de esas dos fuerzas actuantes sobre el fluido. Las fuerzas inerciales tienden a perturbar el orden y el flujo unidireccional, mientras las fuerzas viscosas tienden a estabilizar el flujo y mantener las líneas de flujo juntas. A una velocidad relativamente baja y por lo tanto, a un número de Reynolds bajo las fuerzas viscosas dominan y su efecto estabilizante hace el flujo laminar. Sin embargo, cuando la velocidad se incrementa el efecto de las fuerzas inerciales domina y por encima de un Reynolds crítico el flujo se convierte en turbulento. La fuerza inercial actuante sobre un elemento de fluido es $\rho v^2 L^2$ y la fuerza viscosa es $\mu v L$.

$$\mathrm{Re}=\frac{\text{Fuerza Inercial}}{\text{Fuerza Viscosa}}=\frac{\rho v^2 L^2}{\mu v L}=\frac{\rho v L}{\mu} \tag{6}$$

En un flujo turbulento completamente desarrollado en estado estable, la velocidad en cualquier lugar fluctúa sobre su valor tiempo-promedio. Así, la velocidad y presión instantánea del fluido (u, v, w, P) es una suma de los valores promediados en el tiempo $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{P})$ y su componente fluctuante (u', v', w', P'). La velocidad instantánea es, por lo tanto

$$u=\bar{u}+u',\ v=\bar{v}+v',\ w=\bar{w}+w' \text{ y } P=\bar{P}+P' \tag{7}$$

Cuando los componentes fluctuantes en las tres direcciones son aproximadamente las mismas o independientes de la dirección, tal turbulencia es conocida como isotrópica. Así, en la turbulencia isotrópica

$$v'_x = v'_y = v'_z \tag{8}$$

2.4.6. La Naturaleza de la Turbulencia.

La turbulencia es una propiedad del flujo y no una propiedad del fluido mismo. En flujos que originalmente son laminares, el régimen turbulento surge de la inestabilidad que se desarrolla cuando el número de Reynolds incrementa. No existe una definición precisa de la turbulencia en fluidos, como tampoco existe una teoría general de la turbulencia.

2.4.7. Propiedades Observables de Flujos Turbulentos.

El análisis de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes o típicamente a la forma de la capa limite muestran que la turbulencia se desarrolla como una inestabilidad del flujo laminar. Para analizar la estabilidad del flujo laminar, métodos clásicos comienzan por linealizar las ecuaciones de movimiento. Aunque, las teorías lineales alcanzan solo un grado de éxito en la predicción del comienzo de las inestabilidades que al final conducen a la turbulencia, por lo que la inherente no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes impide una descripción analítica completa de los procesos de transición actuales, dejando únicamente el estado completamente turbulento. Para un fluido real (viscoso), matemáticamente hablando, las inestabilidades resultan principalmente de la interacción entre las no linealidades en las ecuaciones de Navier-Stokes y los términos inercial y viscoso. La interacción es demasiado compleja debido a su vórticidad, tridimensionalidad y dependencia del tiempo.

- **Señal irregular en espacio y tiempo.** Las cantidades físicas tales como velocidad y presión varían de una manera aparentemente al azar Fig. 2.3.

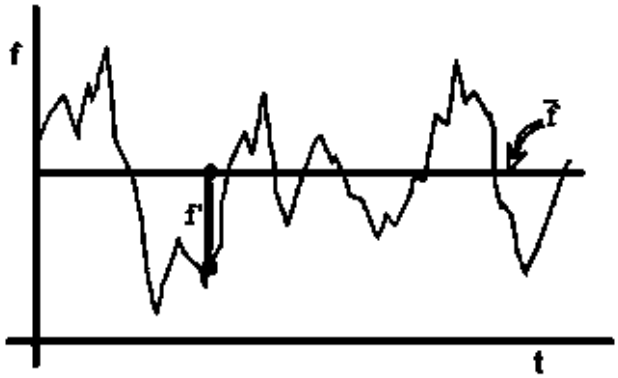

Figura 2.3. Señal turbulenta.

- **Flujo rotacional.** La presencia de innumerables vórtices transfiere el hecho de que un flujo turbulento es altamente rotacional. Las no linealidades controlan la interacción entre los vórtices de diferente tamaño Fig. 2.4.

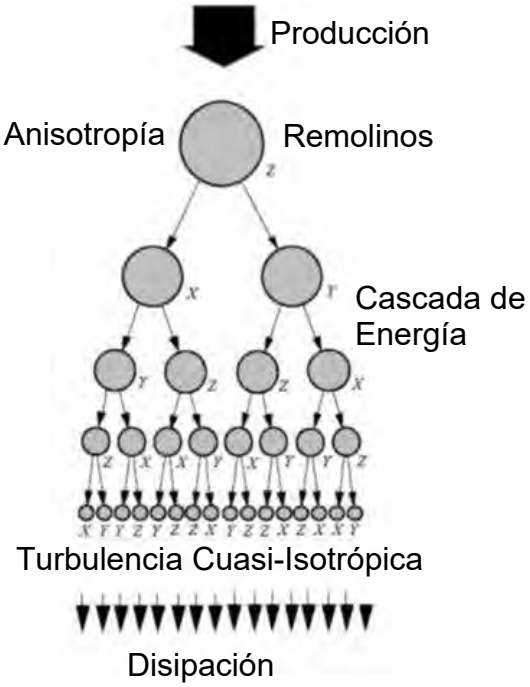

Figura 2.4. Diagrama que ilustra la tendencia de la turbulencia a la isotropía.

- **Alta difusividad.** Un campo turbulento difunde cualquier cantidad transportable, tal como temperatura, trazador o movimiento rápidamente. En realidad, la difusión se da debido a los términos que involucran productos de las velocidades fluctuantes y que están asociados con la transferencia de

movimiento convectiva debido a las recirculaciones turbulentas (lado derecho de la ecuación 19).

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\nabla(VU)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\nu\nabla(\Delta(V))+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial(-\rho\overline{u'v'}}{\partial x}+\frac{\partial(-\rho\overline{v'^2}}{\partial y}+\frac{\partial(-\rho\overline{u'w'}}{\partial z}\right] \qquad (9)$$

- **Fenómeno tridimensional.** Los movimientos turbulentos fluctuantes son siempre tridimensionales e inestables.

- **Carácter impredecible de trayectorias.** Las propiedades detalladas de un flujo turbulento presentan una sensibilidad extrema a las condiciones iniciales y de frontera. Este comportamiento es aparente si se considera una pequeña desviación en las condiciones iniciales, entonces se observa que los dos flujos se hacen rápidamente diferentes uno de otro sí se fija en su descripción instantánea detallada. Este carácter impredecible de las trayectorias de las partículas de fluido sobre intervalos de tiempo suficientemente grandes corresponde a la pérdida de memoria de las condiciones iniciales.

- **Coexistencia de remolinos de diferentes escalas.** Existe una cascada completa de vórtices de escalas pequeñas y más pequeñas, creada por procesos no lineales debidos a términos inerciales en las ecuaciones de movimiento.

- **Disipación.** La turbulencia no puede ser sostenida por sí misma, por lo que necesita que se le suministre energía. Esta fuente de energía puede tener varios orígenes, el más usual es por corte o deformación del flujo medio, aunque el origen también puede venir de fuerzas externas tales como fuerzas de flotación. Si la turbulencia es privada de cualquier proceso de generación ésta decae progresivamente. La turbulencia es disipativa. El mecanismo de disipación viscosa de la turbulencia está relacionado a la existencia de fuertes gradientes del campo de velocidad instantánea. La velocidad de deformación instantánea en realidad se hace muy alta al interior de vórtices

pequeños y la degradación de la energía cinética turbulenta en calor es así muy fuerte.

2.4.8. Modelo k-ε.

El modelo matemático propuesto por Jones y Launder conocido como k-ε, es un modelo semi empírico basado en la modelación de ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (*k*) y su disipación (ε). La ecuación para *k* se deriva de la ecuación exacta, mientras que la de ε se obtuvo mediante razonamiento físico y mantiene poco parecido con su equivalente matemático exacto. En la derivación *k*-ε se asume que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. De esta forma este modelo es solo aplicable a flujos turbulentos completamente desarrollados[47)].

2.4.9. Ecuaciones de transporte para el modelo k-ε.

Las ecuaciones para la energía cinética turbulenta y su velocidad de disipación son las siguientes:

$$\rho\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{t}}+\rho\frac{\partial \mathrm{k u_i}}{\partial \mathrm{x}_i}=\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\mathrm{k}}\right)\frac{\partial \mathrm{k}}{\partial \mathrm{x}_j}\right]+G_\mathrm{k}+G_\mathrm{b}-\rho\varepsilon-Y_\mathrm{M}+S_\mathrm{k} \qquad (10)$$

Y

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{t}}+\rho\frac{\partial \varepsilon \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_i}}=\frac{\partial}{\partial \mathrm{x_j}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_\mathrm{t}}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{x_j}}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{\mathrm{k}}(G_\mathrm{k}+C_{3\varepsilon}G_\mathrm{b})-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{\mathrm{k}}+S_\varepsilon \qquad (11)$$

donde, G_k es la generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, G_b *representa* la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotación, Y_M es la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible respecto a la disipación total, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ *y* $C_{3\varepsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos para *k* y ε respectivamente y S_k y S_ε son términos fuente.

La viscosidad turbulenta o de remolino (μt) se calcula combinando *k* y ε como sigue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{12}$$

donde C_μ es una constante y las constantes, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ , σ_k y σ_ε tienen los siguientes valores: $C_{1\varepsilon}$ =1.44, $C_{2\varepsilon}$=1.92, C_μ=0.09, σ_k=1.0 y σ_ε=1.3.

2.4.10. Modelo de los esfuerzos de Reynolds (RSM).

Este modelo abandona la hipótesis de la isotropía de la viscosidad turbulenta y usa las ecuaciones de los modelos RANS para resolver las ecuaciones de transporte de los esfuerzos de Reynolds, junto con una ecuación de rapidez de la disipación. Las ecuaciones exactas para los esfuerzos de Reynolds pueden ser expresadas como.

2.4.10.1. Ecuaciones de transporte de Reynolds.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\left\langle u_i' u_j'\right\rangle\right)}_{\text{Termino transitorio}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho_k\left\langle u_i' u_j'\right\rangle\right)}_{C_{ij}\equiv\text{Termino convectivo}} = \underbrace{-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho\left\langle u_i' u_j' u_k'\right\rangle + \left\langle P\left(\delta_{kj}u_i' + \delta_{ik}u_j'\right)\right\rangle\right]}_{D_{T,ij}\equiv\text{Difusion turbulenta}} +$$

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\left\langle u_i' u_j'\right\rangle\right]}_{D_{L,ij}\equiv\text{Difusion molecular}} - \underbrace{\rho\left(\left\langle u_i' u_k'\right\rangle\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \left\langle u_j' u_k'\right\rangle\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)}_{P_{ij}\equiv\text{Produccion de esfuerzos}} - \underbrace{\rho\beta\left(g_i\left\langle u_j'\theta\right\rangle + g_j\left\langle u_i'\theta\right\rangle\right)}_{G_{ij}\equiv\text{Produccion debida a las fuerzas de flotacion}} \tag{13}$$

$$+ \underbrace{\left\langle P\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)\right\rangle}_{\phi_{i\,j}\equiv\text{Presion de deformacion}} - \underbrace{2\mu\left\langle\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}\right\rangle}_{\varepsilon_{ij}\equiv\text{Disipacion}} \underbrace{-2\rho\Omega_k\left(\left\langle u_j' u_m'\right\rangle\varepsilon_{ikm} + \left\langle u_i' u_m'\right\rangle\varepsilon_{jkm}\right)}_{f_{ij}\equiv\text{Termino de produccion por rotacion}}$$

De estos términos, en ésta ecuación, C_{ij}, $D_{L,ij}$, P_{ij} y F_{ij} no requieren de modelación, sin embargo $D_{T,ij}$, G_{ij}, Φ_{ij} necesitan ser modelados para cerrar las ecuaciones.

2.4.10.2. Modelado de la energía cinética turbulenta (k).

En general, cuando la energía cinética se necesita para modelar un término específico se obtiene al tomar la traza del tensor de esfuerzos de Reynolds como:

$$k = \frac{1}{2}\left\langle u_i' u_j'\right\rangle \tag{14}$$

Una opción disponible es resolver una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta con el fin de obtener las condiciones de frontera para los esfuerzos de Reynolds. En este caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{2}(P_{ii}+G_{ii})-\rho\varepsilon\left(1+2M_t^2\right)+S_k \qquad (15)$$

Donde σ_k =0.82 y S_k es un término definido por el usuario, el cual incluye, únicamente contribuciones debido a las fuerzas de cuerpo (gravedad). La ecuación anterior se puede obtener a partir de la contracción de la ecuación modelada para los esfuerzos de Reynolds y es similar a la usada por el modelo k-ε.

2.4.10.3. Modelado de la disipación de la energía cinética turbulenta (ε).

El tensor de disipación, ε_{ij}, se modela de acuerdo a:

$$\varepsilon_{ij}=\frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho\varepsilon+Y_M) \qquad (16)$$

Donde $Y_M=2\rho\varepsilon M_t^2$ es un término adicional de "dilatación de disipación" de acuerdo al modelo de Sarkar. La velocidad de disipación escalar ε se calcula con una ecuación de transporte similar a la usada en el modelo *k*-ε.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]C_{\varepsilon 1}\frac{1}{2}(P_{ii}+C_{\varepsilon 3}G_{ii})\frac{\varepsilon}{k}-C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon}{k}+S_k \qquad (17)$$

dónde σ_ε=1.0, $C_{1\varepsilon}$1.44, $C_{2\varepsilon}$=1.92, $C_{3\varepsilon}$ es evaluado como una función del flujo local relativa a la dirección del vector de fuerza gravitacional y S_k es un término fuente definido por el usuario.

2.5. Modelo Multifásico (VOF).

El modelo VOF emplea una técnica de rastreo diseñada para dos o más fases de fluidos inmiscibles, donde la posición de la interfase entre los fluidos es de interés. En el modelo se resuelve una sola ecuación de momento para los fluidos presentes

y para cada fase adicional agregada al modelo se introduce una variable más, es decir, las propiedades físicas de una nueva fase se calculan en base a su fracción correspondiente al volumen total. Los campos para todas las variables y propiedades se comparten por las fases y representan los valores promediados en volumen. La fracción de cada celda computacional se rastrea a lo largo del dominio para sumar la unidad. En notación matemática se puede decir que si la q-ésima fracción de volumen en la celda se denota por α_q, entonces las tres condiciones siguientes son posibles[48)].

$\alpha_q = 0 \rightarrow$ la celda está vacía (no está presente la q-ésima fase).
$\alpha_q = 1 \rightarrow$ la celda está llena (solo contiene la q-ésima fase).
$0 < \alpha_q < 1 \rightarrow$ la celda contiene la interfase entre la q-ésima fase y una o más fases diferentes.

2.5.1. Ecuación de la fracción de volumen.

La localización de la(s) interfase(s) entre las fases mismas se acompañan por la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una (o más) de las fases. Para la q-ésima fase, la ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \qquad (18)$$

La ecuación de fracción de volumen no se resolverá para la fase primaria, ya que la fracción se calcula basándose en:

$$\sum_{q=1} \alpha_q = 1 \qquad (19)$$

Las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte se determinan por la presencia de las fases componentes de cada volumen de control. Por ejemplo, para un sistema bifásico las fases se representan por los subíndices 1 y 2, y si la fracción de volumen de la segunda fase está siendo rastreada, la densidad en cada celda está dada por:

$$\rho=\alpha_2\rho_2+(1-\alpha_2)\rho_1$$
$$\mu=\alpha_2\mu_2+(1-\alpha_2)\mu_1 \qquad (20)$$

2.5.2. Ecuación de Momento.

De igual forma una sola ecuación de momento se resuelve a lo largo del dominio y el campo de velocidades resultante es compartido entre las fases. La ecuación de momento es dependiente de la fracción de volumen de cada fase, a través de las propiedades ρ y μ.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{v}\right)-\nabla\cdot\left(\rho\vec{v}\vec{v}\right)=-\nabla P+\nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla\vec{v}+\nabla\vec{v}^{T}\right)\right]+\rho\vec{g}+\vec{F} \qquad (21)$$

Donde los términos de la derecha son las fuerzas de presión sobre el fluido y las fuerzas viscosas, donde la viscosidad efectiva ($\mu_{eef} = \mu_L + \mu_T$) representa la suma de la viscosidad laminar y turbulenta en el fluido durante los esfuerzos de corte, el efecto de la fuerza de gravedad sobre el fluido y fuerzas de cuerpo son representadas por el vector $\vec{F}$ respectivamente. El término $\vec{V}^{T}$ es el vector de velocidad promediada en el tiempo.

2.5.3. Tensión Superficial.

La tensión superficial surge como resultado de las fuerzas de atracción entre las moléculas de un fluido. Es definida como la cantidad de energía libre de Gibbs a temperatura, presión y composición constante siendo necesaria para cambiar la superficie de un sistema dado. La tensión superficial actúa para balancear radialmente las fuerzas atractivas intermoleculares en el gradiente de presión externo en la superficie.

En regiones donde dos fluidos están separados, la tensión superficial actúa para minimizar la energía libre al reducir el área de la interfase. El modelo de tensión superficial empleado se conoce como Fuerza de Superficie Continua (CSF– Continuum Surface Force) propuesto por Brackbill. Con este modelo, la adición de

la tensión superficial al cálculo del modelo VOF resulta en un término fuente en la ecuación de momento.

Para entender el origen de éste término fuente, se puede considerar el caso donde la tensión es constante a lo largo de la superficie, y donde solo las fuerzas normales a la interfase son consideradas. Puede demostrarse que la caída de presión a lo largo de la superficie depende del coeficiente de tensión superficial (σ). La curvatura de la superficie se mide por dos radios en direcciones ortogonales R1 y R2.

$$P_2\text{-}P_1 = \sigma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) \tag{22}$$

dónde P_1 y P_2 son las presiones en los dos fluidos en cada lado de la interfase.

En el caso del modelo CSF la curvatura se calcula de los gradientes locales en la superficie normal a la interfase. Dejando que ***n*** sea la superficie normal, definida como el gradiente α_q de en la q-ésima fase.

$$n = \nabla \alpha_q \tag{23}$$

La curvatura k está definida en términos de la divergencia de la unidad normal $\hat{n}$:

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \tag{24}$$

Donde,

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \tag{25}$$

La tensión superficial puede escribirse en términos del salto de presión a lo largo de la superficie. La fuerza en la superficie se expresa como una fuerza de volumen usando el teorema de la divergencia.

Esto implica que esta fuerza de volumen que es el término fuente se añada a la ecuación de momento quedando en la forma final para el cálculo de la fuerza provocada por la tensión superficial.

$$F_{vol} = \sum_{ij,i<j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}\left(\rho_i + \rho_j\right)} \quad (26)$$

2.6. Simulación Física.

En la modelación física tanto el molde como la buza, a escala reducida o completa, se diseñan basándose en criterios de similitud, en el cual el flujo de metal liquido es simulado con agua. Si el flujo de agua en el modelo es una representación realística del flujo en el molde real, éste puede ser usado para estudiar varios aspectos del flujo en el molde, incluyendo:

1. Deformación de la superficie libre y turbulencia superficial,
2. Visualización del flujo en diferentes áreas del molde con el trazador,
3. Mediciones de la velocidad y la turbulencia en el líquido usando la técnica de hilo caliente o un instrumento de efecto Doppler,
4. Simulación del transporte y flotación de inclusiones,
5. Formación de vórticidades en la interfase metal-escoria y atrapamiento de escoria hacia el seno del metal liquido en el molde,
6. Disipación de energía, etc.

El estudio del comportamiento del molde de colada continúa de planchón delgado tipo embudo, se facilita a partir de la simulación física, utilizando modelos a base de agua, que cumplan y satisfagan las condiciones requeridas. Además, el modelo se construye con un material transparente, acrílico, para observar el comportamiento de los fluidos que participan durante el experimento. La teoría que sustenta el estudio de la simulación física del molde de colada continúa de planchón delgado tipo embudo, consiste en la revisión de:

1. Los criterios de similitud para la construcción de los modelos físicos.
2. Diseño de modelos con agua.

2.6.1 Criterios de Similitud.

Para conseguir similitud entre dos sistemas de flujo, las siguientes cuatro condiciones se deben de cumplir[37, 38]:

1. **Similitud Geométrica**. La relación de cualquier longitud en un sistema a la longitud correspondiente en el otro sistema es constante. Esta relación es conocida como el factor de escala λ.
2. **Similitud Cinemática.** El movimiento del fluido en un sistema es geométricamente similar al movimiento del fluido en el otro sistema.
3. **Similitud Dinámica.** La magnitud de las fuerzas correspondientes a situaciones en cada sistema debe mantener una relación fija.
4. **Similitud Térmica.** Los números adimensionales que involucran transferencia de calor deben ser los mismos en cada sistema.

La similitud cinemática entre el prototipo y el modelo es asegurada sí las similitudes geométricas y dinámicas son observadas. Las principales fuerzas a ser consideradas en la obtención de la similitud dinámica en un sistema de colada continua son la fuerza inercial, gravitacional, viscosa, y de tensión superficial. Los principales grupos adimensionales que involucran dichas fuerzas, son:

Numero de Froude = $\frac{V^2}{gL} = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas Gravitacionales}}$

Numero de Reynolds = $\frac{VL}{\nu} = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas Viscosas}}$

Numero de Weber = $\frac{\rho V^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas de Tensionsuperficial}}$

En la investigación del flujo de acero líquido, el agua es a menudo usada como el fluido modelador debido a que es fácil de obtener, fácil de manejar y, principalmente y sobre todas, su viscosidad cinemática, equiparable a la del acero líquido.

2.6.2. Criterios de Similitud Número de Reynolds y Froude.

El número de Reynolds, Re, está dado por [37]:

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} \tag{27}$$

El número de Froude, Fr, está dado por:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \tag{28}$$

La similitud de Reynolds entre un modelo (m) y un prototipo (p) implica que:

$$\left(\frac{VL\rho}{\mu}\right)_m = \left(\frac{VL\rho}{\mu}\right)_p \tag{29}$$

Ya que la viscosidad cinemática del agua (μ/ρ) a temperatura ambiente y la del acero líquido a 1600ºC es casi la misma (dentro del 10%), puede ser demostrado que

$$V_m \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) V_p$$

(30)

dónde λ es el factor de escala, y es dado por

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} \tag{31}$$

Similarmente, la similitud de Froude entre un modelo y un prototipo nos da:

$$V_m = \left(\sqrt{\lambda}\right) V_p$$

(32)

El número de Reynolds es la relación de las fuerzas inerciales y viscosas que actúan sobre el fluido. Las fuerzas inerciales dan un aumento al flujo convectivo o transferencia de momento convectiva, y las fuerzas viscosas causan transferencia de momento viscosa o difusiva. En flujo laminar, la viscosidad molecular del fluido causa el intercambio entre capas adyacentes de fluido y da como resultado la transferencia de momento difusiva. Sin embargo, el flujo de fluidos dentro del molde es generalmente turbulento. En flujos turbulentos, la transferencia de momento difusiva no es solamente debida al intercambio de moléculas sino también debido al intercambio de vórtices sobre distancias relativamente grandes (comparado a la distancia molecular media libre), conocida como longitud de vórtice. En tal flujo la contribución de la transferencia de momento difusiva debida al intercambio de vórtices puede ser en órdenes de magnitud mayor que la contribución debido al intercambio molecular causado por la viscosidad molecular.

Así, la viscosidad turbulenta es responsable de la transferencia de momento debido al intercambio de vórtices de la misma manera que la viscosidad molecular causa la transferencia de momento debido al intercambio de moléculas. El término de viscosidad efectiva se refiere a la suma de las viscosidades molecular y turbulenta. Es importante señalar que la viscosidad molecular es una propiedad del fluido, mientras que la viscosidad turbulenta depende del flujo. En el flujo turbulento, la transferencia de momento depende de la viscosidad efectiva y no de la viscosidad molecular. Por lo tanto, la similitud del número de Reynolds es muy importante en flujo laminar, pero pierde importancia en la modelación de un flujo turbulento.

La importancia y validez de esos criterios puede ser examinada considerando las fuerzas relevantes que actúan dentro de un sistema de molde modelo con flujo isotérmico. Las fuerzas involucradas son inerciales, viscosas y gravitacionales. El número de Froude, es la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales, es importante cuando ambas fuerzas están actuando sobre el líquido. Cuando el agua en el modelo del molde de colada de planchón delgado tipo embudo es isotérmico y altamente turbulento, la fuerza gravitacional afecta el flujo del fluido. Así, el uso

del número de Froude como criterio de similitud es necesario para la modelación del flujo del al interior del molde.

2.6.3. Desarrollo De Modelos Con Agua.

Se considera que las fuerzas que actúan en el molde son gravitacionales[36, 39] por lo que el número estándar de Froude puede satisfacerse a cualquier escala en un modelo con agua, siempre y cuando todas las medidas de los orificios utilizados y las alturas hidráulicas en el sistema fueran variadas de acuerdo con un solo parámetro de escala, esto debido a que la viscosidad cinemática del acero a temperatura de proceso (1600 ^{0}C) y del agua, son prácticamente iguales, ver Tabla II-I:

Tabla II-I: Propiedades físicas del agua a y del acero.

PROPIEDAD	AGUA (25°C)	ACERO (1600 ^{0} C)
Viscosidad (kg/ms)	0.001	0.0064
Densidad (kg/m^3)	998	7014
Viscosidad cinemática (m^2 /s)	1x10^{-6}	0.913x10^{-6}
Tensión superficial (N/m)	0.073	1.6

Para un flujo gravitatorio, el número de Froude puede ser mantenido sí todas las dimensiones (incluyendo tamaños de recipientes, secciones transversales de orificios y alturas hidráulicas) son escaladas de acuerdo a un solo parámetro de escala. En resumen, se desarrollaron un cierto número de relaciones, siendo éstas:

Factor De Longitud $$\frac{L_m}{L_p}=\lambda \quad (33)$$

Factor Velocidad $$\frac{V_m}{V_p}=\sqrt{\lambda} \quad (34)$$

Factor De Flujo Cinemático $$\frac{Q_m^0}{Q_p^0} = \lambda^{2.5} \quad (35)$$

Factor De Tiempo $$\frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\lambda} \quad (36)$$

Dada la dificultad que presenta la observación del flujo del acero líquido directamente, el modelado físico, ha sido una herramienta utilizada para estudiar los fenómenos que ocurren en diferentes procesos siderúrgicos.

CAPITULO III

3. SIMULACIÓN MATEMÁTICA EN INGENIERÍA.

La modelación tradicional en ingeniería está fuertemente basada en modelos empíricos o semi-empíricos. Estos modelos a menudo trabajan muy bien para operaciones unitarias bien conocidas, pero no son confiables para condiciones de procesos nuevos. El desarrollo de nuevos equipos y procesos es independiente de la experiencia de expertos y el escalado de laboratorio a escala industrial es muy difícil y consume demasiado tiempo. El nuevo diseño de ecuaciones y nuevos parámetros en los modelos existentes deben ser determinados cuando modifican el equipo o las condiciones de salida del proceso se validan con la base de datos experimental. Por lo que, la nueva tendencia es que los ingenieros están haciendo cada vez más uso de paquetes de dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar el flujo y el funcionamiento en el diseño de nuevos equipos o procesos.

3.1. Metodología de la Simulación Matemática.

Los códigos CFD son estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden hacer frente a problemas de flujo de fluidos. Además de proporcionar un fácil acceso a su poder resolutivo, todos los paquetes comerciales de CFD incluyen interfaces de usuario para ingresar los parámetros del problema y examinar los resultados. Así, en la gran mayoría de los casos los códigos contienen tres elementos principales:

i. Pre-procesador.
ii. Procesador.
iii. Post-procesador.

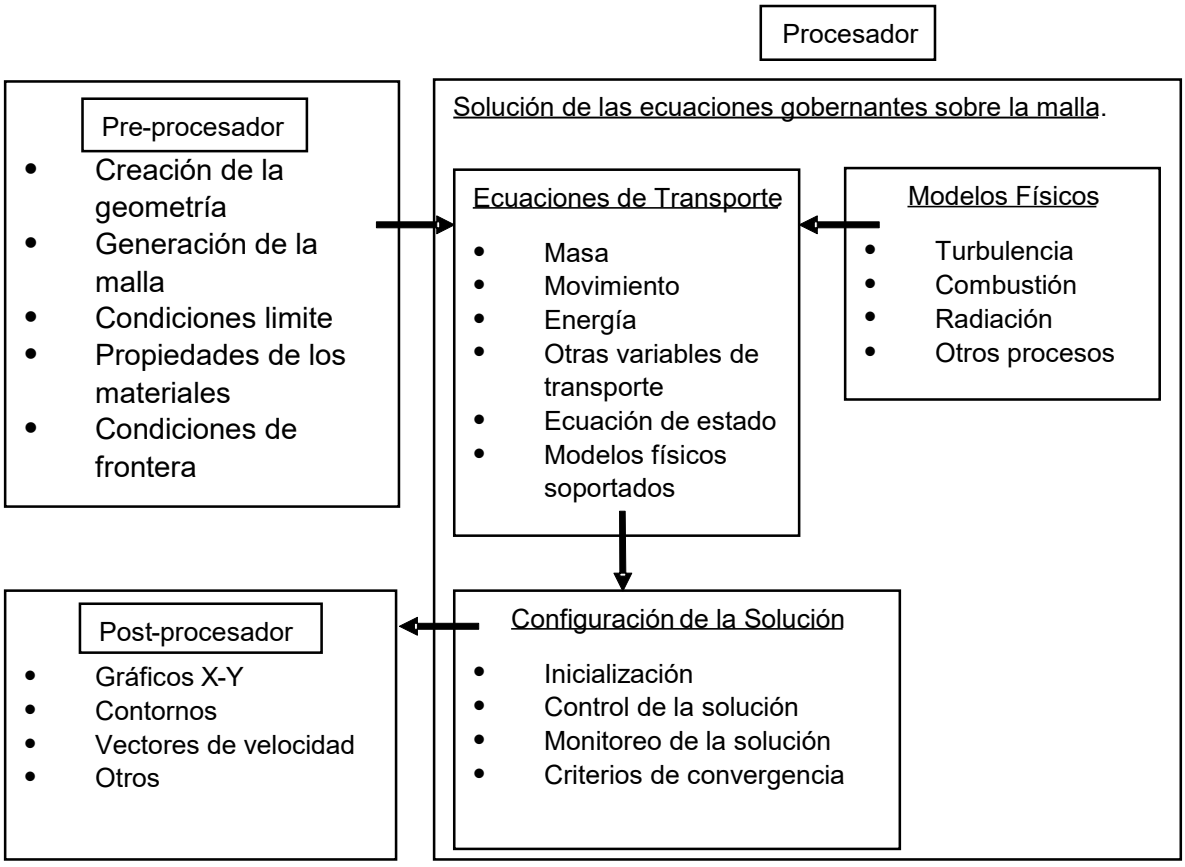

Figura 3.1. Diagrama de los pasos en las simulaciones con software para dinámica de fluidos computacional (CFD).

La Fig. 3.1 representa un marco de referencia que ilustra la interconectividad de los tres, antes citados, elementos dentro del análisis CFD.

Estudios previos de la dinámica de flujo en el molde proponen que la combinación de los modelos de esfuerzos de Reynolds (RSM)[16, 50-53] y el modelo de volumen de fluido (VOF)[15] son una excelente aproximación para simular sistemas de fases múltiples, por ejemplo, un modelo con agua que requiere la consideración de la interfase agua-aire. Es por ello que en el presente trabajo las simulaciones se llevaran a cabo considerando dichos modelos; para los cuales se requerirá la siguiente metodología para los diferentes casos a simular (Tabla III-I)

Tabla III-I. Casos a simular, modelado matemático.

	Ancho de Molde(m)	Profundidad de Buza(m)	Espesor del Molde(m)	Buza
Caso 1	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Original
Caso 2	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada I
Caso 3	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada II
Caso 4	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada III

3.1.1. Pre-procesamiento.

El pre-procesamiento consiste en la entrada de un problema de flujo a un programa de CFD por medio de una interfase gráfica amigable y la subsecuente transformación de esta entrada en una forma apropiada para ser usada por el procesador. Las actividades para el usuario en la etapa del pre-procesamiento incluyen:

a) Definición de la geometría de la región de interés: el dominio computacional.

Las cuatro geometrías tridimensionales del sistema buza-molde fueron dibujadas a escala 1:1 mediante el uso del software de diseño (GAMBIT). El dominio computacional generado se compone de los volúmenes de las regiones fluidas del sistema buza-molde. La Fig. 3.2 muestra los cuatro modelos virtuales de los cuales los del inciso f), g) y h) son modificaciones hechas a partir de la buza original inciso e) para las cuales se muestran las dimensiones de la punta de ésta, zona en la cual se realizó la modificación en 3D.

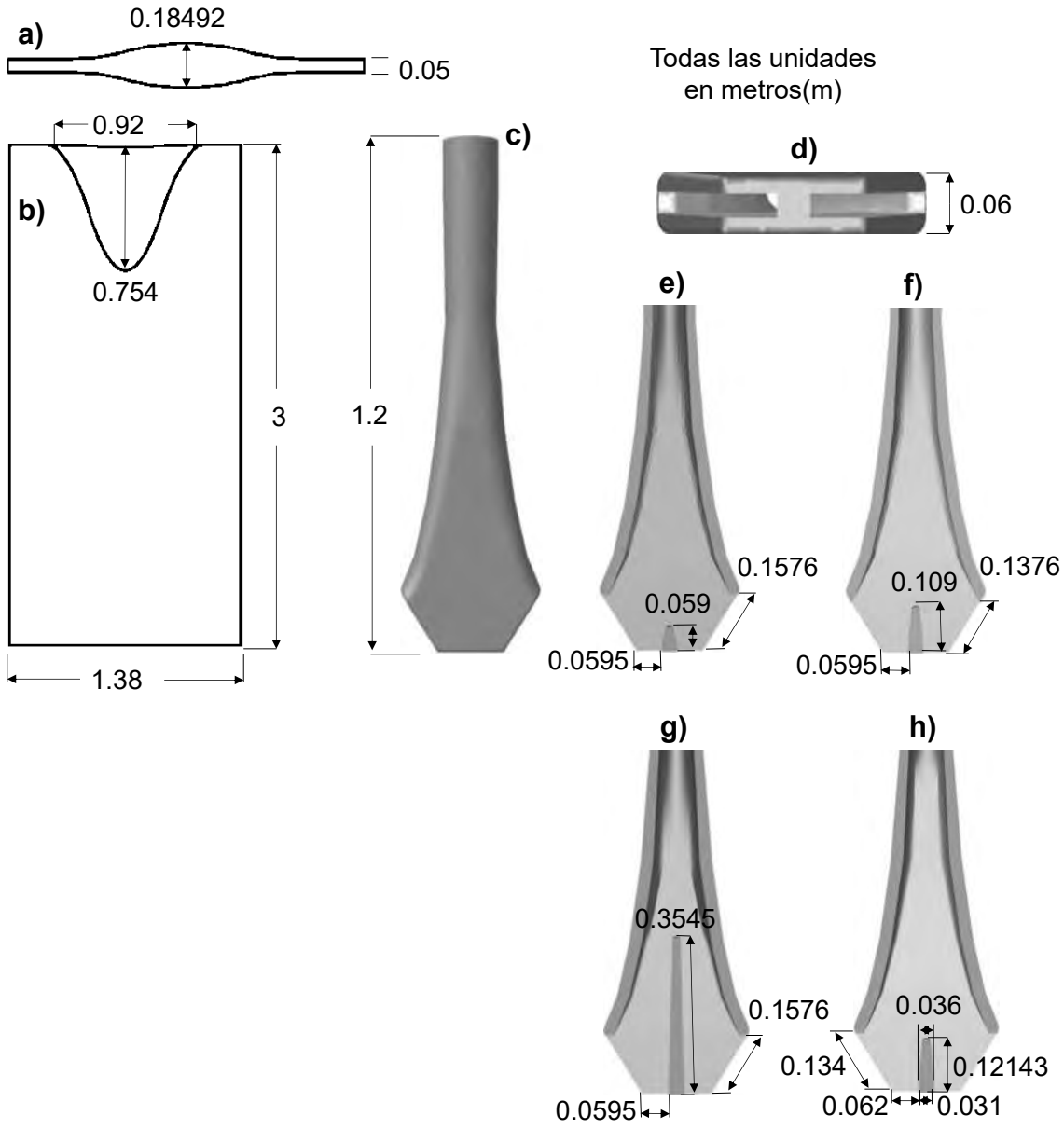

Figura 3.2. Esquema de las geometrías para a)-b) el molde planchón delgado tipo embudo, c)-d) la buza (SEN), e) interna de la buza original (SEN), f) interna de la buza modificada I (SEN), g) interna de la buza modificada II (SEN) y h) interna de la buza modificada III (SEN).

b) Generación de la malla. Subdivisión del dominio en un número de pequeños sub-dominios: una malla de celdas y volúmenes de control o elementos.

El dominio computacional fue discretizado en una malla, no estructurada, constituida por aproximadamente 1,573,692 celdas tetraédricas-híbridas (336,716

nodos) como se muestra en la Fig. 3.3. Se ha reportado[54] que para este tipo de moldes la utilización de una malla con un número de celdas mayor a 700,000 da resultados confiables y precisos. Por lo que, es importante mencionar que la generación de la malla es un paso crítico en la simulación matemática, puesto que del tamaño y la calidad de la malla dependerán en gran medida los resultados obtenidos, así como el tiempo real de procesamiento requerido para la obtención de los mismos.[20]

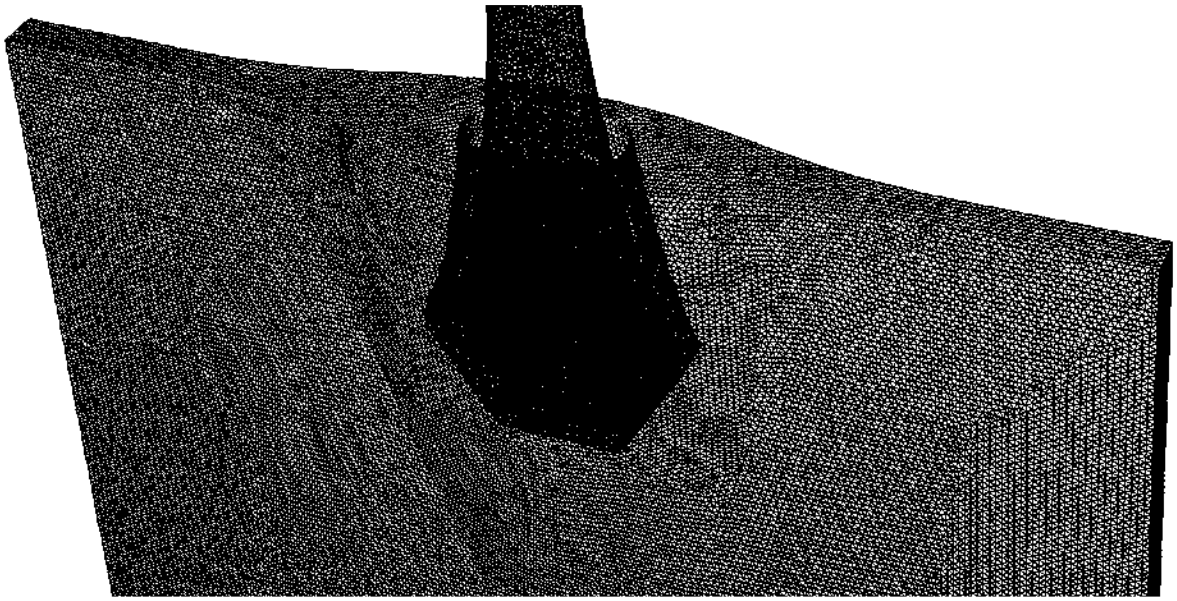

Figura 3.3. Malla del modelo virtual tridimensional a escala 1:1.

c) Establecimiento de las condiciones limite e iniciales en las celdas, las cuales coinciden con, o tocan, el dominio límite.

Una vez que es exportada la malla se establecen las condiciones límite de cada una de las caras de nuestro volumen de estudio, las cuales incluyen velocidad de entrada, velocidad de salida, entrada de presión y condiciones de pared. También se especifica el medio continuo, que en éste caso es únicamente fluido (agua y aire).

Posteriormente se definen y asignan las condiciones iniciales para las velocidades de entrada y salida del fluido. La velocidad de salida está definida directamente por la velocidad de colada en particular de cada simulación considerada, mientras que la velocidad en la entrada de la buza es calculada mediante la ecuación 37. Para las paredes sólidas se empleó la condición de no deslizamiento, típica de un flujo

confinado y por esta razón FLUENT la asigna por default. Esta condición de pared se aplicó tanto a las paredes de la buza y a las caras anchas y estrechas del molde.

$$V=\frac{Q}{A} \tag{37}$$

Donde V es la velocidad del flujo, Q es el flujo volumétrico y A es el área de salida o entrada. Ecuación con la cual se obtuvieron las velocidades tanto en la buza como en el molde, lo cual, puede ser visto en la Tabla III-II.

Tabla III-II. Velocidades de colada utilizadas en la simulación matemática a ambas profundidades de inmersión de buza.

Velocidad de colada.	**Inmersión de Buza (cm)**	**Velocidad en el Molde (m/s)**	**Velocidad en la Buza (m/s)**
4m/min	22 y 34	0.067	0.90
5m/min	22 y 34	0.083	1.12
6m/min	22 y 34	0.1	1.35
7m/min	22 y 34	0.12	1.57
8m/min	22 y 34	0.13	1.79

d) Selección de los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser modelados.

Se seleccionó un esquema de solución segregado, con formulación implícita y en estado no estacionario. A la par se seleccionó el modelo multifásico (VOF) Volumen de Fluido, mediante el cual, se definieron las fases correspondientes al agua y al aire. Para el modelo de turbulencia se seleccionó inicialmente el modelo k-ε estándar para obtener una solución preliminar y estable y posteriormente se activó el modelo RSM para llegar a la solución final. Esta acción se hace para minimizar el gasto o tiempo computacional.

e) Definición de las propiedades de los fluidos.

Las propiedades de los fluidos usados en la simulación se muestran en la Tabla III-III. Con respecto a las condiciones de operación, éstas se asignaron tomando en consideración las condiciones de operación reales, es decir, a nivel industrial durante la operación de una máquina de colada de planchón delgado.

Tabla III-III. Propiedades de las fases involucradas en la simulación.

Fase	Propiedad	Valor
Aire	Densidad	1.225(kg/m^3)
	Viscosidad	1.7894e^{-5}(kg/ms)
Agua	Densidad	1000(kg/m^3)
	Viscosidad	0.001003(kg/ms)
Aire-Agua	Tensión Superficial	0.075(N/m)

El algoritmo de solución empleado para la presión, en todas las simulaciones matemáticas, fue el PISO por sus siglas en inglés (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), la convergencia computacional es obtenida siempre y cuando los valores de los residuales de las variables de salida alcanzan valores por debajo de 1x10^{-5}. Esto brinda la seguridad de que los cálculos computacionales alcanzaran un alto grado de exactitud.

Toda la simulación matemática se realizó en tres computadoras con dos procesadores Xeon de cuatro núcleos a 2.4 GHz con 16 GB de memoria en RAM. La simulación se realizó haciendo uso del paquete comercial de CFD FLUENT versión 6.3.26, así como el pre-procesador GAMBIT versión 2.4.6.

3.1.2. Procesamiento.

Durante ésta etapa se desarrolla la fase de cómputo para la resolución de las ecuaciones. Lo único que se requiere es: asignar el tamaño de paso para la marcha en el tiempo, asignándose un valor de 0.001 segundos. Se define el número de pasos, inicialmente 360,000, número máximo de iteraciones, 100. Por último, se inicializa el proceso de iteraciones. Se monitorean los valores de los residuales, que irán disminuyendo gradualmente a cada iteración hasta que después de un tiempo considerable alcanzarán y mantendrán la convergencia.

Una vez transcurridos 53 segundos reales de simulación matemática empleando el modelo k-ε, se cambia a el modelo de turbulencia asignando, el modelo RSM y se define un número de pasos, 307,000. Esta etapa se lleva alrededor 360 segundos reales de simulación matemática Tabla III-IV.

Tabla III-IV. Equivalencias del procesamiento, para los diferentes modelos de turbulencia.

Modelo	k-ε	RSM
Tiempo(s)	**53**	**360**

3.1.3. Post-procesamiento.

El primer objetivo en el post-procesamiento es analizar la calidad de la solución. En esta etapa se utilizó la interfase gráfica de FLUENT la cual permite presentar los resultados obtenidos mediante una serie de gráficas, curvas, bases de datos y de videos. Con ésta se conoce, con alto grado de exactitud, el comportamiento del flujo de fluido en el interior del modelo.

3.2. Condiciones de la Simulación Matemática.

I. Todas las simulaciones se realizaron en estado no-estacionario.
II. Se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas en la construcción del modelo tridimensional y para la resolución de las ecuaciones de estado.
III. El fluido dentro del molde de colada se comporta como un fluido Newtoniano.
IV. Se considera al fluido como incompresible, por lo tanto, la densidad es constante.
V. Dentro del molde existen escalas de turbulencia que varían en función del tiempo, por lo cual se considerará al flujo dentro del mismo como completamente turbulento.
VI. Estado isotérmico. Esta consideración implica que no existen cambios de temperatura y que por ende las propiedades termo-físicas del fluido se consideraron constantes.
VII. No se considerará el efecto de la oscilación del molde.
VIII. En todas las paredes se toma la condición frontera de no deslizamiento del flujo. El no deslizamiento establece que el fluido en las paredes tiene la misma velocidad que éstas. Por lo tanto, si la pared es fija tiene una velocidad igual a cero y el fluido en ella también.

IX. La entrada y salidas del flujo en el molde se definieron como entrada de velocidad. Para ello, la velocidad de entrada ó salida del flujo en el área de su correspondiente buza es calculada por medio de la ecuación (37).

La velocidad del fluido a utilizar se muestra en la Tabla III-II. Donde V es la velocidad del fluido, Q es el flujo volumétrico y A es el área de salida o entrada.

X. El fluido que se utiliza para todos los casos es el sistema aire-agua, sus propiedades se muestran en la Tabla III-III.

XI. Las fuerzas gravitacionales solamente actúan sobre el eje Y.

XII. No se considera la presencia de escoria por lo que para simular la superficie libre del líquido se utiliza el modelo VOF.

XIII. Los parámetros que se considerarán como constantes durante la simulación numérica son las dimensiones del molde.

XIV. Las variables a simular son: velocidad de colada, diseño e inmersión de la buza (Tabla III-V).

Tabla III-V. Variables utilizadas para cada una de las diferentes buzas a ambas profundidades de inmersión de buza.

	Ancho de Molde (m)	**Profundidad de Buza (m)**	**Espesor del Molde (m)**	**Buza**	**Velocidad de Colada(m/min)**
Caso 1	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Original	4, 6 y 8
Caso 2	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada I	4, 6 y 8
Caso 3	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada II	4, 6 y 8
Caso 4	1.38	0.22 y 0.34	0.05	Modificada III	4, 6 y 8

CAPITULO IV

4. MODELADO FISICO.

El desarrollo de la parte experimental se llevó a cabo en varias etapas, siendo las principales; diseño y construcción del modelo, diseño e implementación del sistema de monitoreo y la conversión de señales de analógico a digital.

4.1. Diseño y Construcción del Modelo.

Para estudiar el comportamiento del flujo se fabricó un modelo físico a ½ del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo en acrílico transparente de 10 mm de espesor y una buza sumergida de geometría compleja, la cual se fabricó en resina de alta densidad, respetando los espesores del refractario de la buza original. El molde fue diseñado para trabajar con una velocidad de colada de hasta 8m/min lo cual equivaldría en agua a 84.34 litros/min. En la Fig.4.1 se muestran las dimensiones tanto de la buza como del molde.

Dicho modelo se montó en un recipiente, construido en acrílico de 12mm de espesor, el cual recibe el agua proveniente del modelo del molde. En la Fig. 4.2 se muestran sus dimensiones.

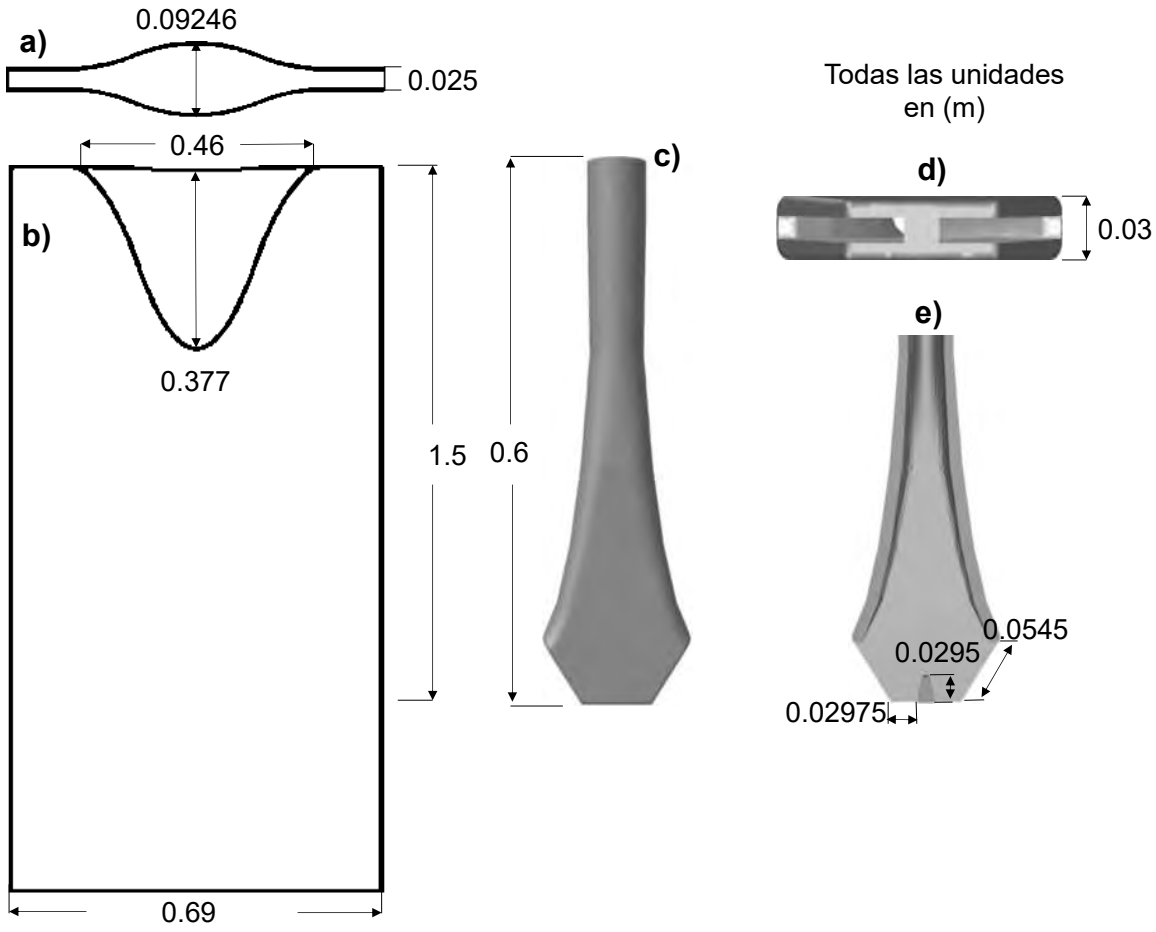

Figura 4.1. Esquema de la geometría del molde para la modelación física: a)-b) molde de planchón delgado tipo embudo, c)-d) la buza (SEN) y e) geometría interna de la punta de la buza.

Dicho modelo se montó en un recipiente, construido en acrílico de 12mm de espesor, el cual recibe el agua proveniente del modelo del molde. En la Fig. 4.2 se muestran sus dimensiones.

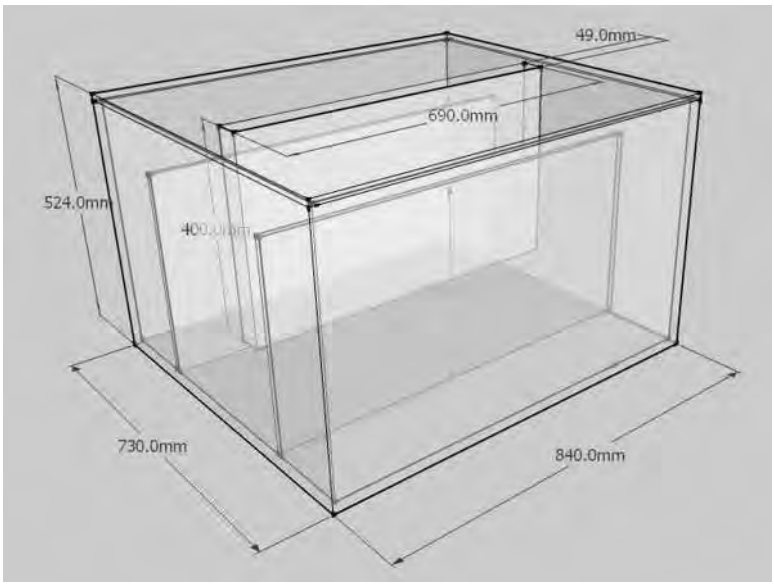

Figura 4.2. Esquema del recipiente receptor del agua proveniente del molde.

La instalación hidráulica, Fig. 4.3, se hizo con tubo de PVC de una pulgada de diámetro para alimentar agua constantemente al molde a través de la buza. Para controlar el flujo de agua al molde se usó un rotámetro para medir de caudal en tuberías de área variable y de caída de presión constante. El fluido entra por la parte inferior del rotámetro haciendo que el flotador suba hasta que el área anular entre él y la pared del tubo sea tal, que la caída de presión de este estrechamiento sea lo suficientemente para equilibrar el peso del flotador. El tubo es de plástico y lleva grabado una escala lineal, sobre la cual la posición del flotador indica el gasto o caudal. En la Fig.4.4 se muestra el rotámetro que se utilizó durante la experimentación, éste puede manejar flujos de hasta de 155 l/min. Para calibrar el flujo de agua entrante y saliente al molde se utilizaron dos válvulas de globo la cuales fueron previamente calibradas.

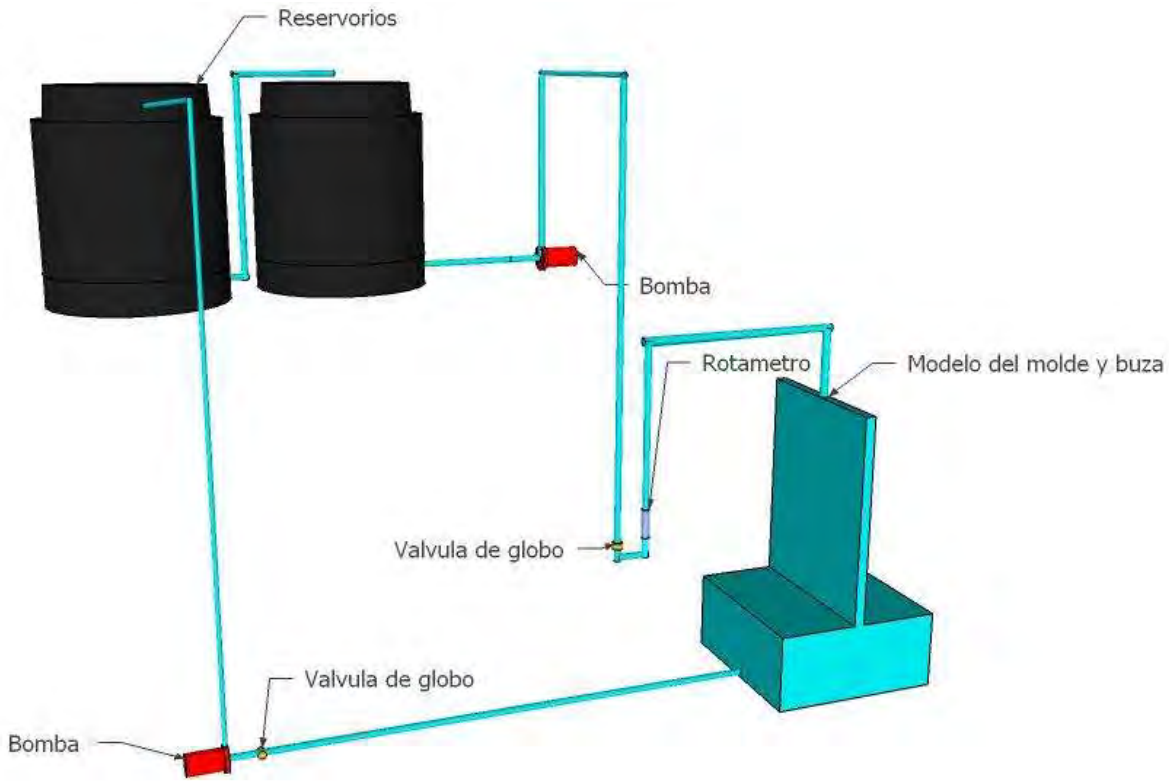

Figura 4.3. Diagrama de la instalación hidráulica del modelo físico del molde y la buza.

Figura 4.4. Fotografía del rotámetro utilizado.

La razón por la cual se utiliza acrílico transparente es para poder observar la fenomenología que sucede al interior del molde y la buza, y así poder caracterizar los patrones de flujo.

4.2. Sistema de Conversión de Señales de Analógico a Digital.

El sistema de medición, monitoreo y digitalización de las señales está constituido por los siguientes componentes:

- Acelerómetro.
- Cámara de video
- Software para el monitoreo y tratamiento de las señales, LabVIEW™ 11.0.
- Computadora personal.

4.3. Instrumentación del Equipo.

Con el fin de conocer el comportamiento de la dinámica de fluidos al interior del molde en el presente trabajo se utilizó el siguiente dispositivo para medir aceleración o niveles de vibración en éste y que permitirá caracterizar el sistema buza-molde de una mejor manera.

4.3.1. Vibraciones (Acelerómetro).

Una de las principales razones del uso de un instrumento como éste es debido a que en ningún trabajo previo ha sido reportada la medición de la cantidad de energía que impacta la pared delgada del molde, ya que dicho impacto genera vibraciones siendo éstas proporcionales a la energía liberada en dichas paredes. Esto puede correlacionarse con, por ejemplo, la evolución de la pared solidificada, las oscilaciones al interior del molde que repercuten en varias de las variables operativas del molde, etc. El instrumento se posiciona en diferentes puntos a lo largo de una de las paredes del molde como será discutido posteriormente.

El acelerómetro que fue utilizado en la presente investigación, se muestra en la Fig.4.5, teniendo las siguientes características, Tabla IV-I:

Tabla IV-I. Especificaciones del acelerómetro de cuarzo modelo PCB-482A.

Sensibilidad	**1014 mV/g**
Resolución	0.0005 g
Rango de Frecuencia	2.5 a 3000 Hz
Frecuencia Resonante	31 Hz
Recuperación de sobrecarga	10 seg.
Tendencia de salida	10 Volts
Rango de Temperatura	-54 a 80°C
Vibración, máxima	**100 ± g**

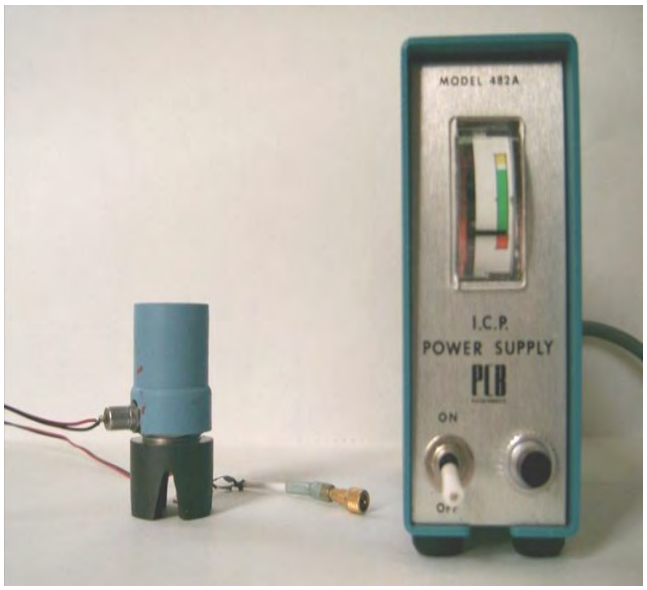

Figura 4.5. Acelerómetro y unidad de suministro de energía[49)].

4.4. Software para la Digitalización y Tratamiento de las Señales Analógicas.

El software utilizado para la conversión de las señales de analógico a digital y el procesamiento de dichas señales es conocido como lenguaje G (Graphic), mejor conocido comercialmente como LabVIEW®. Este es un software de programación gráfico basado en el concepto de instrumentación virtual bajo el ambiente del sistema operativo Windows.

4.5. Metodología, Fase de la Simulación Física.

a. Para observar los patrones de flujo que se desarrollan al interior del molde, se inyectó un colorante por encima de la entrada de la buza, para este fin se utilizó permanganato de potasio ($KMnO_4$), el cual, fue diluido en agua previamente. Para registrar el flujo del trazador en el interior del molde se utilizó una cámara de video, con la cual, se filmó el tiempo que duró el experimento. Posteriormente se editaron los videos para comparar el comportamiento de la buza original a las dos profundidades de inmersión de buza con los resultados obtenidos mediante la simulación matemática para los mismos casos, Tabla IV-II.

Tabla IV-II. Desarrolló experimental de la simulación física.

Buza	**Profundidad de buza(m)**		**Físico**		**Velocidad de colada(m/min)**
Original	**Físico**	**Matemático**	**Trazador**	**Vibraciones Video**	**4, 5, 6 y 7**
	0.11 **0.17**	**0.22** **0.34**			

b. Se escribieron dos programas, escritos en lenguaje de programación G, LabVIEW para la etapa experimental, es decir, la fase de modelado físico. El primer programa es el dedicado a la fase de conversión de señales del acelerómetro, de analógico a digital. Además, en este mismo programa, se hace un pre-procesamiento que consiste en homogenizar la señal en el rango positivo, para luego ser normalizada e integrada para un determinado paso de tiempo. Posteriormente se calcula el área bajo la curva de ésta señal, para a continuación guardar los datos ya procesados en archivos tipo ASCII, Fig. 4.6 Dependiendo de las condiciones reinantes en el molde, causadas por la velocidad de colada, así será la magnitud de las vibraciones. En el segundo programa, Fig. 4.7, se leen los archivos de las señales procesadas para cada una de las condiciones de velocidad de colada e inmersión de buza. El ruido de las señales, es decir, la vibración natural del equipo y entorno, generado en cada una de estas condiciones, es eliminando de la señal una vez que ésta ha sido ya normalizada.

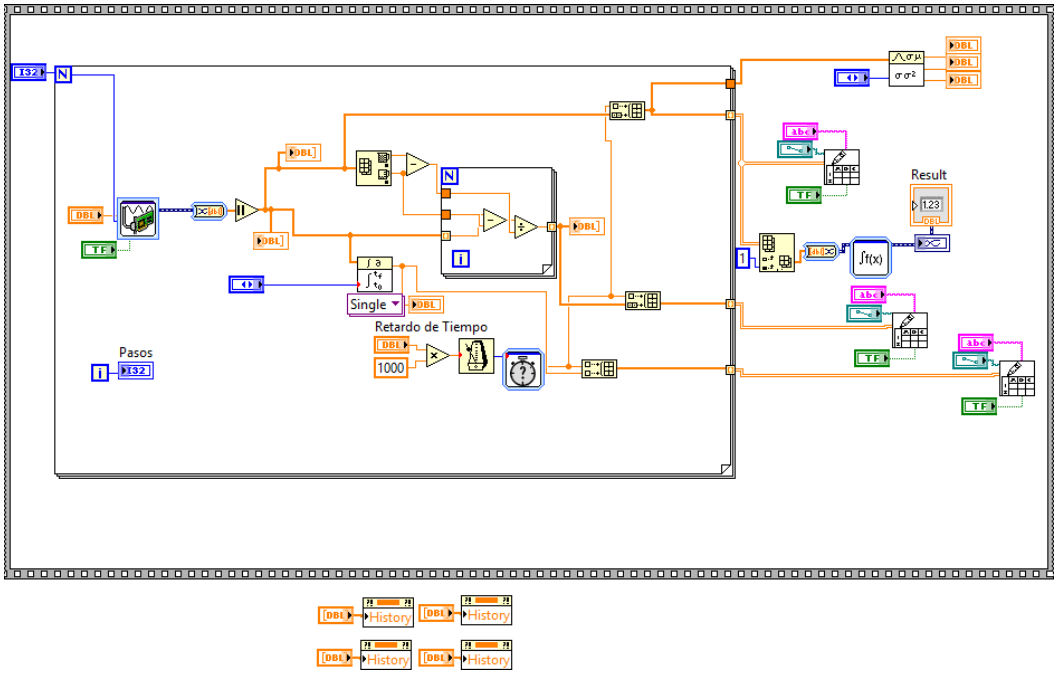

Figura 4.6. Diagrama del programa escrito tanto para la digitalización de la señal obtenida con el acelerómetro como del tratamiento de los datos.

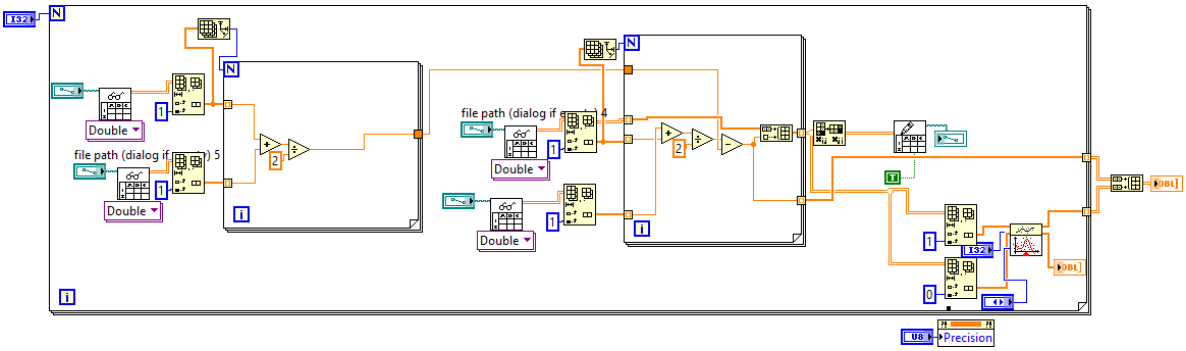

Figura 4.7. Diagrama del programa escrito para eliminar el ruido de los datos normalizados para las distintas posiciones del acelerómetro, velocidades de colada e inmersión de buza.

c. Para medir la cantidad de energía proveniente de los chorros de los puertos de la buza que impacta la pared delgada del molde se utilizó un acelerómetro, el cual fue colocado sobre una de las paredes delgadas externas del molde, para monitorear cuatro puntos, Fig. 4.8. Estos fueron elegidos de acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación matemática que mostraron los puntos donde hay una mayor, aparente, disipación de energía y para poder validar esa parte de la simulación matemática se usó este transductor.

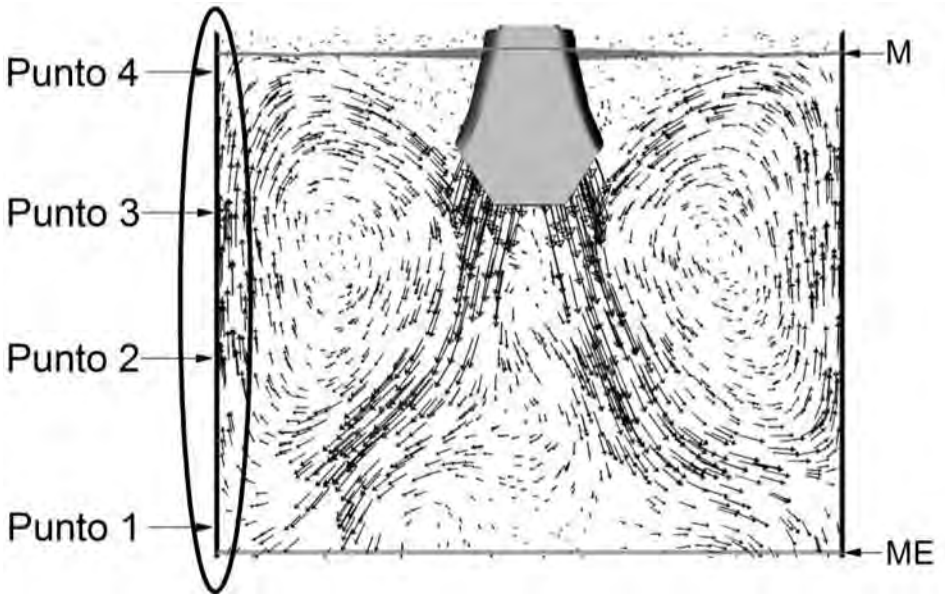

Figura 4.8. Lugares donde el acelerómetro fue colocado.

d. Las posiciones en las cuales fue colocado el acelerómetro para ser monitoreados tanto la intensidad de las vibraciones en el modelo físico, a una escala de ½, como la disipación de la energía cinética turbulenta para el modelo matemático a una escala de 1:1 se muestran en la Tabla IV-III. donde además se muestran las alturas del menisco y del molde.

Tabla IV-III. Posiciones del transductor en la pared delgada del molde de acuerdo a la escala usada para la simulación física 1: ½ y la modelación matemática 1:1.

Posición del Transductor	**Simulación Física(m)**	**Simulación Matemática(m)**
M (Menisco)	0.03	0.06
Punto 4 (P4)	0.12	0.24
Punto 3 (P3)	0.3	0.6
Punto 2 (P2)	0.38	0.76
Punto 1 (P1)	0.55	1.1
ME (Fin del Molde)	0.6	1.2

e. Las simulaciones se llevaron a cabo bajo las siguientes velocidades de colada, Tabla IV-IV. Estos valores de velocidades de colada se basaron en la escala de longitud, flujo, velocidad y tiempo elegida para la construcción del modelo.

Tabla IV-IV. Parámetros a utilizar en la simulación.

Velocidad (m/min)	**Flujo (litros/min)**
4	49
5	61.2
6	73.4
7	85.6

CAPITULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los resultados obtenidos, tanto de la simulación matemática como de la simulación física serán analizados en ésta sección de la tesis. Para ello se abordará de la siguiente manera:

1. Análisis de los efectos de la geometría interna de la buza, tanto de los patrones de flujo obtenidos al interior del molde, así como en el entendimiento del efecto de éstos sobre la calidad del acero colado.
2. Validación de los resultados obtenidos con la simulación matemática, haciendo uso de los vectores de velocidad con los resultados obtenidos a partir de la inyección de un colorante en el modelo físico obtenidos para tres diferentes tiempos y para velocidades de colada de 4, 5, 6 y 7 m/min y profundidades de inmersión de buza de 22 y 34 cm modelo matemático, modelo físico 11 y 17 cm, respectivamente.
3. Análisis de los resultados obtenidos con el acelerómetro, el cual fue colocado sobre una de las paredes delgadas del molde. Resultados que fueron validados con cálculos de la disipación de la energía cinética turbulenta sobre dichas medidas en la fase del modelado matemático.

5.1. Efecto de la Geometría Interna de la Buza Sobre los Fenómenos de Flujo de Fluidos Presentados al Interior del Molde.

En trabajos previos se ha sugerido que la formación de Distorsiones Dinámicas (DD) en moldes para planchón delgado es una consecuencia del desequilibrio en el balance de la energía cinética turbulenta y su producción, principalmente en la zona ubicada en la parte inferior de la buza. En estos trabajos se realizó un análisis de cómo se lleva a cabo la DD y se ha dejado planteado la hipótesis antes mencionada, la cual permanece aún sin comprobación. Sin embargo, en el presente trabajo de investigación se plantea que el inicio de la DD se inicia desde el interior de la buza, puesto que es ésta la que debe entregar el flujo en cada puerto de una manera equilibrada. Por lo tanto, se plantea la hipótesis que una alimentación con

fluctuaciones en la alimentación, en cada puerto, favorecerá la formación de las DD con diferentes intensidades.

Para llevar a cabo la comprobación de esta hipótesis, se seleccionó una buza cuya operación fuera estable, se experimentó con dos diferentes profundidades de inmersión y con diferentes velocidades de colada con las que la formación de DD son muy probables. La Fig. 5.1 muestra los perfiles de velocidad calculados al centro del molde en un plano longitudinal, para las 5 velocidades de colada seleccionadas a 22cm de inmersión. Los patrones de flujo son característicos para este tipo de molde, mostrando la formación de una gran recirculación a cada lado de la buza y zonas de baja velocidad en las posiciones de: las esquinas en la parte superior del molde, en las cercanías a la buza y en la zona por debajo de la buza entre los dos chorros. La Fig. 5.1 a) muestra que la estabilidad de los chorros a una velocidad de 4 m/min es muy buena, pero conforme se incrementa la velocidad de colada los chorros muestran una variación en su patrón de flujo.

Esta variación se observa en que el chorro izquierdo (marcado con el numero ①) presenta una penetración más intensa que el derecho. Esta variación inicia a una velocidad de 5 m/min y se mantiene hasta la velocidad máxima de 8 m/min. Cuando la buza es colocada en la inmersión de 34cm, Fig. 5.2, se observa el típico patrón de flujos de planchón delgado a una velocidad de 4 y 5 m/min; sin embargo, conforme se incrementa la velocidad de colada se observa que los chorros comienzan a oscilar, pero ahora es el chorro izquierdo el que se presenta mayor desviación (Figs. 5.2 c) y 5.2 d), punto ①) y en algunas ocasiones el derecho (Fig. 5.2 e) punto②).

A diferencia de a una menor inmersión, las oscilaciones de los chorros ahora son más evidentes. La variación en la inmersión de los chorros es más fácilmente observada y cuantificada considerando el punto de impacto de los mismos sobre la cara angosta del molde. Para poder observar esta variación, se trazó una línea a lo largo del molde en cada una de las caras angostas, donde se determinaron las velocidades del acero para 22 y 34cm de inmersión de buza, Figs. 5.3 y 5.4

respectivamente. Estas figuras nos muestran como el punto de impacto de los chorros está variando en cada cara como se esperaba.

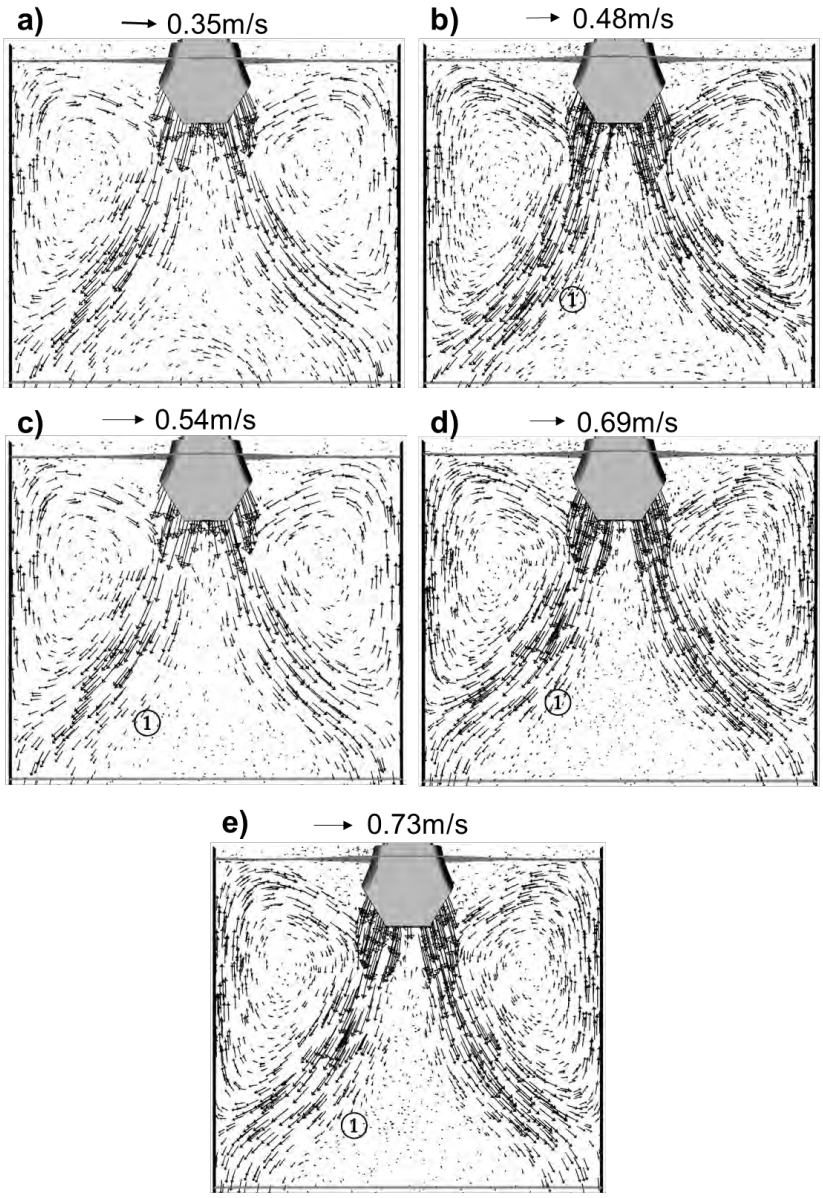

Figura 5.1. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

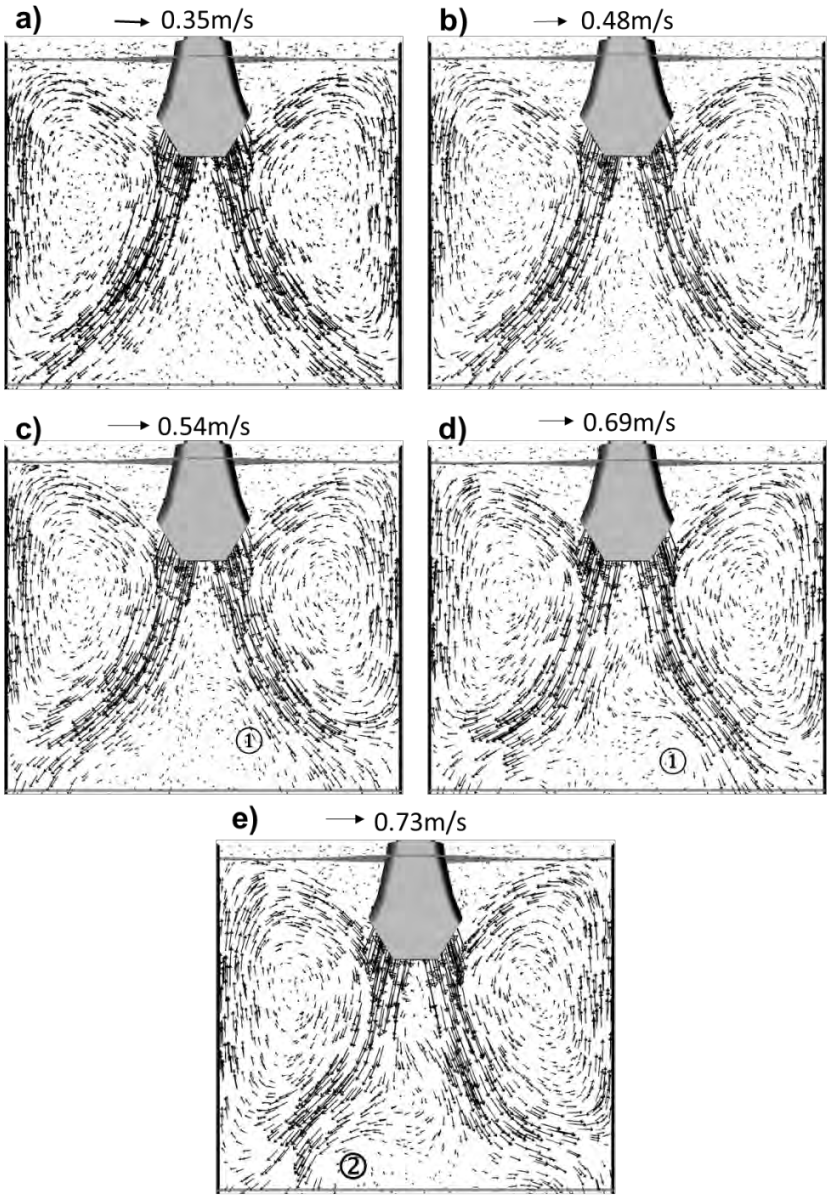

Figura 5.2. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

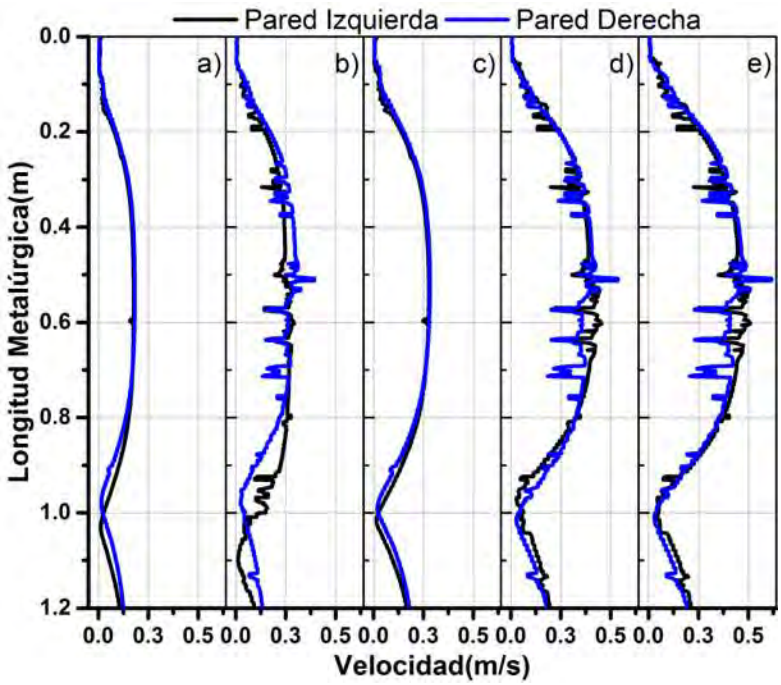

Figura 5.3. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

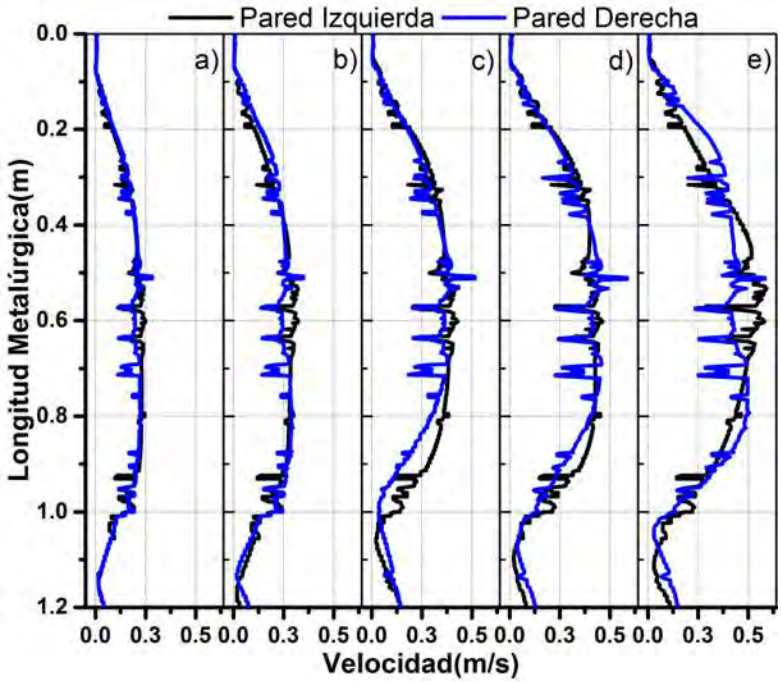

Figura 5.4. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Sí los chorros oscilan, esto se verá reflejado en variaciones de flujo en el molde, que a su vez mostraran sus efectos sobre el comportamiento del menisco. Considerando lo anterior y para observar si las oscilaciones observadas tienen un efecto sobre el menisco, se adquirieron contornos de velocidad a la altura del baño para ambas inmersiones, las cuales se ilustran en las Figs. 5.5 y 5.6 para 22 y 34cm de inmersión de buza, respectivamente. A ambas profundidades de inmersión y a mayor velocidad de colada queda en evidencia que el menisco es alimentado con diferentes velocidades por cada chorro, y que la alimentación con mayor velocidad varia de posición; lo cual es una consecuencia directa de la mayor penetración de uno de ellos. Se puede observar a demás que a medida que la buza se posiciona a mayor profundidad, 34 cm, el efecto de los chorros en el menisco es menor, Fig. 5.6. Esto es de esperarse ya que las recirculaciones hacia la parte superior del molde con ésta configuración se hacen más difíciles una vez que los chorros son enviados a la parte inferior del molde, sin embargo, se llega a observar el fenómeno descrito anteriormente, es decir, las oscilaciones de los chorros y su efecto en el menisco.

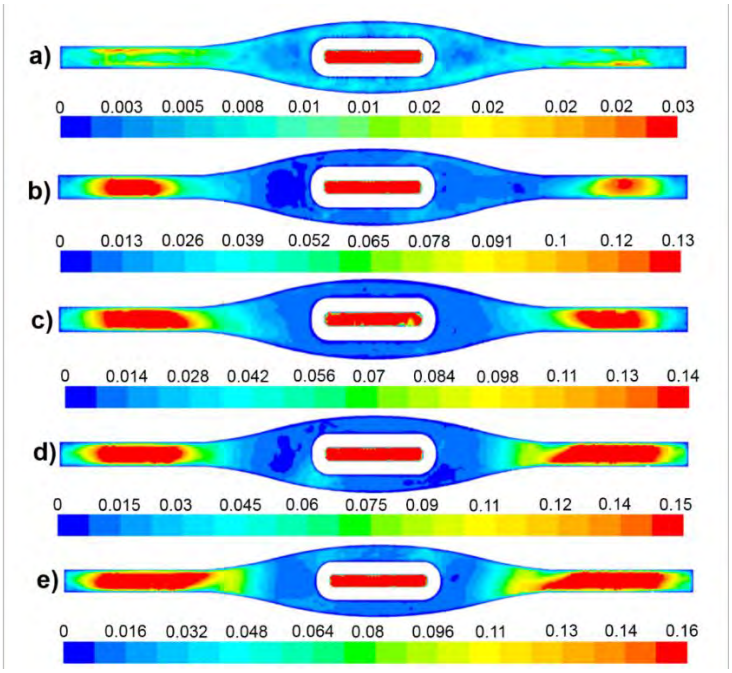

Figura 5.5. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

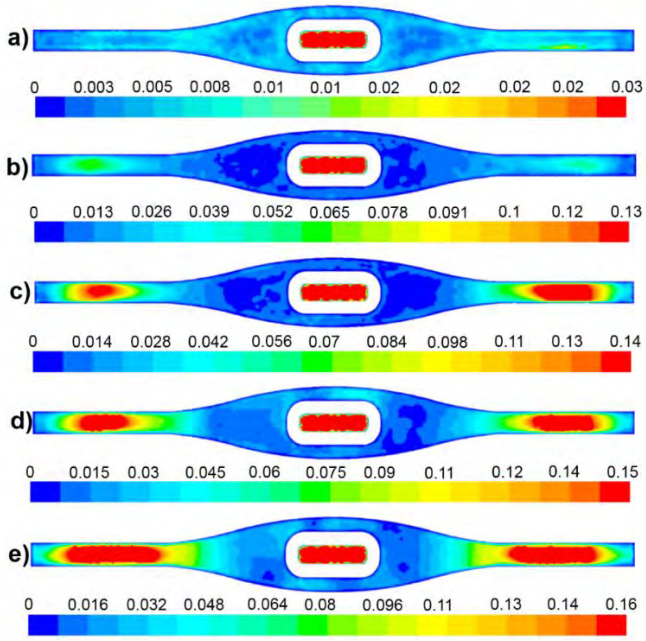

Figura 5.6. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Hasta este punto ha quedado en evidencia que aun en este diseño de buza, cuyo patrón de flujo es considerablemente más estable, se mantienen las oscilaciones de los chorros. Estas oscilaciones se incrementan al aumentar la velocidad de colada y al incrementar la inmersión de la buza, y solo a velocidades de colada muy altas se alcanzaron a observar la ocurrencia de pequeñas distorsiones dinámicas. Es importante mencionar que dichas distorsiones surgieron cuando la oscilación de los chorros fue más intensa y cuando las pequeñas recirculaciones por debajo de la buza se intensificaron.

Los resultados hasta este punto muestran que las DD tienen un inicio en el interior de la buza y con la oscilación de los chorros de descarga. Con éstos resultados el siguiente paso fue por consiguiente hacer un análisis más detallado de la simulación matemática al interior de la misma. Para ésta parte del estudio se seleccionaron 3 casos de relevancia: el de menor velocidad, el de velocidad media y la mayor velocidad de colada.

Se llevó a cabo un primer análisis a través de vectores de velocidad; sin embargo, este análisis no aportó información que contribuyera al entendimiento de las

oscilaciones de los chorros. Por consiguiente y planteando la hipótesis que existe un desequilibrio en el balance de fuerzas al interior de la buza, se determinaron contornos de presión dinámica en un plano longitudinal al centro de la buza a diferentes tiempos para cada caso y se monitorearon los flujos másicos entregados por cada chorro de descarga. Esta información se muestra para los casos mencionados en las Figs. 5.7, 5.8 y 5.9, respectivamente.

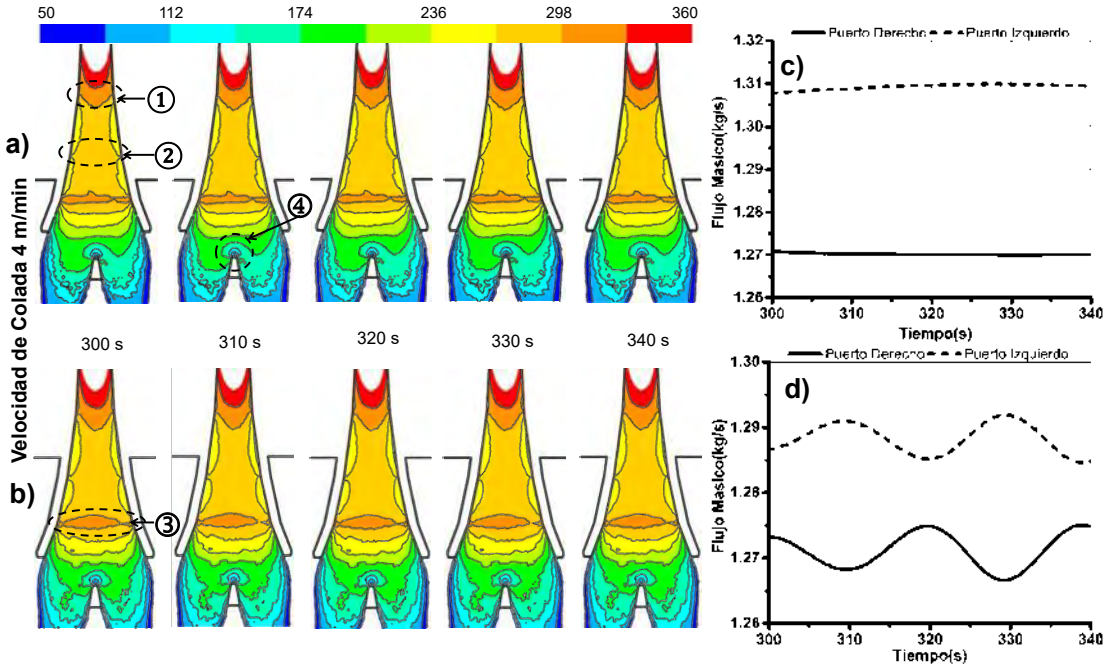

Figura 5.7. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión b) y d) 34cm de inmersión.

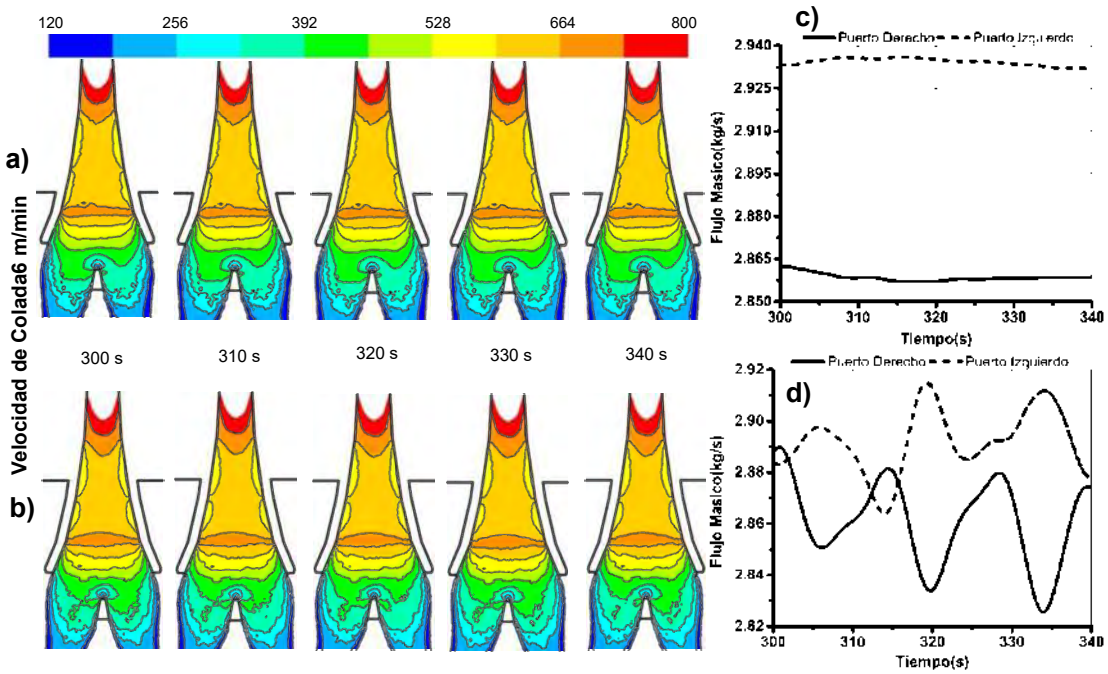

Figura 5.8. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión, b) y d) 34cm de inmersión.

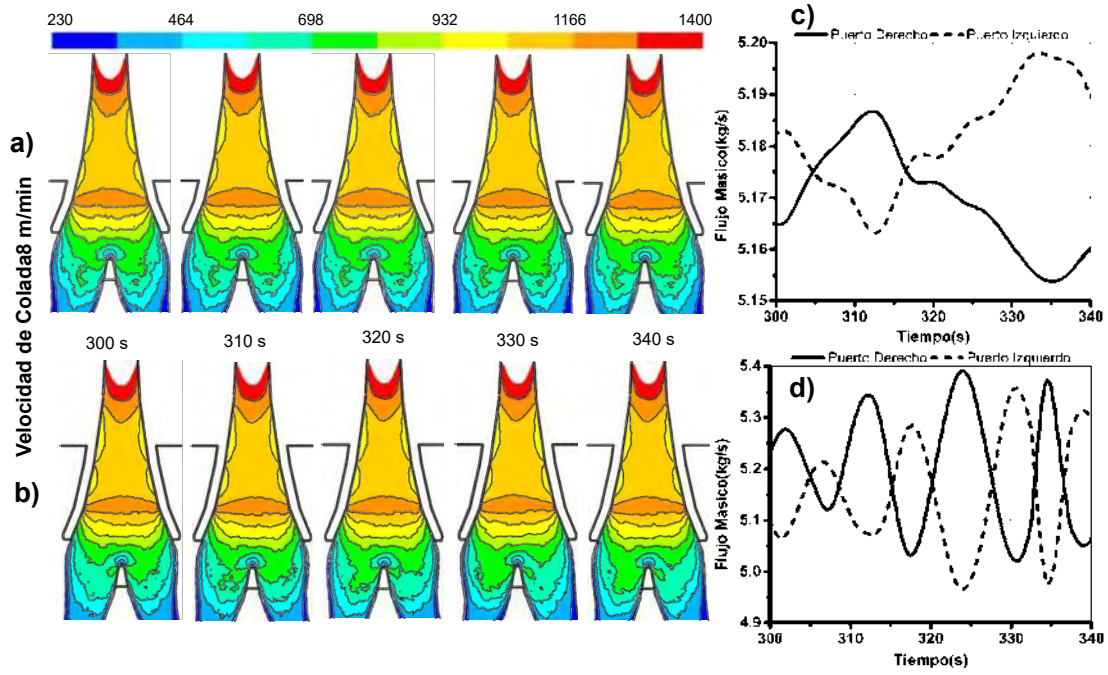

Figura 5.9. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto. a) y c) 22cm de inmersión, b) y d) 34cm de inmersión.

El diseño de la buza seleccionada muestra una variación en el cambio de su geometría en forma paulatina (común en las buzas para planchón delgado), lo que indicaría que el desarrollo del flujo en su interior no debería estar sometido a un desbalance de fuerzas considerable y debería ajustarse al cambio sin mayor efecto; sin embargo, los contornos de presión nos muestran que esto no es así. Observando las primeras dos variaciones en el área interna de la buza (incrementos de área, Fig. 5.7 puntos ① y ②) es claro que, aunque son paulatinas tiene un efecto sobre el desarrollo del flujo y generan la formación de zonas de baja presión (características de la vena contracta) inmediatamente después de donde se realiza el cambio de área. Esto nos indica que el fluido no sufre un desprendimiento total de la capa límite, pero que por la velocidad de alimentación no le es posible seguir completamente estos cambios geométricos.

Estas variaciones mantienen su posición sin importar si la buza está a 22 o 34cm de inmersión y sin importar que la velocidad de colada aumente. No obstante, se debe hacer notar que conforme se aumenta la velocidad de colada estas zonas disminuyen ligeramente en tamaño como es de esperarse (Figs. 5.7 a 5.9). Después de pasar por los dos primeros cambios de área, el fluido ya muestra ciertas variaciones puesto que las zonas de baja presión no son simétricas, indicando fluctuaciones iniciales en los patrones de flujo. Al continuar disminuyendo el fluido entra a un tercer cambio de área (Fig. 5.7 punto③), en esta zona desaparecen las zonas de baja presión a los costados de la buza y se presenta un incremento de presión a todo lo ancho debido a un decremento del área en esta zona. El fluido que sale muestra un claro desequilibrio a la altura de la parte superior del puerto y es evidente su tendencia en dirección al puerto izquierdo para ambas inmersiones cuando se trabaja a una velocidad de colada de 4 y 6 m/min.

Al incrementar la velocidad de colada la zona de mayor presión tiende a agrandarse y la tendencia del fluido hacia uno de los puertos es ahora variable, Fig. 5.9). Hasta este punto es claro que las variaciones en la forma del interior de la buza generan perturbaciones en el fluido de tal manera que este muestra una tendencia a salir preferentemente por uno de los puertos; sin embargo y a pesar de estas variaciones

observadas, aun no es evidente la razón del porque los chorros podrían presentar mayores oscilaciones y generar la formación de las DD.

Continuando con el análisis, al seguir la trayectoria del fluido se observa que éste impacta al divisor de los puertos (forma triangular ubicada en la parte inferior de la buza) y es en este punto donde se genera nuevamente una variación más intensa en la presión dinámica, Fig. 5.7 punto④. A una velocidad de colada de 4 m/min y en la posición de 22cm, Fig. 5.7 a), las variaciones en la presión en dicha zona no cambian con el tiempo; sin embargo, al pasar la buza a 34cm de inmersión, la presión dinámica en la punta del triángulo comenzó a mostrar pequeñas fluctuaciones con respecto del tiempo, Fig. 5.7 b). Para saber si estas variaciones estaban afectando la oscilación de los chorros se determinó el flujo másico en cada puerto en función del tiempo, los cuales se muestran en las Figs. 5.7 c) y 5.7 d).

A una posición de 22cm de inmersión de buza se confirma todo lo discutido con anterioridad puesto que se observa con claridad que el fluido tiene una clara y constante tendencia a salir por el puerto izquierdo. Sin embargo, a 34cm de inmersión de buza las variaciones observadas en la punta del mencionado triangulo generan que el flujo másico en cada chorro comience a oscilar, mostrando que periódicamente el flujo por el puerto izquierdo disminuye y aumenta en la misma magnitud por el derecho. Al incrementar la velocidad de colada a 6 m/min, Fig. 5.8), se encontró nuevamente que a 22cm de inmersión de buza la zona de variación de presión dinámica, sobre la punta del triángulo, se mantiene constante y que el fluido tiene la misma tendencia a salir más por el puerto izquierdo, Figs. 5.8 a) y 5.8 c).

A esta misma velocidad, pero a 34cm de inmersión de la buza las variaciones en la presión dinámica en la punta del triángulo se vuelven más evidentes y su efecto sobre las oscilaciones de los chorros también, Figs. 5.8 b) y 5.8 d). Cuando se emplea la velocidad de colada de 8 m/min se encontró que las variaciones sobre la punta del triángulo se presentan aun desde la inmersión de buza de a 22cm, Figs. 5.9 a) y 5.9 c), y que a 34cm de inmersión de la buza presentan una mayor frecuencia de oscilación.

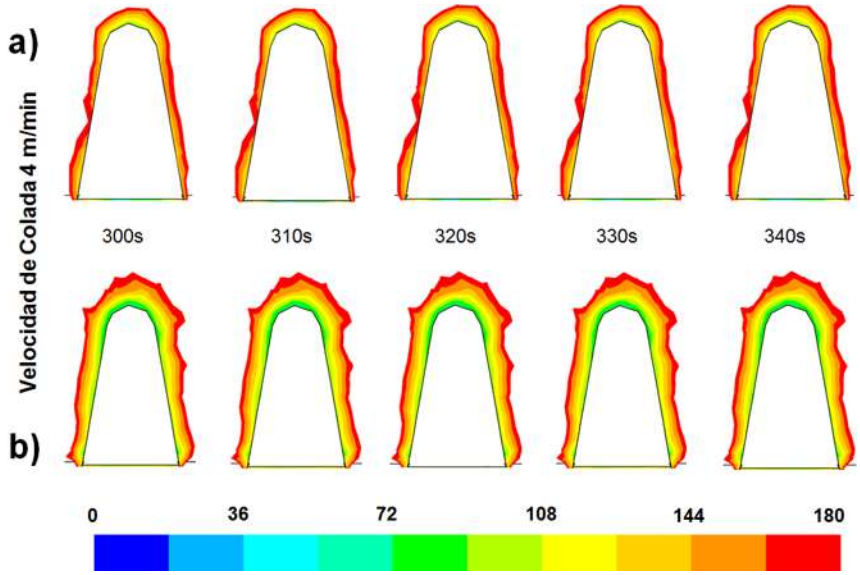

Figura 5.10. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza.

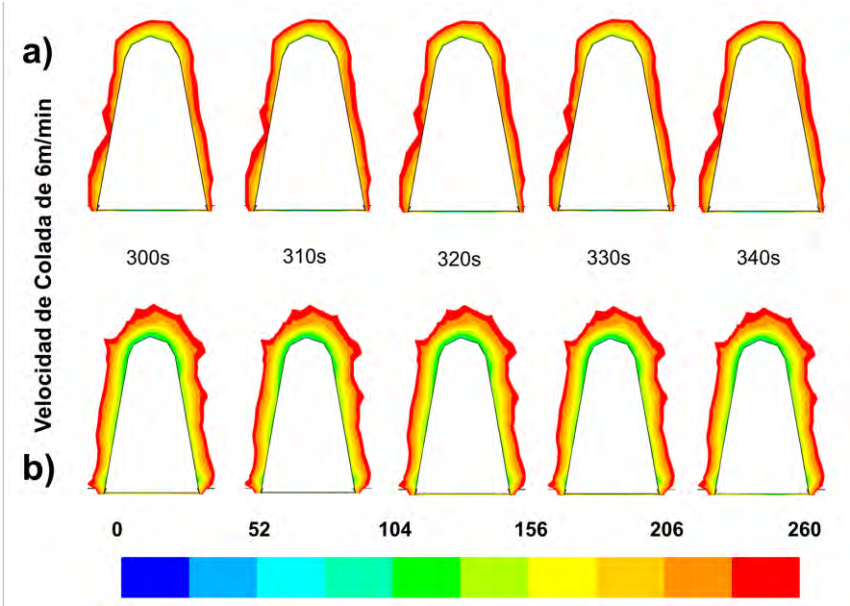

Figura 5.11. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza.

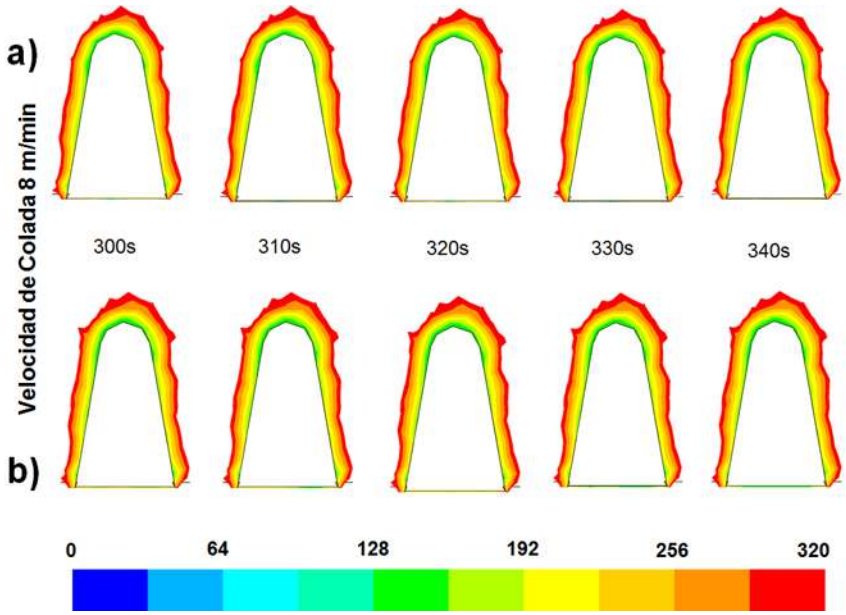

Figura 5.12. Contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos. a) a 22cm de inmersión de buza y b) a 34cm de inmersión de buza.

Dado que las condiciones de operación cuando se trabaja a 22 y 34cm de inmersión de buza no son diferentes para cada caso y solo se tiene un incremento de presión debido a la mayor presión ferrostática a vencer para que el flujo salga de la buza, entonces las variaciones que se están llevando a cabo deberán estar relacionadas con las fluctuaciones a micro escala en la zona del triángulo mencionado. Hasta este punto se han analizado y discutido las variaciones a macro escala que se están llevando a cabo al interior de la buza; sin embargo, éstas no permiten una explicación del porqué varia la zona de presión sobre la punta del triángulo antes mencionado.

Consecuentemente, un análisis de las micro escalas es requerido. No hay que olvidar que este modelo numérico está basado en un modelo RANS por sus siglas en ingles Reynolds Average Navier Stokes (RSM Reynolds Stress Model), con el cuál no es posible estudiar tan detalladamente las micro escalas; sin embargo, es posible tener una idea de las variaciones de estas a través del número de Reynolds turbulento, el cual relaciona la viscosidad turbulenta con la viscosidad laminar ($Re_T = k^2 / \varepsilon \cdot \nu$). Es sabido que el número de Reynolds cerca de las paredes tiende a cero,

no obstante, las variaciones en el Re_T cerca de las paredes del triángulo nos darán una idea del comportamiento de las micro escalas.

Considerando lo anterior, se adquirieron contornos de R_{eT} para los casos mencionados en un plano longitudinal al centro de la buza los cuales se muestran en las Figs. 5.10 a 5.12, respectivamente. Iniciando a 4 m/min se observa que bajo el mismo rango de magnitudes, la zona de R_{eT} incrementa de tamaño al pasar de 22 a 34cm de inmersión de buza, lo cual nos indica que al encontrarse la buza en a 34cm de inmersión y por efecto de la mayor presión ferrostática a vencer para que el flujo salga de la buza, existe un incremento en la zona de cambios a micro escala indicando que la relación entra la k y ε ha aumentado; consecuentemente, las variaciones de la velocidad fluctuante en dicha zona también aumentaron, siendo entonces estas variaciones de este equilibrio la razón por la cual el fluido a macro escala comienza a fluctuar a la salida de la buza.

Al aumentar la velocidad de colada a 6 m/min el rango de magnitudes aumenta como es de esperarse, pero el mismo fenómeno observado a 4 m/min vuelve a llevarse a cabo. Sin embargo, cuando la velocidad llega a 8 m/min, la zona de R_{eT} a 22 y 34 cm de inmersión son casi del mismo tamaño, lo que nos indica que ha esta velocidad las velocidades fluctuantes en esta zona están mayormente dominadas por los efectos de la velocidad de colada y el efecto de la presión ferrostática (aun presentes) ya no son tan significativos.

Con estos resultados se puede concluir que la oscilación de los chorros inicia desde la parte superior de la buza por la naturaleza turbulenta del fluido que se ve mayormente alterada por las variaciones en los incrementos y decrementos de áreas generando zonas de baja y alta presión dinámica. Estas alteraciones producen que el fluido tenga una tendencia a salir mayormente por uno de los puertos. Adicionalmente, se debe hacer notar que el tamaño de dichas zonas es una función inversa de la velocidad de colada.

Además, los resultados muestran que el equilibrio de fuerzas externas sobre la punta del triángulo que forma la división de los puertos es muy delicado, de tal manera que un aumento de la presión ferrostática afecta las velocidades fluctuantes

en esta zona y además al aumentar la velocidad de colada, las fluctuaciones se hacen más evidentes e intensas, generando que el fluido que deja la buza comience a fluctuar hacia un lado y hacia el otro de la punta, induciendo con ello la oscilación permanente del flujo másico que sale por cada puerto.

Con estos resultados se ha comprobado que las DD tiene su origen desde el interior de la buza y que para un mayor control o eliminación de las mismas se requiere un análisis minucioso de las zonas que presenten variaciones en la velocidad fluctuante, las cuales requerirán modificaciones para disminuir su efecto sobre el flujo.

5.2 Modificaciones a la buza I.

Partiendo de lo discutido con anterioridad, se plantea una modificación al divisor de los puertos, donde la punta de este se modifica haciéndola 84.75% más alargada hacia el interior de la buza, buscando con esto disminuir el efecto externo de la presión ferrostática.

5.2.1 Análisis al interior de la buza modificada I.

Las Figs. 5.13, 5.14 y 5.15 muestran los contornos de presión dinámica en un plano longitudinal al centro de la buza. Los resultados muestran que la zona del balance de fuerzas en la punta del divisor tiene mayor estabilidad puesto que ya no se observa la tendencia a moverse hacia alguno de los puertos. Además, los resultados de los flujos másicos en cada puerto muestran disminuciones en la variación de los flujos de hasta el 35% a 22cm de inmersión de buza y de hasta 45% a 34cm de inmersión.

Esto indica que las variaciones en las micro escalas en la zona del divisor de los puertos son menores, para comprobar esto se determinaron campos de Re_T en los mismos planos de las figuras previas; los resultados se muestran en la Fig. 5.16, donde se hace una comparación entre los contornos de Re_T para el diseño original y para el diseño modificado.

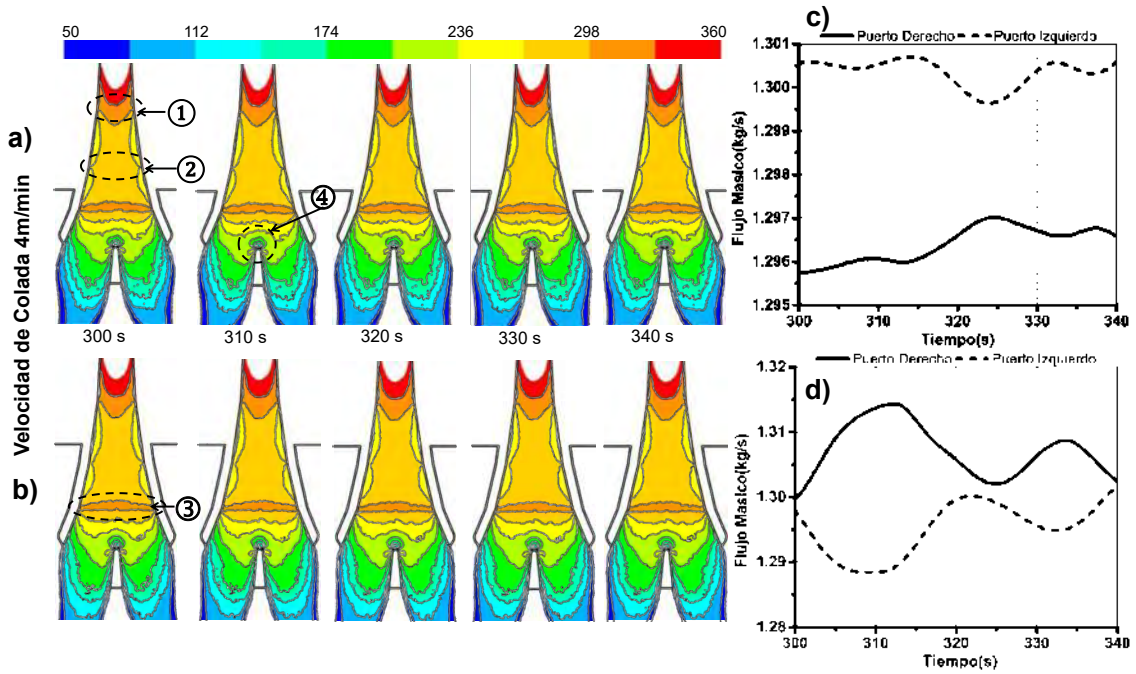

Figura 5.13. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

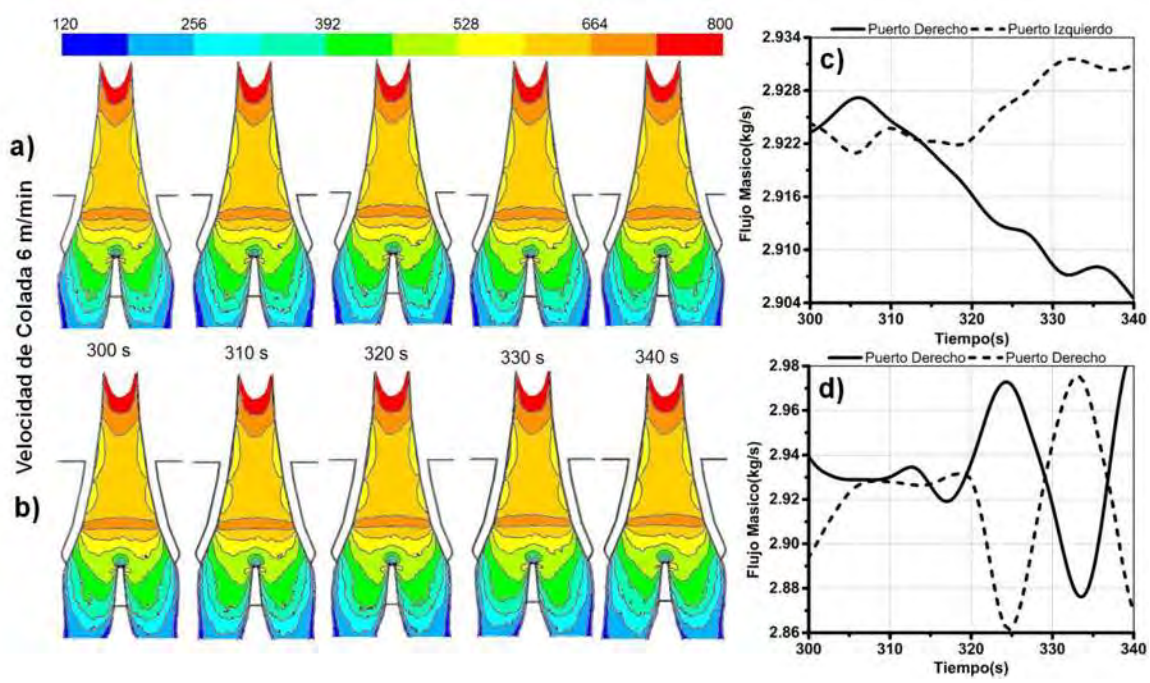

Figura 5.14. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

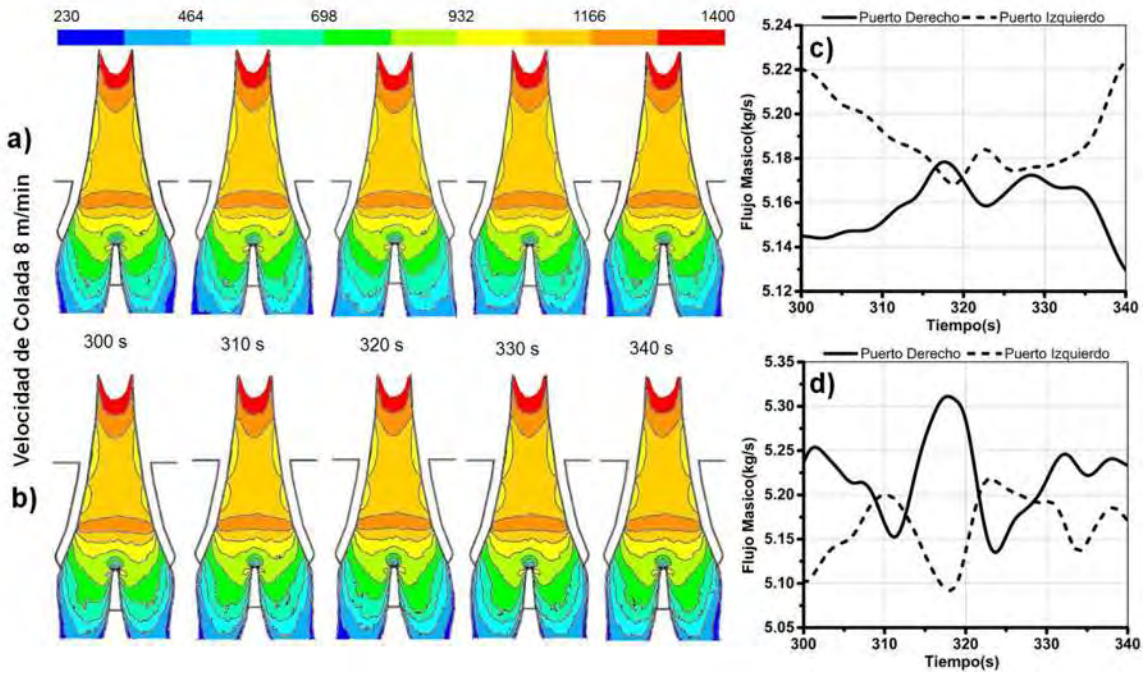

Figura 5.15. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

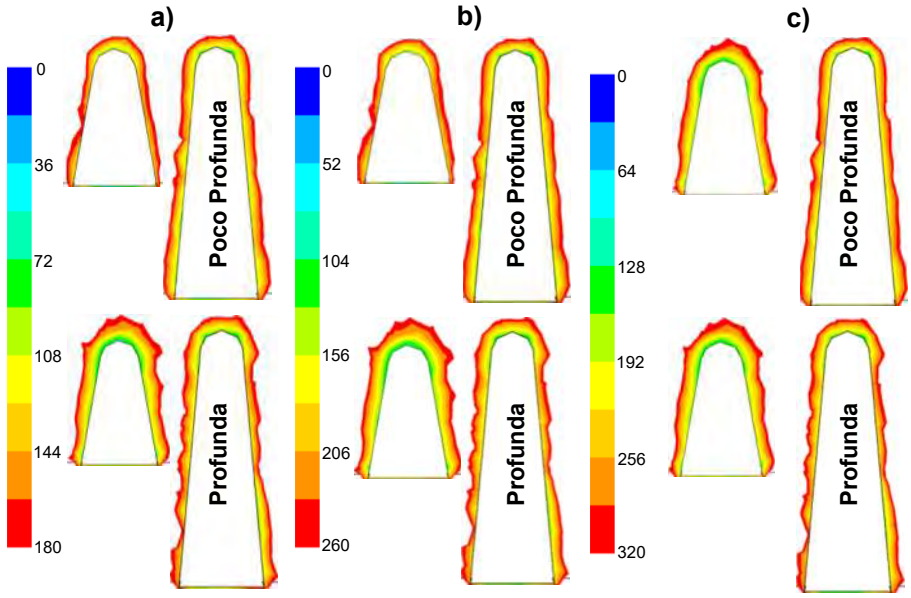

Figura 5.16. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza original lado izquierdo y modificada I lado derecho a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min.

La Fig. 5.16 ilustra que a 22cm de inmersión de buza las variaciones no son tan considerables, pero aun así las hay. Esto va acorde al comportamiento de los patrones de flujo, puesto que a esta profundidad la oscilación de los flujos másicos es mínima. Sin embargo, a 34cm de inmersión de buza las diferencias son más evidentes y es claro que, aunque pequeña, existe una disminución del Re_T en la punta del divisor, lo cual confirma lo observado con las presiones dinámicas.

5.2.2. Efectos de la modificación I de la SEN sobre los patrones de flujo

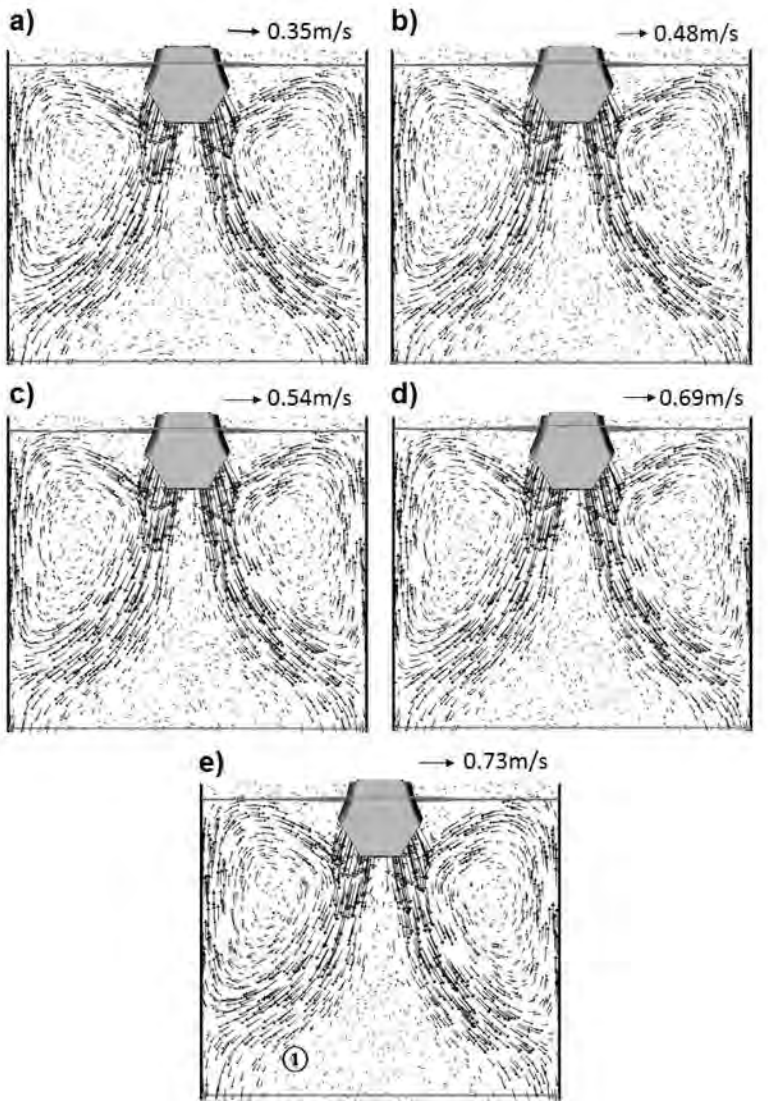

Figura 5.17. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada I a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

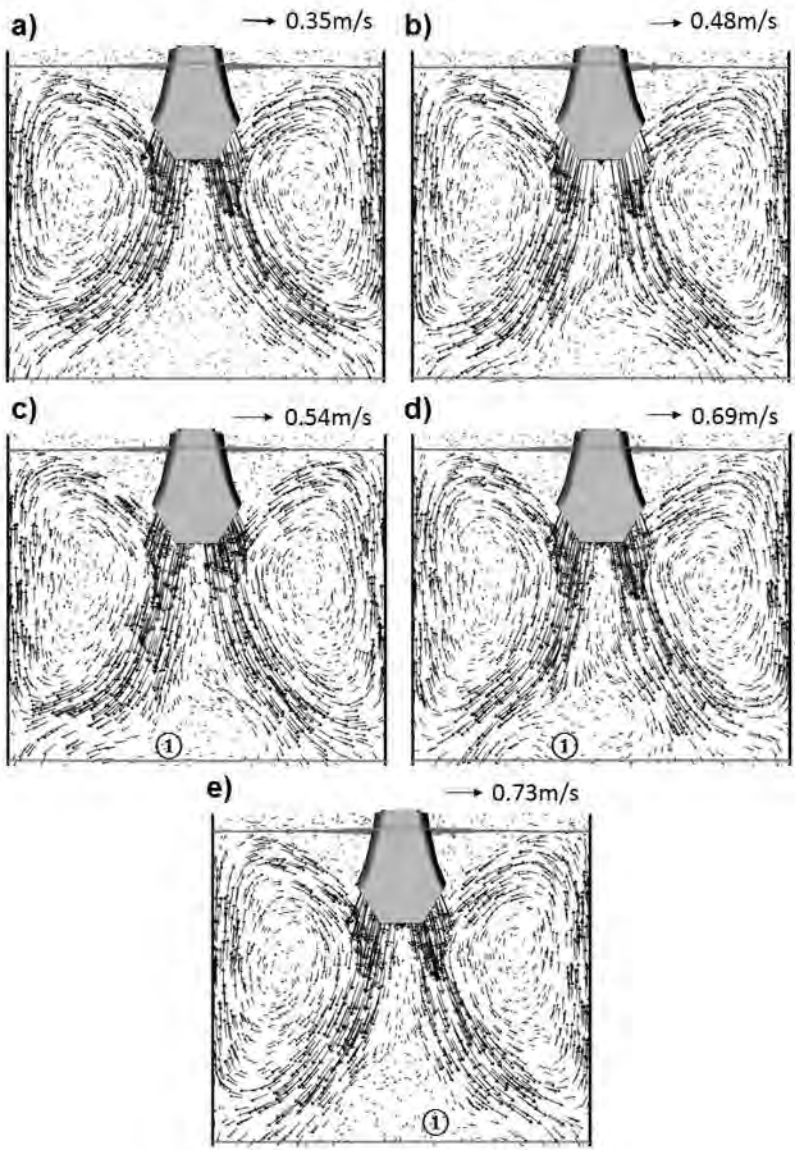

Figura 5.18. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada I a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Con la modificación se disminuye la variación del flujo másico entre ambos puertos, lo que conduce a que los chorros presenten una mejor estabilidad. Las Figs. 5.17 y 5.18 muestran los patrones de flujo a 22 y 34cm de inmersión de buza, donde es claro que los patrones permanecen estables como con el diseño original. En posición poco profunda (22cm) los chorros muestran una ligera deformación solo a una velocidad de colada de 8 m/min, punto ①, Fig. 5.17 e). A 34cm de inmersión de buza las oscilaciones de la punta de los chorros se surgen a partir de 6 m/min,

punto ① en las Figs. 5.18 c) a 5.18 e). Para apreciar y cuantificar estas variaciones, se calculó la magnitud de la velocidad en una línea a todo lo largo del molde a 5 mm de cada pared angosta, los resultados se muestran en las Figs. 5.19 y 5.20 para 22 y 34cm de inmersión de buza. En estas figuras se aprecia más claramente que las variaciones, en los puntos de impacto, son menores en comparación con la buza sin modificaciones.

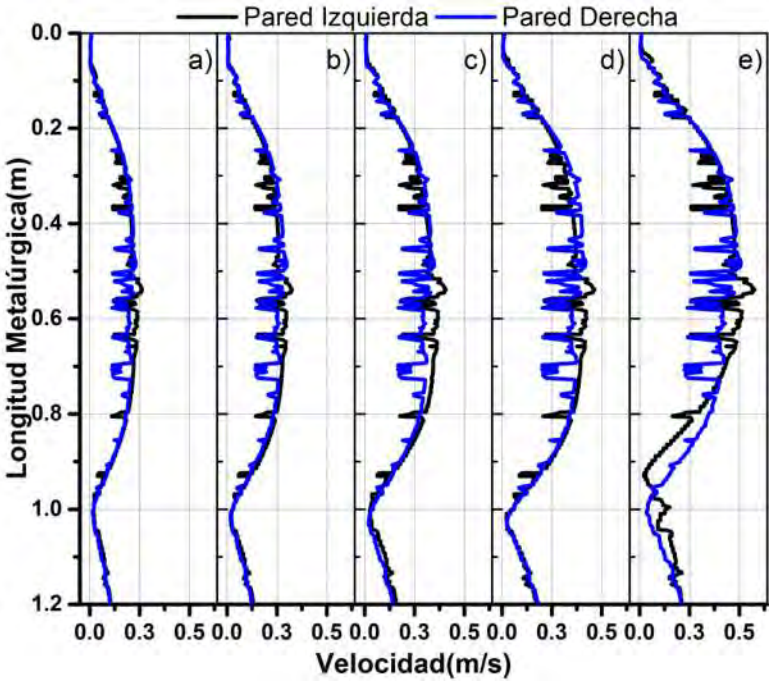

Figura 5.19. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

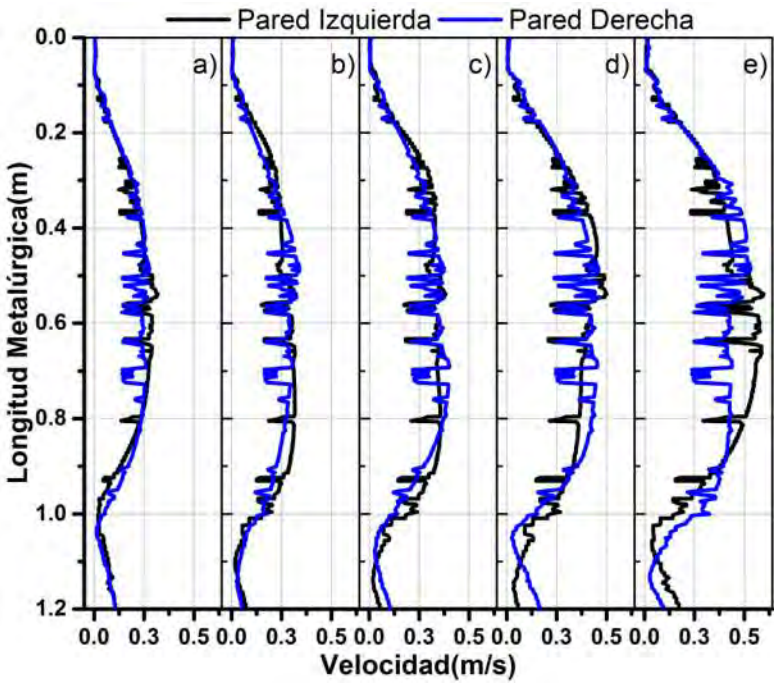

Figura 5.20. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Como se mencionó anteriormente, si los chorros oscilan, se verá reflejado en las variaciones de flujo en el molde, lo cual, a su vez tendrá un efecto en el menisco. Por lo que para comparar el efecto de las oscilaciones de los chorros sobre el menisco entre la buza original y la modificada I, se obtuvieron contornos de velocidad a la altura del baño para ambas inmersiones de buza, mismos que pueden ser observados en las Figs. 5.21 y 5.22 para 22 y 34cm de inmersión de buza.

Se aprecia claramente que la buza modificada I presenta una alimentación más homogénea al menisco que la buza original para cada una de las velocidades de colada utilizadas en ambos casos. Mientras que para 34cm de inmersión de buza, sigue siendo la buza modificada la que alimenta con una mayor homogeneidad al menisco; aunque para ésta profundidad de inmersión de buza se hace más evidente el efecto de la presión ferrostática sobre la velocidad de ascenso del fluido y el fenómeno oscilante del chorro, en particular a la mayor entrega de flujo sobre uno de los puertos, lo cual es evidente en cada una de las imágenes.

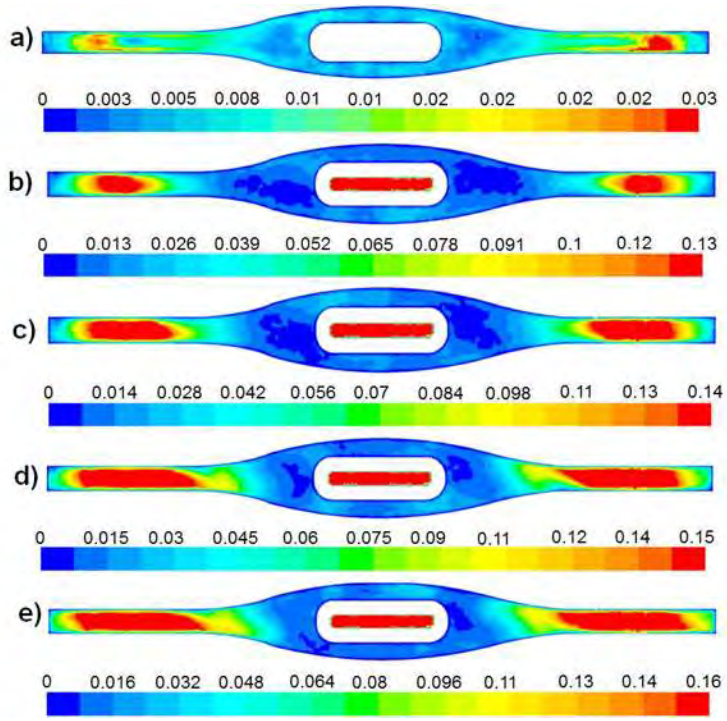

Figura 5.21. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

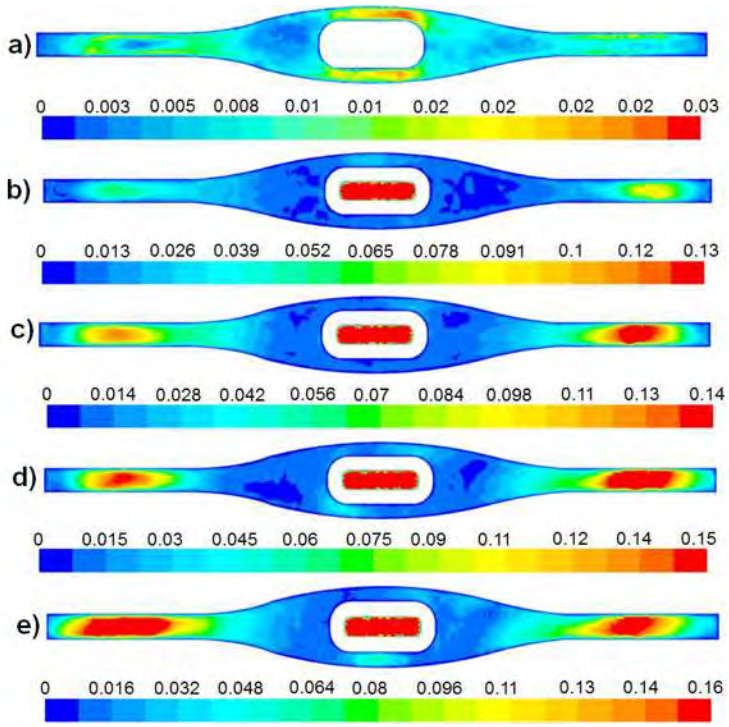

Figura 5.22. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Considerando todo lo anterior, es evidente que el diseño interno de la buza afecta el flujo másico que sale por cada puerto de la misma y que esto a su vez tiene un efecto directo sobre la estabilidad de los chorros de descarga. Consecuentemente, sí el diseño interno de la buza produce inestabilidades en el acero que entrega al molde, es altamente probable que estas inestabilidades se vean reflejadas negativamente en los patrones de flujo en el molde como DD, las cuales tendrán un impacto nocivo sobre la calidad del producto final. Lo anterior nos lleva a concluir que la DD de los chorros tienen su origen desde el interior de la buza y que en el molde donde se encuentren presentes se deberá recurrir a estudios de modificaciones de la buza de alimentación sin dejar a un lado el papel tan importante de las fluctuaciones a micro escala.

5.3. Modificación a la buza II.

En esta etapa se plantea una nueva modificación al divisor de los puertos haciéndola 500 % más alargado, hacia el interior de la buza, buscando con esto tratar de eliminar el efecto de la presión ferrostática.

5.3.1. Análisis al interior de la buza modificada II.

En las Figs. 5.23, 5.24 y 5.25 se observan los contornos de presión dinámica en un plano longitudinal al centro de la buza. Los resultados muestran que al igual que la Buza modificada I, la zona de balance de fuerzas, en la punta del divisor aparenta mayor estabilidad puesto que disminuye aún más la tendencia a moverse hacia algunos de los puertos. La desventaja de ésta, es que incrementa la presión dinámica y por ende la velocidad en el interior de la buza acelerando la erosión interna y por lo tanto disminuyendo la vida útil en operación de esta. Además los resultados de los flujos másicos para 22 cm de inmersión de buza en cada puerto muestran que para cualquiera de las velocidades de colada siempre habrá la tendencia a salir mayor flujo por uno de los puertos, siendo el comportamiento contrario para una inmersión de la buza de 34 cm en donde predomina un mayor flujo por el puerto contrario, esto a excepción de la velocidad de colada de 8 m/min y 34 cm de inmersión de buza en donde claramente se puede observar el entrelazamiento de los flujos, lo cual, es una señal clara del comportamiento oscilante de los chorros hacia el interior del molde.

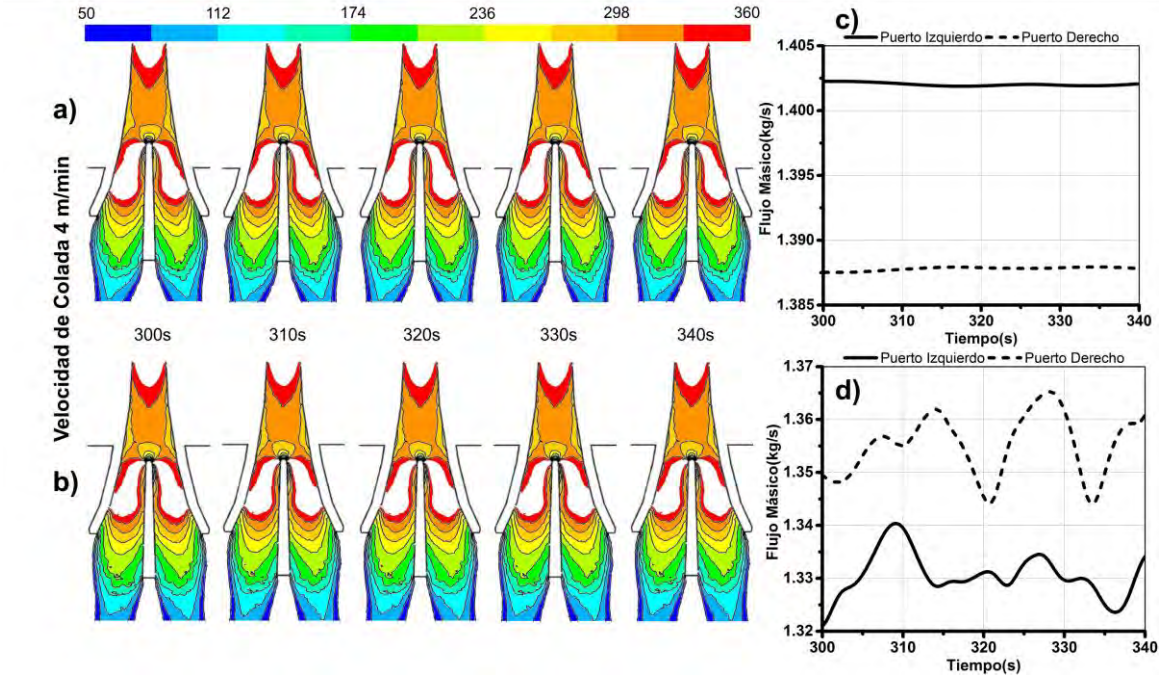

Figura 5.23. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

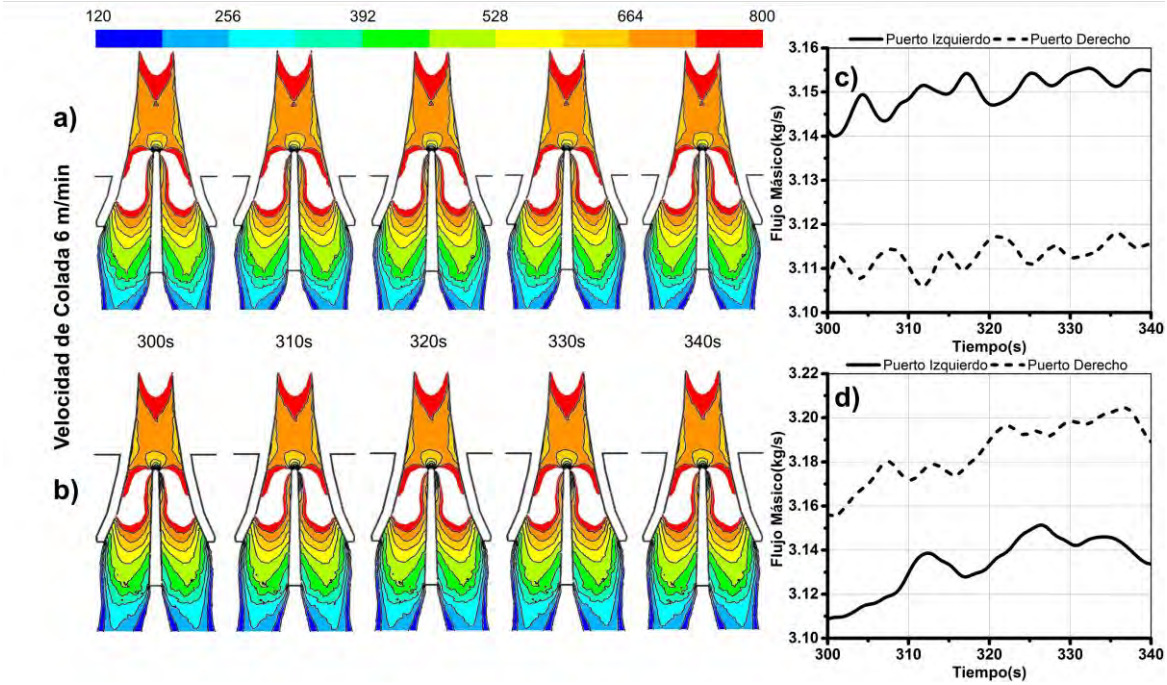

Figura 5.24. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

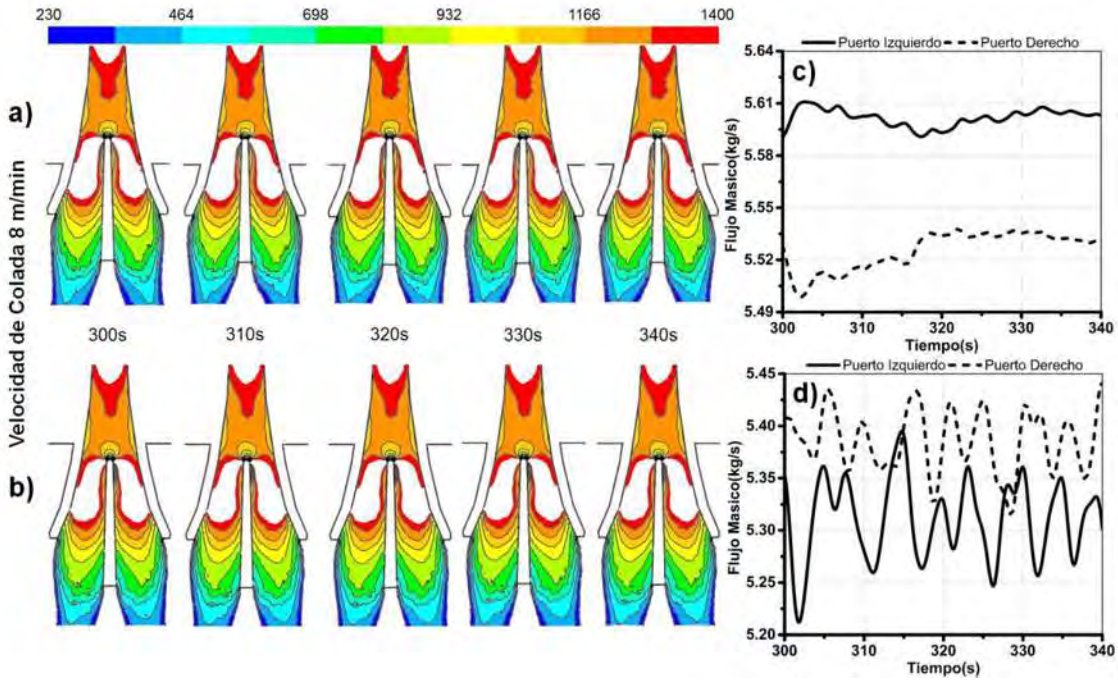

Figura 5.25. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

Dicho comportamiento es un indicativo de que la altura del divisor de los puertos disminuirá considerablemente las variaciones en las micro escalas, para comprobar esto se determinaron nuevamente los campos de Re_T para los mismos planos. Los resultados son mostrados en la Fig. 5.26, en donde se hace nuevamente una comparación entre los contornos de Re_T para el diseño original, modificada I y modificada II. La figura ilustra que en posición de buza poco profunda las variaciones disminuyen en orden de magnitud de acuerdo a la altura del divisor de los puertos, lo cual, sigue concordando con el comportamiento de los patrones de flujo, puesto que a esta profundidad la oscilación de los flujos másicos es mínima para las tres buzas.

Sin embargo, al observar los contornos para la posición de buza a 34 cm las diferencias son evidentes para la buza original y la modificada I, mas no lo es así para la buza modificada II ya que la variación en las micro escalas (Re_T) desaparece, aunque como ya se discutió con anterioridad las variaciones en la presión dinámica al interior de la buza se mantienen, lo que puede ser atribuido a

la variación en la velocidad y presión fluctuante en la zona afectada por el impacto del chorro de agua sobre la punta del divisor de los puertos.

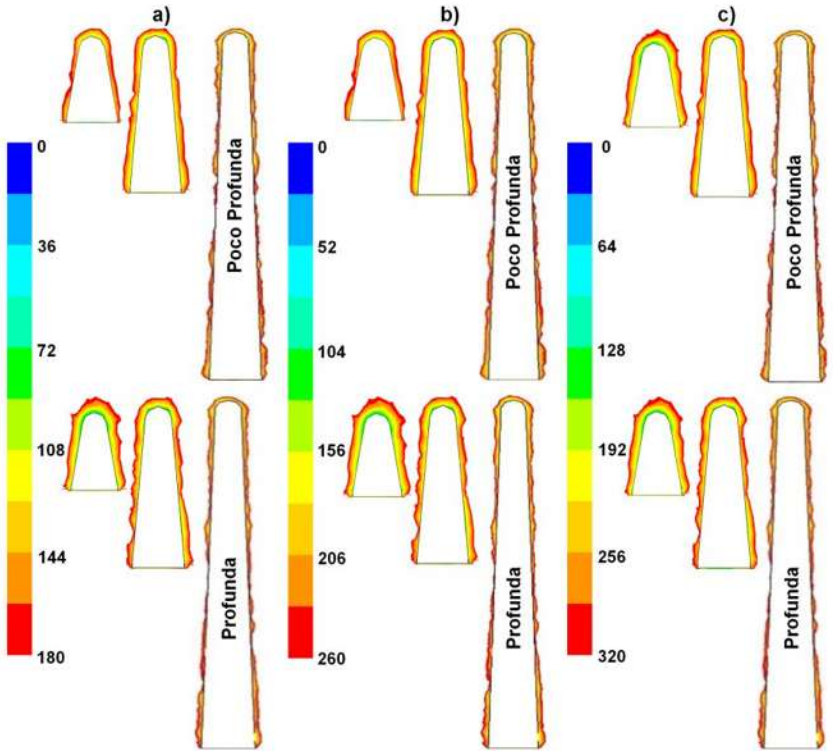

Figura 5.26. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza, original lado izquierdo, en medio modificada I y lado derecho modificada II a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min.

5.3.2. Efectos de la modificación II de la SEN sobre los patrones de flujo.

Con la presente modificación hecha a la buza se logra disminuir el coeficiente de variación en el flujo másico 1.6 veces, esto con respecto a la modificación I de buza; lo que nos indica que hay una menor dispersión en los datos monitoreados, lo que se verá reflejado en una mejor estabilidad de los chorros. Las Figs. 5.27 y 5.28 muestran los patrones de flujo a 22 y 34 cm de inmersión de buza. Como puede apreciarse la estabilidad de los chorros es demasiado buena tanto a 22cm de inmersión de buza como a 34 cm y las 5 velocidades de colada utilizadas.

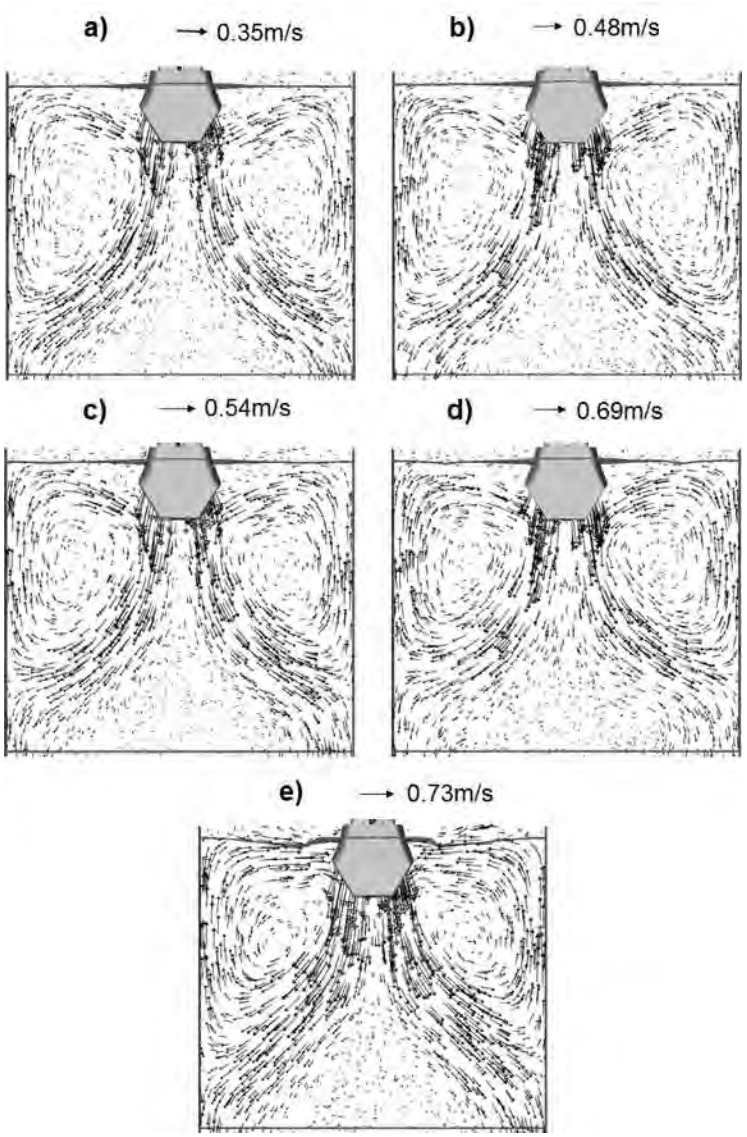

Figura 5.27. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada II a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min

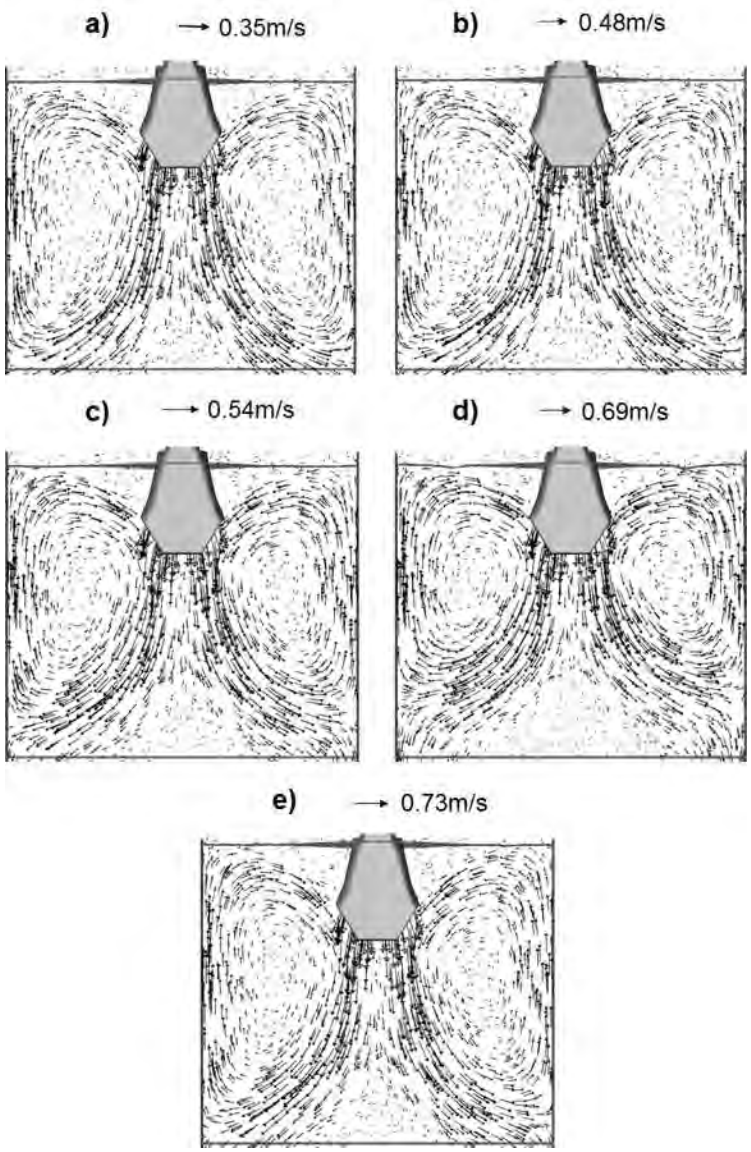

Figura 5.28. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada II a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min

Para poder apreciar y cuantificar con mayor exactitud si es que existe alguna variación al igual que para la buza anterior se determinaron la magnitud de velocidad en una línea a todo lo largo del molde a 5 mm de la pared angosta, los resultados se muestran en las Figs. 5.29 y 5.30 para 22 y 34 cm de inmersión.

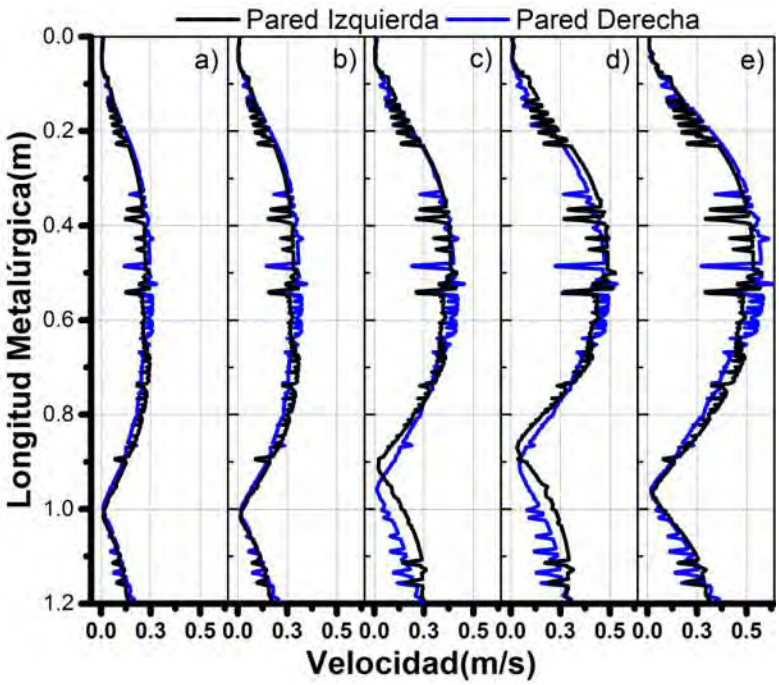

Figura 5.29. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

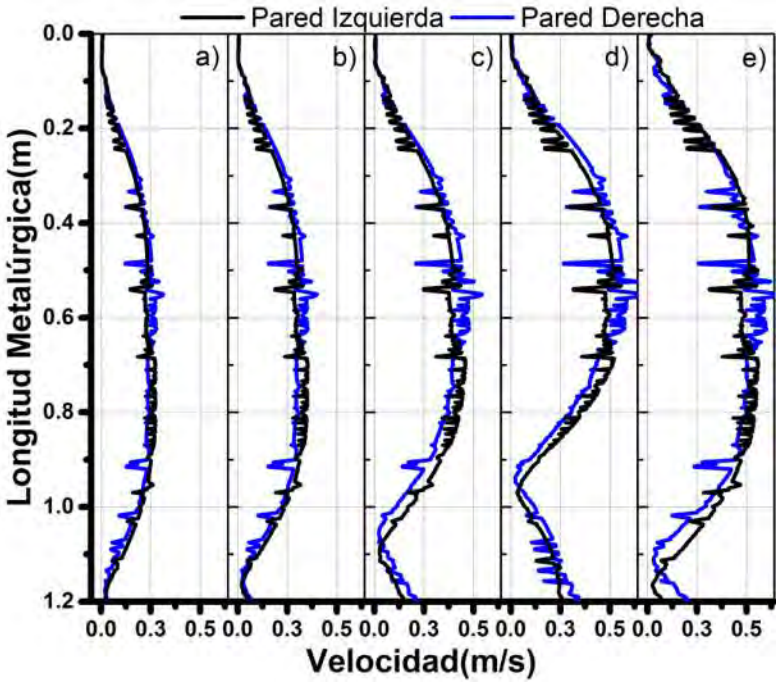

Figura 5.30. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m /min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

En las cuales, se puede apreciar como las variaciones en los puntos de impacto con respecto a las dos buzas anteriores es menor, aunque aún persiste el fenómeno de oscilación de los chorros, con lo que se reduce el lavado de la costra de acero recién solidificado y se logra una alimentación con mayor homogeneidad al menisco, lo cual, nos reduciría las fluctuaciones en la interfase escoria-acero reduciendo la posibilidad de posibles desprendimientos de escoria hacia el seno de acero líquido; esto puede ser apreciado en las Figs. 5.31 y 5.32.

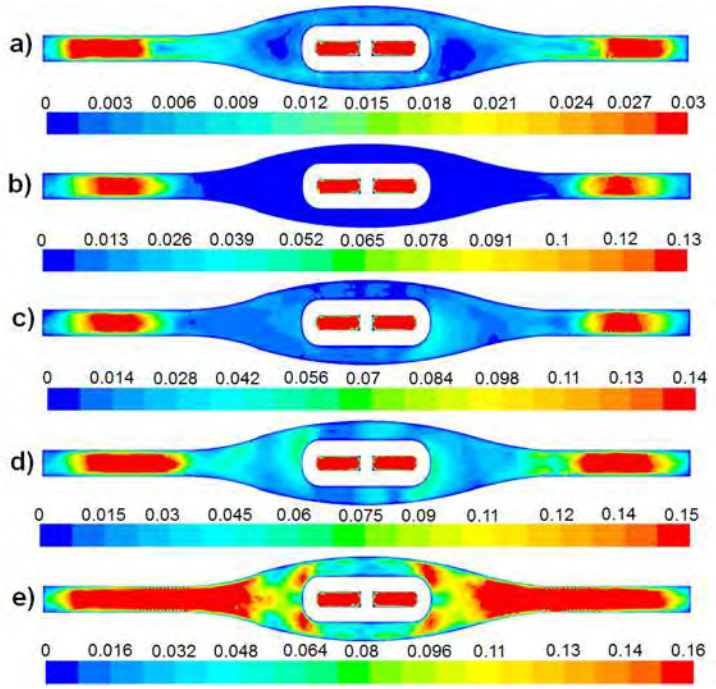

Figura 5.31. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

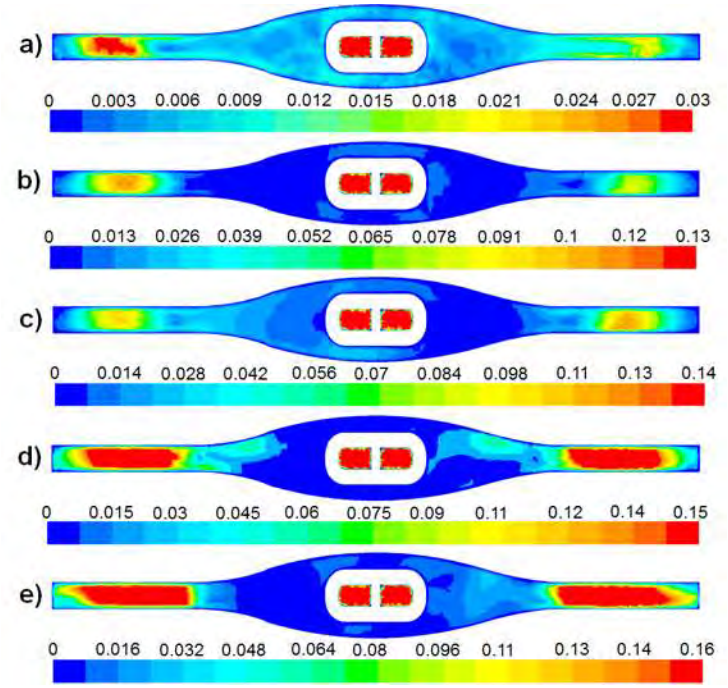

Figura 5.32. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

5.4. Modificación a la buza III.

Analizando lo hasta aquí discutido, se puede apreciar que con el alargamiento de la división de los puertos se logra eliminar el efecto de las fluctuaciones en las micro escalas y de la presión ferrostática sobre el divisor de los puertos, Con esto se logra mantener casi constante el flujo másico y por ende las variaciones en la presión dinámica al interior de la buza, aunque predomina la entrega de una cantidad de flujo ligeramente mayor por uno de los puertos, por lo que dicho fenómeno continua siendo la fuente de generación de la distorsión dinámica, aunque a menor medida.

Para finalizar con el análisis de los tres diseños de buza propuestos, se plantea una última modificación al divisor de los puertos, la cual consiste en hacerla 106% más alargada que la buza original hacia el interior de la buza, con el 17% de una forma trapezoidal invertida; además la parte inferior de ambos puertos aumento en 2.5 mm, con lo que se compensa el incremento de la forma trapezoidal invertida. Con esto se pretende eliminar la zona por debajo de la punta de la buza donde se origina la distorsión dinámica, obligando a que los chorros salientes de la buza compartan

su energía creando un balance entre ambos eliminando por completo el efecto externo de la presión ferrostática y las oscilaciones.

5.4.1. Análisis al interior de la buza modificada III.

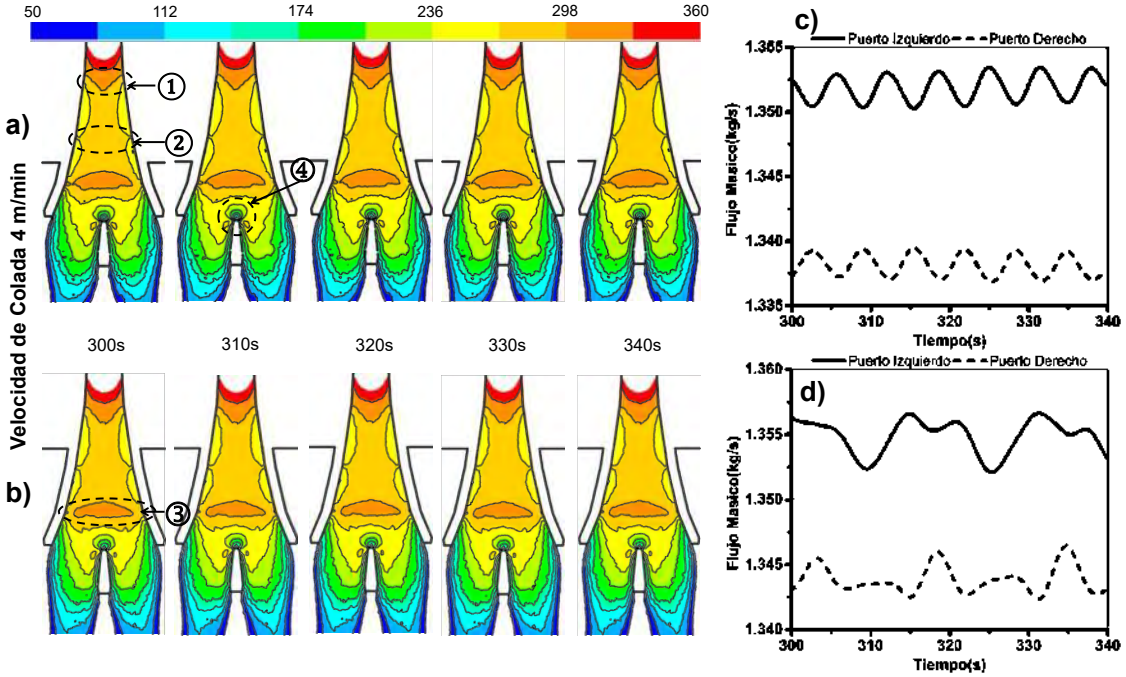

Figura 5.33. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

En las Figs. 5.33, 5.34 y 5.35 se observan los contornos de presión dinámica en un plano longitudinal al centro de la buza. Los resultados muestran que el punto ① y ② son muy parecidas a las presentadas por la buza original y modificada I mientras que para la buza modificada II es totalmente distinto ya que esta ha sido alargada hasta una de las zonas donde existen cambios en el área interna de la buza, mientras que en el punto ③ se pueden apreciar diferencias notables entre las 4 buzas teniendo un incremento en la presión dinámica mayor para la buza modificada III que el presentado por la buza original y modificada I, lo cual, provoca que la fluctuación en la presión y velocidad fluctuante provocado por el impacto del chorro de fluido sobre el punto ④ de la buza tenga un efecto menor sobre la falta de homogeneidad en la transferencia de movimiento en zonas del fluido por encima de esta zona.

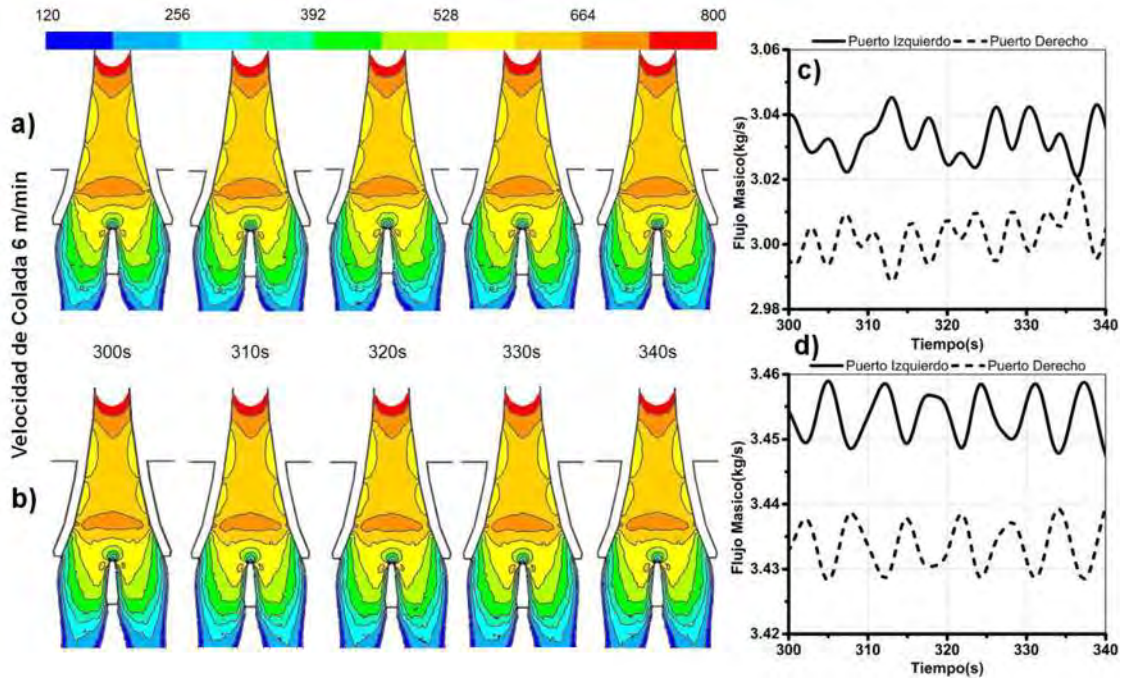

Figura 5.34. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

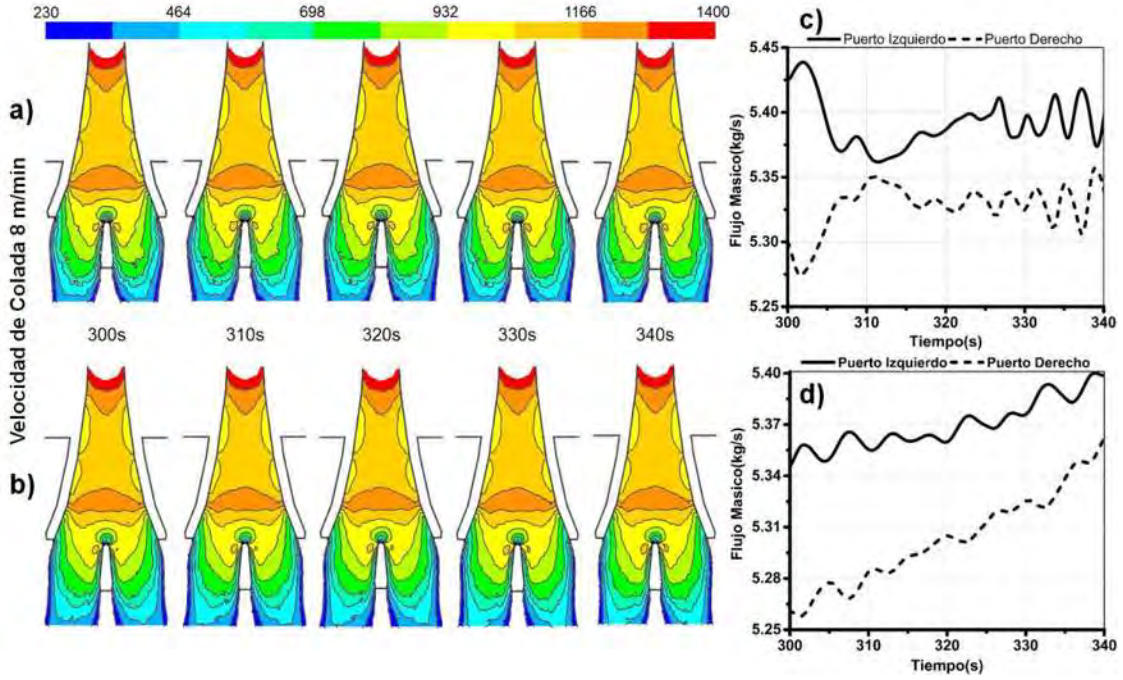

Figura 5.35. Contorno de presión dinámica (Pa) en un plano simétrico central de la buza a diferentes tiempos y monitoreo del flujo másico para cada puerto, a) y c) a 22 cm de inmersión de buza, b) y d) a 34cm de inmersión de buza.

Sí observamos ahora el punto ④ y la comparamos con las otras 3 buzas propuestas, se puede apreciar que esta zona es más estable para la presente buza ya que los cambios no son tan significativos como los presentados por las demás geometrías de buza propuestas, lo cual, puede ser comprobado al observar el comportamiento del flujo másico entregado por cada uno de los puertos, de donde se puede apreciar que esta buza entrega el flujo con una menor variación y mantiene dicha variación en uno solo de sus puertos evitando con esto que el flujo muestre entrelazamientos y por lo tanto que sus chorros oscilen, siendo este comportamiento presentado solamente por la buza propuesta.

Las tres anteriores muestran éste fenómeno de entrelazamiento, dando origen a las oscilaciones periódicas de los chorros, por lo que se considera que las fluctuaciones a nivel de micro escalas donde la presión y velocidad fluctuante no tienen efecto alguno sobre la estabilidad interna del fluido en el interior de la buza y sobre la estabilidad de los chorros en el interior del molde como el presentado por las tres modificaciones anteriores. Se determinaron nuevamente los campos de Re_T para los mismos planos, esto con el fin de confirmar lo antes discutido, los resultados son mostrados en la Fig. 5.36, en donde se hace nuevamente una comparación entre los contornos de Re_T para el diseño original, modificada I, modificada II y modificada III.

En ésta figura se puede apreciar claramente como a 22 cm de inmersión de la buza ésta disminuye el efecto de las micro escalas, en comparación a la buza original y modificada I, teniendo un efecto muy cercano al presentado por la buza modificada II, con lo cual, se descarta que sea la altura del divisor del puerto lo que pueda corregir los cambios en el comportamiento del flujo másico hacia cada uno de los puertos.

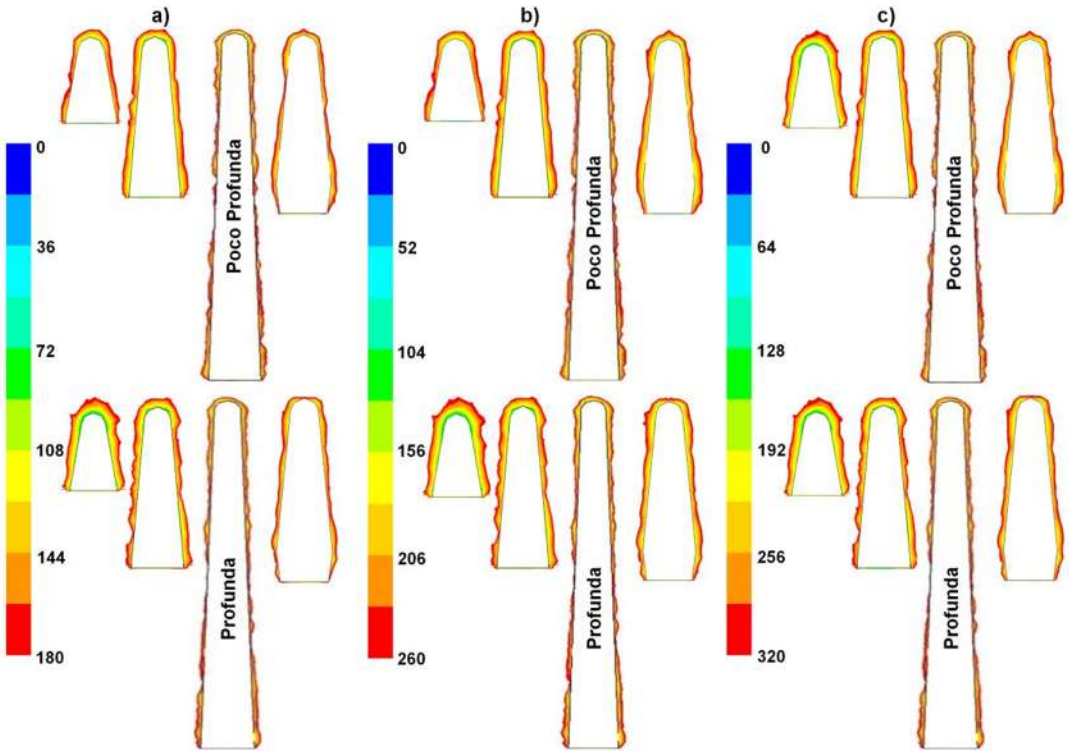

Figura 5.36. Comparación de los contornos del número de Reynolds turbulento en un plano simétrico central de la buza de izquierda a derecha original, modificada I, modificada II y modificada III a diferentes inmersiones de buza, 22cm parte superior y 34cm parte inferior de la imagen a distintas velocidades de colada. a) 4m/min, b) 6m/min y c) 8m/min.

Sí ahora observamos el efecto del Re_T a la inmersión de buza a 34cm se puede apreciar que éste además de disminuir con respecto al patrón mostrado a 22cm de inmersión de buza, efecto contrario al de las buzas original y modificada I y mostrando que el efecto de las micro escalas será muy parecido al mostrado por la buza modificada II, siendo la relación geométrica totalmente distinta del divisor de los puertos entre ambas buzas. Se puede asegurar que, aunque el flujo másico es mayor por uno de los puertos, éste no tendrá ningún efecto sobre el fenómeno oscilante de los chorros, ya que éste será suprimido por la homogeneidad del flujo y además a que no existe entrelazamiento en el flujo másico entregado por los puertos como lo hay en las otras buzas. Y es a este fenómeno al que se le puede atribuir tal problema.

Se comprueba así que la modificación propuesta elimina el efecto de la presión ferrostática sobre las micro escalas y sobre la transferencia de movimiento en el

interior de la buza, generando una entrega de metal más homogénea por ambos puertos y asegurando que los chorros al interior del molde sean más estables y libres de oscilaciones.

5.4.2. Efectos de la modificación III de la SEN sobre los patrones de flujo.

Con ésta modificación hecha a la buza se consigue igualar el coeficiente de variación en el flujo másico, esto con respecto a la modificación II de buza; lo que nos indica que la dispersión en los datos monitoreados será la misma, lo que se verá reflejado en una mejor estabilidad de los chorros.

Las Figs. 5.37 y 5.38 muestran los patrones de flujo para 22 y 34 cm de inmersión de buza. Como puede apreciarse se reduce considerablemente la separación de los chorros al compararse estos con los obtenidos con la buza original, modificada I y modificada II. Al comparar la profundidad de impacto de los chorros con la buza modificada II se aprecia que a 22cm de inmersión los chorros de ésta penetran menos con lo cual se asegura un menisco mejor alimentado y libre de fluctuaciones, mientras que a 34cm de inmersión la penetración para ambas buzas es muy similar, solo que la modificación II presenta oscilaciones de los chorros a la velocidad 8m/min, mientras que la modificación III se mantiene estable.

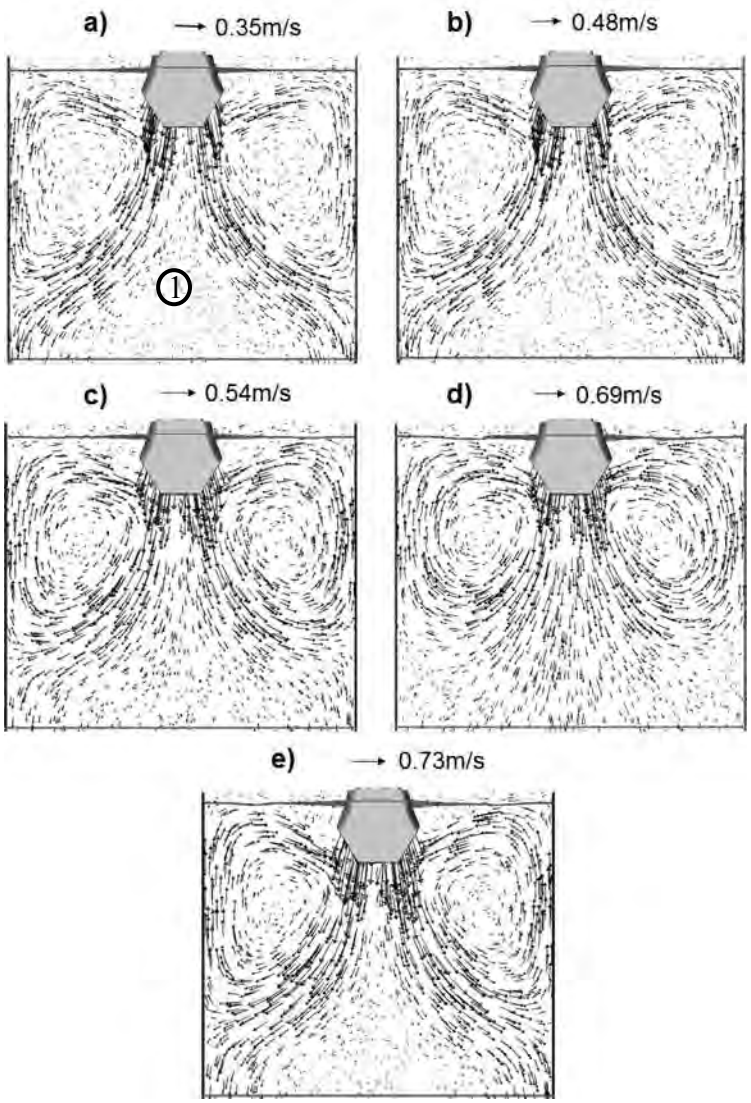

Figura 5.37. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada III a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

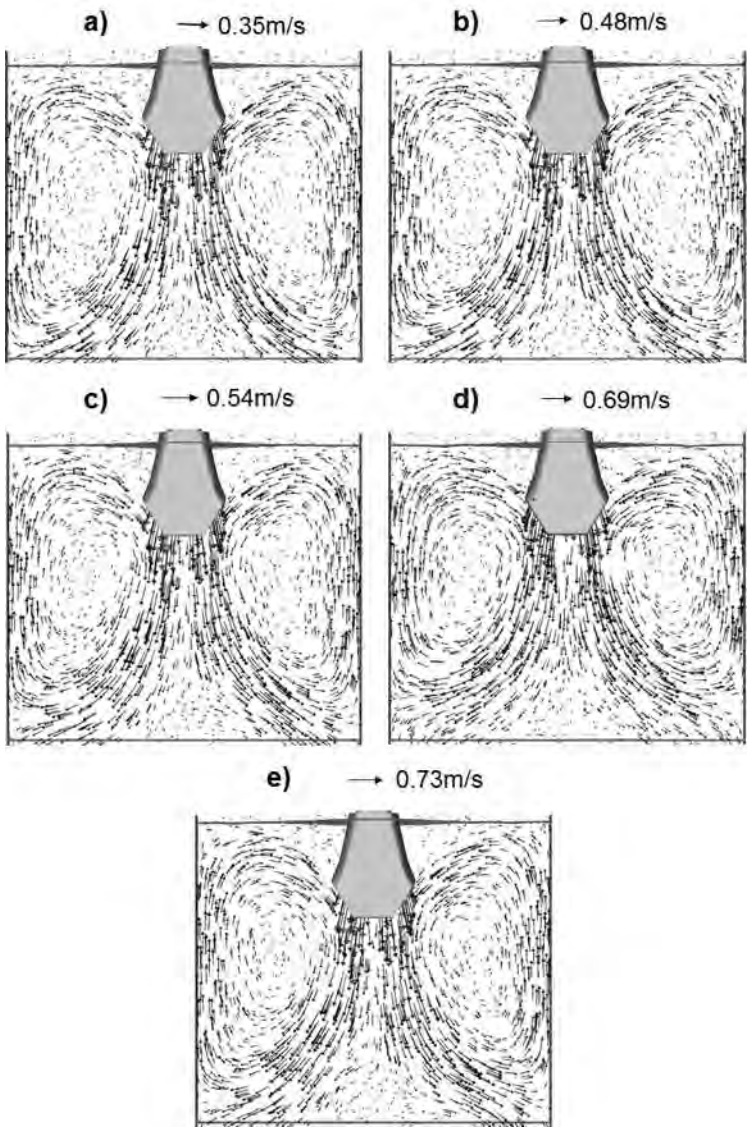

Figura 5.38. Vectores de velocidad en un plano simétrico central del molde, buza modificada III a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min

Ahora sí se hace la comparación con la modificación I la separación de los chorros es aún más pronunciada, lo cual deja espacio para que la distorsión dinámica se lleve a cabo, mientras que la buza III elimina este espacio tan pronunciado evitando con esto que el fluido recirculante del fondo del molde llegue a impactar la punta de la buza evitando con esto la formación de la distorsión dinámica. Este fenómeno se debe a que la geometría interna de ésta direcciona el flujo proveniente de los puertos hacia el centro del molde compartiendo así su energía hasta que la presión

ferrostática hace que éstos se separen y se incorporen a las recirculaciones inferiores y superiores del molde.

En cuanto a la penetración de los chorros a 22cm de inmersión de buza los chorros de la buza modificada I penetran ligeramente más, por lo cual la velocidad del fluido hacia el menisco es muy parecida, mientras que para 34 cm de inmersión los chorros de la Buza III penetran más que los de la modificada I existiendo diferencias marcadas sobre todo en el patrón de flujo entregado por cada una de éstas ya que la modificada I oscila en prácticamente todas las velocidades de colada utilizadas mientras que la geometría, Buza III, es bastante estable.

Para concluir con el análisis de esta geometría de buza propuesta, faltaría compararla con la buza original, en la cual como en la modificación I, se puede apreciar claramente que la separación de los chorros es muy similar al de esta última modificada I, punto ①, presentando el mismo fenómeno antes descrito en la punta de la buza y por debajo de ésta, por el cual la distorsión dinámica tiene mayor energía, provocando que la intensidad de las oscilaciones de los chorros sea mayor a medida que se incrementa la velocidad de colada, sobre todo cuando la inmersión de la buza es profunda (34cm).

Ahora sí examinamos la profundidad de impacto de los chorros provenientes de ambas buzas, se puede apreciar que a 22cm de inmersión de buza los chorros de la buza original penetran más profundo que la modificada III, teniendo una velocidad hacia el menisco muy parecida, aunque es mejor alimentada por esta última, Fig. 5.39. Mientras que para 34 cm de inmersión de buza, Fig. 5.40, los chorros de la modificada III penetran ligeramente más, lo cual, no tiene ningún efecto sobre la estabilidad de los chorros, esto debido a la supresión de la zona de formación de la distorsión dinámica. Mientras que la buza original, aunque penetran menos los chorros, ésta oscila desde la velocidad de colada de 5 m/min.

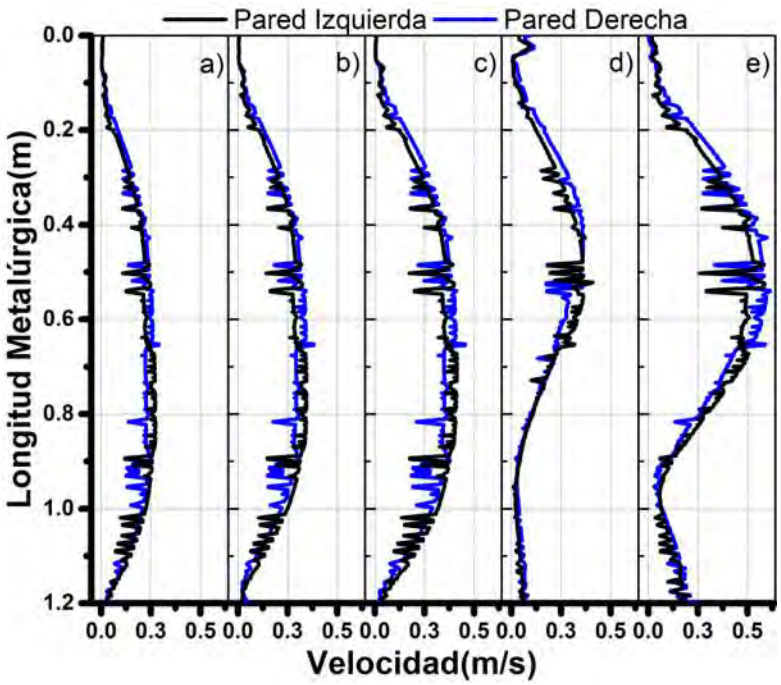

Figura 5.39. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 22cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

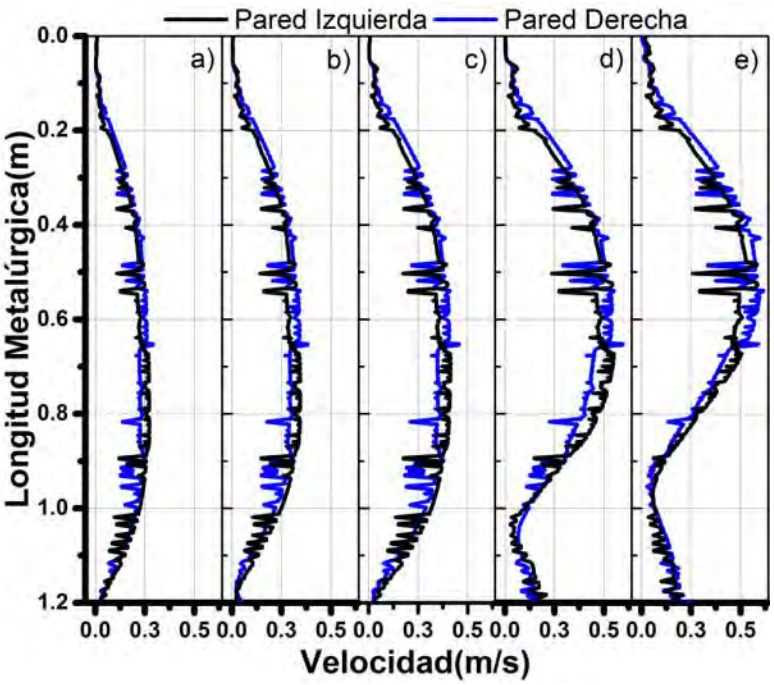

Figura 5.40. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde a inmersión de buza de 34cm. a) 4m/min, b) 5m/min, c) 6m/min, d) 7m/min y e) 8m/min.

Por lo que la estabilidad de los chorros es mejor para la buza modificada III a 22 cm de inmersión que para la original puesto que los chorros de esta última oscilan debido a las variaciones de la presión y la velocidad en las micro escalas en el interior de la buza el cual alimenta la formación de la distorsión dinámica, mientras que en la modificada III se reduce el efecto de las fluctuaciones en las micro escalas reduciendo el área por debajo de la punta de la buza y por lo tanto la distorsión dinámica.

En la Fig. 5.41 para 22 cm de inmersión de buza y para las distintas velocidades de colada se puede apreciar claramente que la buza modificada III alimenta mejor al menisco que la buza original para cada una de las velocidades de colada utilizadas, esto al igual que para la buza modificada I, aunque, esta presenta buena estabilidad en sus chorros el menisco sigue siendo mejor alimentado por la presente buza sin llegar a provocar inestabilidad en la interfase o fluctuaciones, por otra parte si ahora se observan los contornos presentados por la buza modificada II, se puede apreciar que esta buza tiene un comportamiento muy parecido al de la buza modificada III, 7m/min ya que como puede ser visto a la velocidad de 8m/min la buza modificada II presenta un menisco sobrealimentado, lo cual, puede traer consecuencias tanto en la estabilidad del menisco como en la limpieza del acero colado.

Mientras que para la profundidad de inmersión de buza de 34cm, Fig. 5.42, la buza modificada III muestra una mejor alimentación al menisco que la buza original y la buza modificada I, lo cual, es provocado por la oscilación más intensa de los chorros provenientes de la buza y a las fluctuaciones de la presión y la velocidad en el interior de la buza, que genera este fenómeno de oscilación.

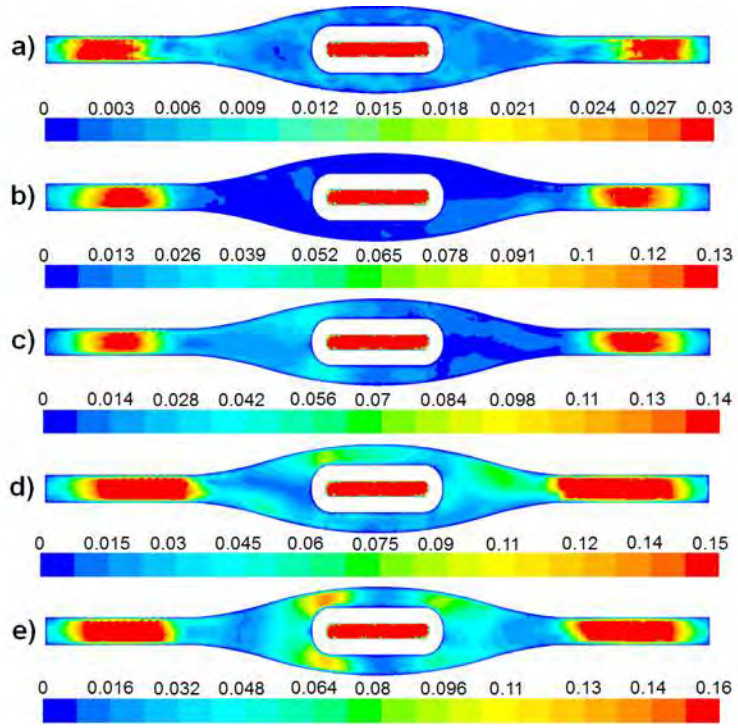

Figura 5.41. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 22cm. a) 4 m/min, b) 5 m/min, c) 6 m/min, d) 7 m/min y e) 8 m/min.

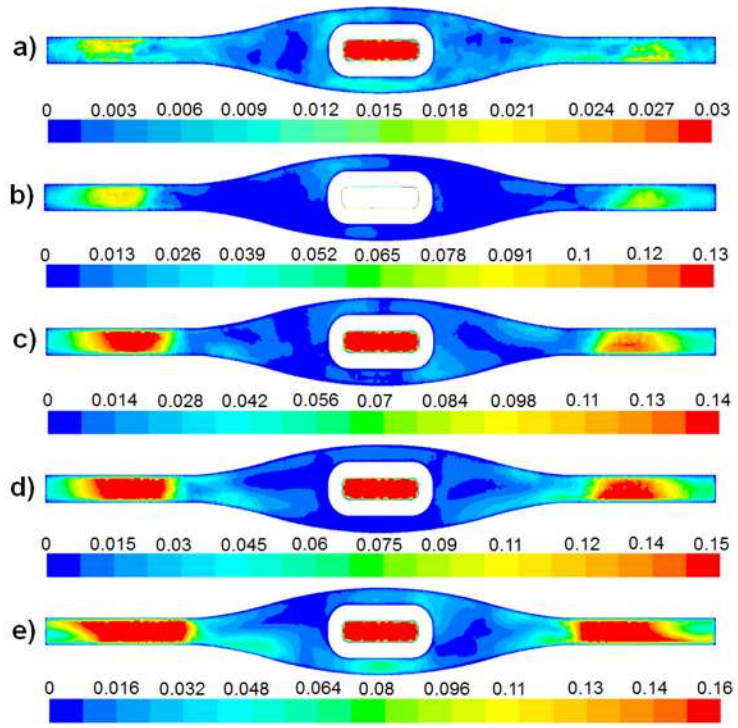

Figura 5.42. Contorno de velocidad al nivel del baño a inmersión de buza de 34cm. a) 4 m/min, b) 5 m/min, c) 6 m/min, d) 7 m/min y e) 8 m/min.

El comportamiento de la buza modificada II es muy parecido al de la buza modificada III para las cinco velocidades de colada: 4, 5, 6, 7 y 8m/min, siendo la diferencia entre éstas la profundidad de inmersión de los chorros al interior del molde, lo cual puede ser observado en las Figs. 5.31, 5.32, 5.41 y 5.42.

5.5. Validación del modelo matemático.

A continuación, se hace un análisis y la validación de los resultados obtenidos de la simulación matemática y la simulación física Para ello se hizo uso de la técnica del trazador, inyección de un colorante, en éste caso se utilizó permanganato de potasio como trazador para revelar el patrón de flujo provocado por la buza original a 34cm y 22cm de inmersión de buza y a velocidades de colada de 4, 5, 6 y 7 m/min al interior del molde.

En la Fig. 5.43 se muestra un comparativo de los patrones de flujo obtenidos tanto en la simulación matemática como en la física, en el cual se pueden apreciar tres puntos en los cuales hay cambios apreciables a distintos tiempos desde el comienzo de la inyección del trazador. En el inciso a) para un tiempo de 12s se puede apreciar el patrón común, de éste tipo de buzas compuesto, de dos recirculaciones superiores hacia la buza y dos inferiores hacia el fondo del molde, para este caso se puede observar que el chorro del lado izquierdo (punto 2) penetra ligeramente más que el del lado derecho (punto 1) esto para ambos casos (simulación matemática y física), lo cual, es provocado por la falta de uniformidad en la entrega del flujo por cada uno de los puertos y por la calle de vórtices formada debajo de la punta de la buza, la cual genera un intercambio de movimiento y energía con los chorros provocando con esto el ligero movimiento ascendente y descendente de estos (punto 3).

A esto se suma el efecto de las vórticidades generadas por las recirculaciones provenientes del fondo del molde y que son las causantes del desplazamiento de la zona de división del chorro principal en ambas recirculaciones disipando su energía en el punto 1, flecha, logrando hacer que este ascienda mientras que el camino de vórtices generado en la punta de la buza disipa su energía en forma descendente logrando hacer que el chorro del punto 2 descienda y por lo tanto haciendo que éste penetre ligeramente más.

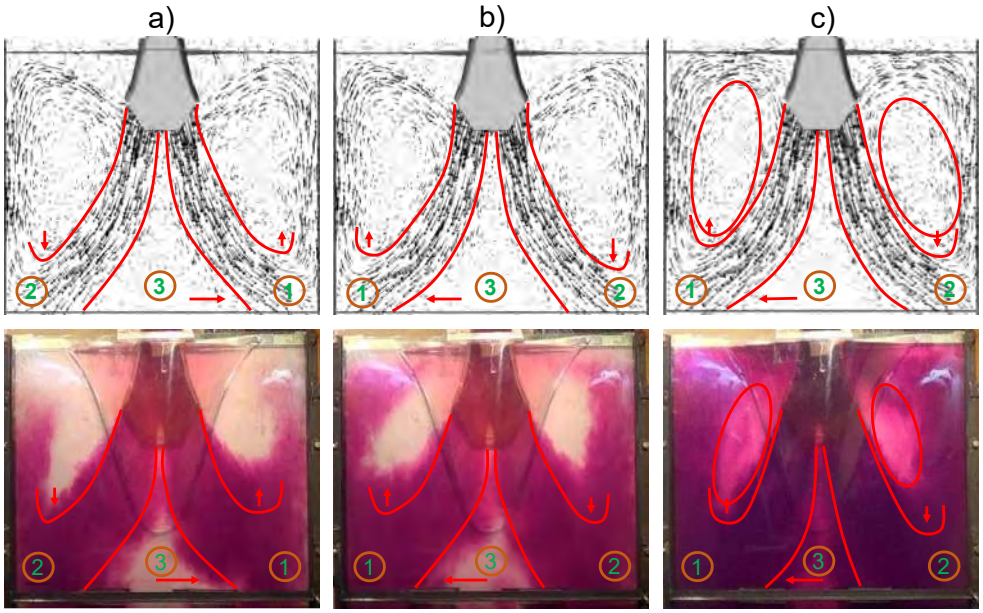

Figura 5.43. Modelo matemático (parte superior) y modelado físico (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Sucediendo lo contrario Fig. 5.43 b) ya que ahora es el chorro derecho el que desciende y el chorro izquierdo asciende siendo éstas mismas vórticidades las causantes de este desbalance energético el cual provoca el comportamiento turbulento del fluido al interior del molde.

Si ahora observamos la Fig. 5.43 c) se observa que muestra el mismo comportamiento anteriormente descrito del inciso b), solo que en éste podemos observar el efecto de este desbalance en la fluido-dinámica sobre las recirculaciones superiores en el interior del molde, como se puede apreciar a pesar de ser el punto 1, para el cual, el punto de impacto con la pared delgada del molde está ligeramente arriba, por lo cual esperaríamos que la recirculación sea más corta y de mayor velocidad, pero no sucede así, debido a que el fluido que se encuentra en capas superiores del molde no es afectado inmediatamente por los cambios en la transferencia de movimiento provenientes de las oscilaciones de los chorros en regiones del fluido más profundas en el interior del molde, sucediendo con esto lo contrario en lado opuesto ya que aunque la región de impacto del chorro sea a menor profundidad del molde, éste tardará un instante de tiempo en que la

transferencia de movimiento tenga efecto en capas superiores del fluido en el molde, incluso esto después de que la altura de impacto del chorro se haya intercambiado.

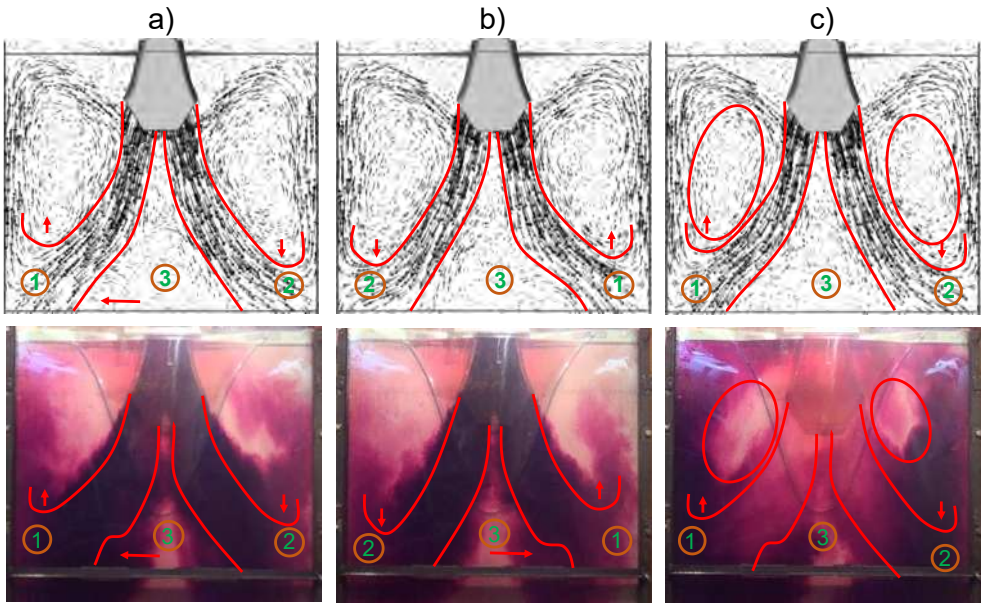

Figura 5.44. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 5m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Ahora si observamos la Fig. 5.44 en donde se muestran en la parte superior los vectores tomados de la simulación matemática y en la parte inferior la inyección del trazador al molde para distintos tiempos y una velocidad de colada de 5m/min y 34cm de inmersión de buza, se puede apreciar que el fenómeno mostrado anteriormente sigue siendo el que predomina.

En la Fig. 5.44 a) se pueden observar que los chorros siguen oscilando, como se puede apreciar el punto 1 el líquido penetra menos comparado con el chorro del punto 2, siendo el comportamiento turbulento presentado en la región del punto 3, el cual ocasiona la inestabilidad de los chorros. Esto puede ser constatado al analizar la Fig. 5.44 b) y como se puede apreciar, punto 1, el chorro penetra menos, mientras que para el punto 2 éste penetra más, encontrándose éstos en lados opuestos, comparados con la Fig. 5.44 a); volviendo a adquirir el mismo comportamiento después de un lapso de tiempo transcurrido, de Fig. 5.44 a al c), donde nuevamente es lado izquierdo, Fig. 5.44 c) en el cual el chorro penetra menos (punto1) mientras del lado derecho el chorro penetra más. Manteniéndose que el

tamaño de la recirculación es mayor para cuando el chorro penetra menos que para cuando éste penetra, más fenómeno que ha sido descrito anteriormente y que está directamente relacionado con la generación de vórticidades tanto desde la punta de la buza hasta donde el chorro penetra. Como los formados por las recirculaciones proveniente desde el fondo del molde hasta encontrarse con los proveniente de la punta de la buza.

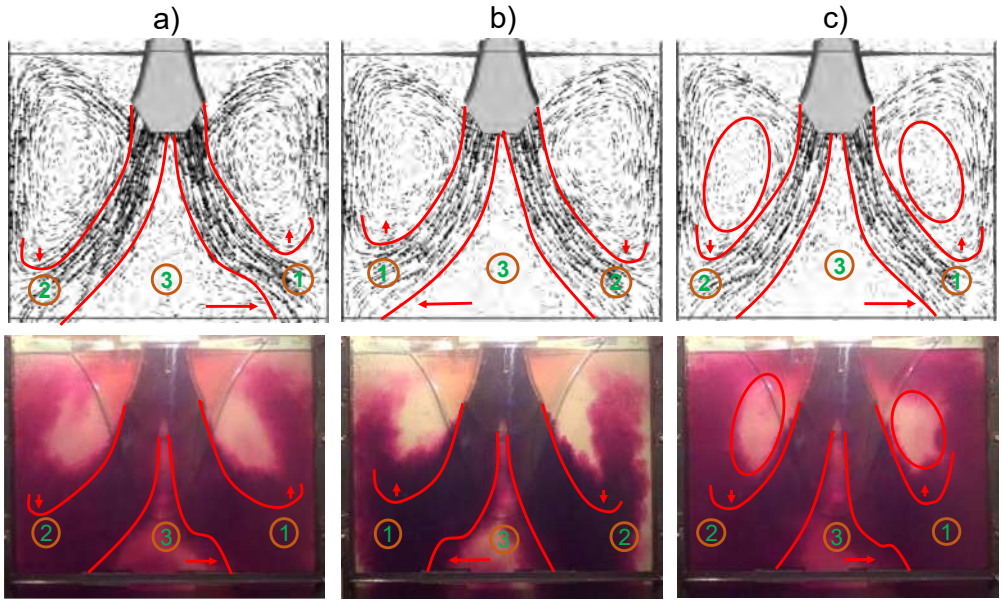

Figura 5.45. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 6m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Se puede apreciar en la Fig. 5.45, que las oscilaciones de los chorros son más intensas y se dan en lapsos de tiempo más cortos comparados con las figuras anteriores lo cual es ocasionado por el incremento en la velocidad, así como también al intercambio energético en la punta del divisor de los puertos al interior de la buza.

En la Fig. 5.45 a), se puede ver como el lado derecho del chorro, punto 2, penetra más hacia el interior del molde mientras el chorro izquierdo penetra menos, fenómeno que está relacionado con las vórticidades formadas en el punto 3, dichas vórticidades aunadas a el desbalance energético en el interior de la buza son las

que ocasionan la oscilación periódica de los chorros. Incrementando su efecto sobre éstos al incrementar la velocidad de colada.

Ahora por el contrario en la Fig. 5.45 b) es el chorro izquierdo el que penetra más, punto 2, mientras el chorro derecho penetra menos, punto 1, continuando con la periodicidad de la oscilación de los chorros. Invirtiéndose nuevamente este sentido en el inciso c) donde ahora es el chorro derecho el que penetra más, punto 2, mientras que el chorro izquierdo penetra menos, punto 1. Teniendo un comportamiento diferente las recirculaciones superiores al presentado en las Figs. 5.43 y 5.44 ya que el tamaño de la recirculación es mayor cuando el chorro penetra más que cuando éste penetra menos, lo cual, es ocasionado por la velocidad de intercambio en la oscilación de los chorros debido al incremento en la velocidad y por ende de la turbulencia.

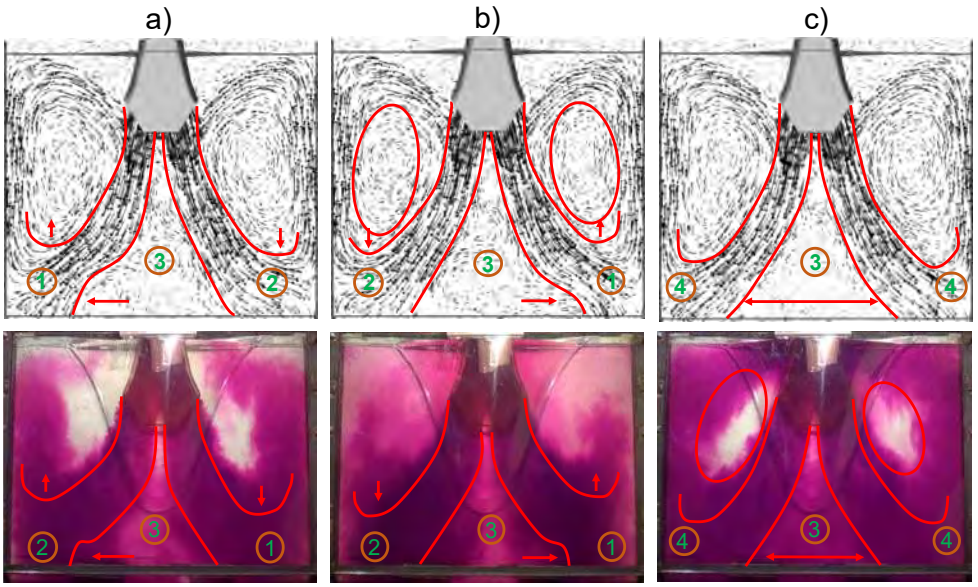

Figura 5.46 Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 7m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Para concluir con el análisis para 34cm de inmersión de buza y para una velocidad de colada de 7m/min, Fig. 5.46, se observa un incremento en la transferencia de movimiento de los chorros del fluido al interior del molde, provocado principalmente por el desbalance energético al interior de la buza lo que induce un incremento en la difusividad del trazador y en la oscilación de los chorros.

En la Fig. 5.46 a), se puede observar que el chorro del lado izquierdo, punto 1, penetra menos comparado con el chorro del lado izquierdo punto 2. Siendo más pronunciada la deformación de éstos debido a que ésta anomalía antes expuesta en los resultados de la simulación matemática en el interior de la buza es más rápido, por lo cual, el fenómeno de la formación continua de vórticidad que toma lugar en el punto 3 es más intenso provocando que la oscilación de los chorros sea de mayor intensidad. Siendo el mismo fenómeno y comportamiento para el trazador mostrado en la parte inferior del inciso a) en el que se puede apreciar que el trazador a difundido con mayor velocidad del lado derecho que del izquierdo, lo cual, es provocado por la colisión de la vórticidad que proviene tanto del fondo del molde como desde la punta de la buza colisionando estos en el punto 2 deformando el chorro y la altura de impacto de este con la pared delgada del molde.

Al observar la Fig. 5.46 b), se puede apreciar claramente que el sentido de la oscilación es ahora inverso ya que ahora el chorro izquierdo es el que penetra más (punto 2), mientras el lado derecho penetra menos lo cual se da debido al fenómeno turbulento presentado en el punto 3, presentando el mismo comportamiento la figura del trazador para este mismo caso. En cuanto al comportamiento de las recirculaciones superiores se puede apreciar en los vectores la Fig. 5.46 b) y para el trazador la Fig. 5.46 c) parte inferior, como, a diferencia de la Fig. 5.43 y 5.44, el tamaño de la recirculación es mayor para cuando el chorro penetra más que cuando éste penetra menos.

Esto está relacionado al igual que en la figura 5.45, al incremento de la velocidad y la turbulencia la cual se origina en la parte interna de la buza lo que ocasiona cambios más rápidos en el patrón de flujo interno del molde, así, como en los tiempos de mezclado.

A diferencia del comportamiento mostrado en las figuras 5.43, 5.44 y 5.45 inciso c) para éste caso se puede apreciar, cómo para éste tiempo, el patrón de flujo es simétrico, punto 4, siendo éste un tiempo en el que los chorros tienen la misma altura de impacto y penetración, además quedando demostrado que en la zona del punto 3 hay instantes de tiempo en los cuales la formación de vórticidad desaparece

hasta que nuevamente se da el desbalance energético en el interior de la buza regresando con esto la inestabilidad interna del flujo.

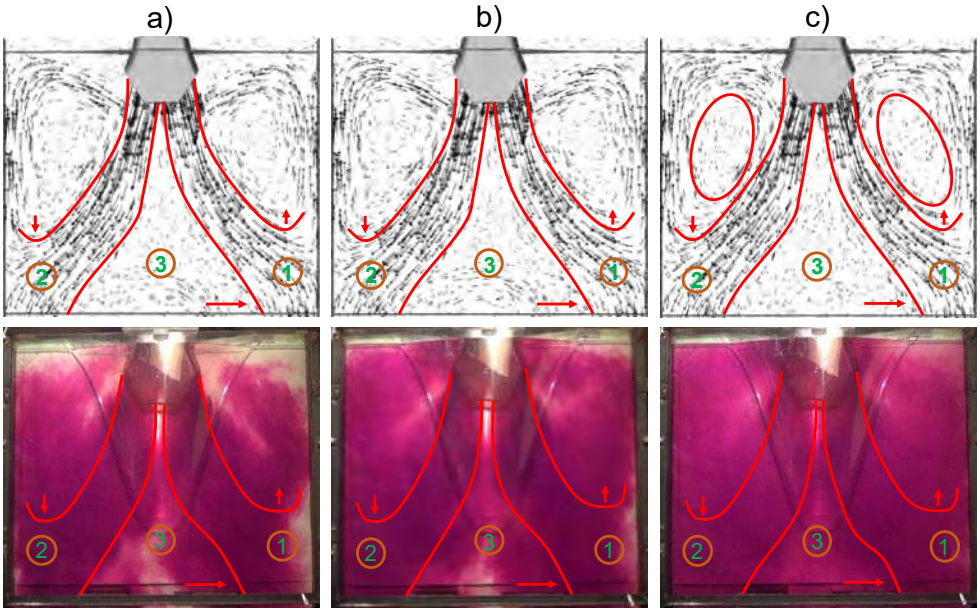

Figura 5.47. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Por otra parte, se hace el análisis de la misma buza, pero ahora para una profundidad de inmersión de 22cm a velocidades de colada de 4, 5, 6 y 7 m/min, Figs. 5.47, 5.48, 5.49 y 5.50. En éstas se muestran los vectores de velocidad en la parte superior y la inyección de trazador en la parte inferior, a tres diferentes tiempos. Se observan tres zonas en las cuales existen cambios claramente apreciables en el patrón de flujo al interior del molde.

En la Fig. 5.47 a), se puede apreciar como el chorro del lado derecho, punto 1, penetra menos que el chorro del lado izquierdo, punto 2, lo cual, está directamente relacionado con la entrega de flujo por cada uno de los puertos, siendo éste mayor para el puerto del lado izquierdo, lo que ocasiona esta diferencia en las alturas de penetración de los chorros. Esto aunado a la deformación ocasionada por la vórticidad generada por las recirculaciones inferiores del molde, que afectan ambas zonas del punto 3, desplazando el fluido hacia el lado izquierdo y por lo tanto incrementando la altura de impacto de éste chorro. Este mismo comportamiento prevalece para la Fig. 5.47 b) y c), siendo la altura de impacto del chorro mayor para

el lado derecho que para el lado izquierdo y prevaleciendo la anomalía que ocasiona este fenómeno turbulento, descrito anteriormente en la zona del punto 3.

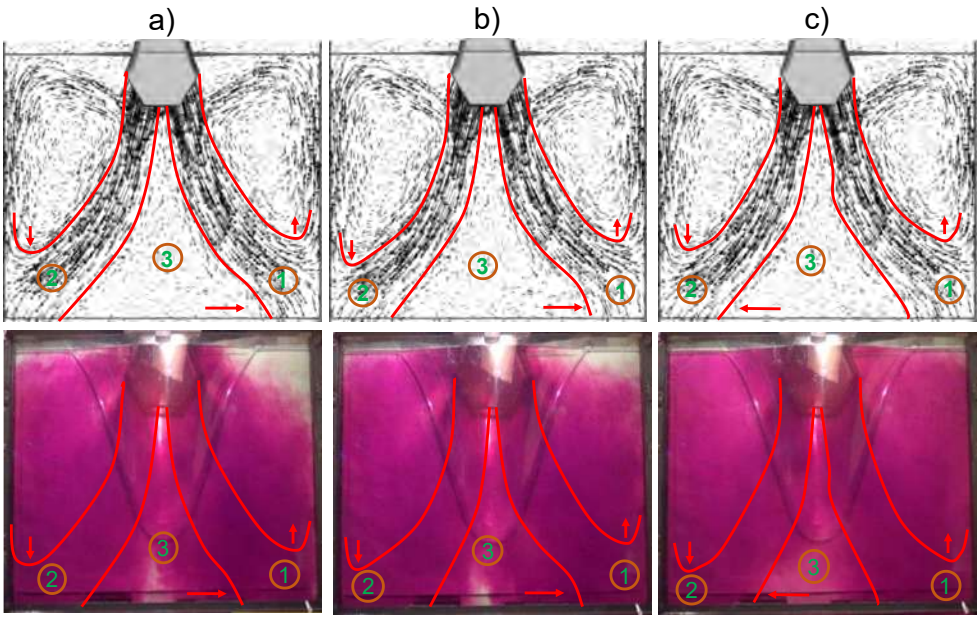

Figura 5.48. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

Analizando ahora la Fig. 5.48 se puede apreciar que al igual que el comportamiento de la Fig. 5.47, el patrón de flujo tiene, como uno de sus orígenes, el fenómeno energético dado en el interior de la buza, el cual, para este caso provoca un mayor flujo por el puerto izquierdo comparado al entregado por el puerto derecho, fenómeno que ocasiona que la profundidad de inmersión del chorro y su impacto sean mayores para el chorro del lado derecho, punto2, que, para el chorro derecho, punto 1. Este comportamiento se repite en la Fig. 5.48 para los tres incisos (a), b) y c) y para ambos casos, simulación matemática y física, en los distintos tiempos.

Además, el fenómeno en el interior de la buza antes mencionado, que provoca una diferencia en el flujo entregado por cada uno de los puertos, también propicia que la vórticidad generada en las recirculaciones provenientes del fondo del molde disipen su energía en algunos de los dos chorros, sin lograr tener un efecto tan marcado en estos como para el caso de inmersión de la buza a 34cm. Además del desbalance de flujo entregado por cada uno de los puertos, la formación de las

vórticidades tanto en la parte superior del molde como en la parte inferior afecta la estabilidad de los chorros.

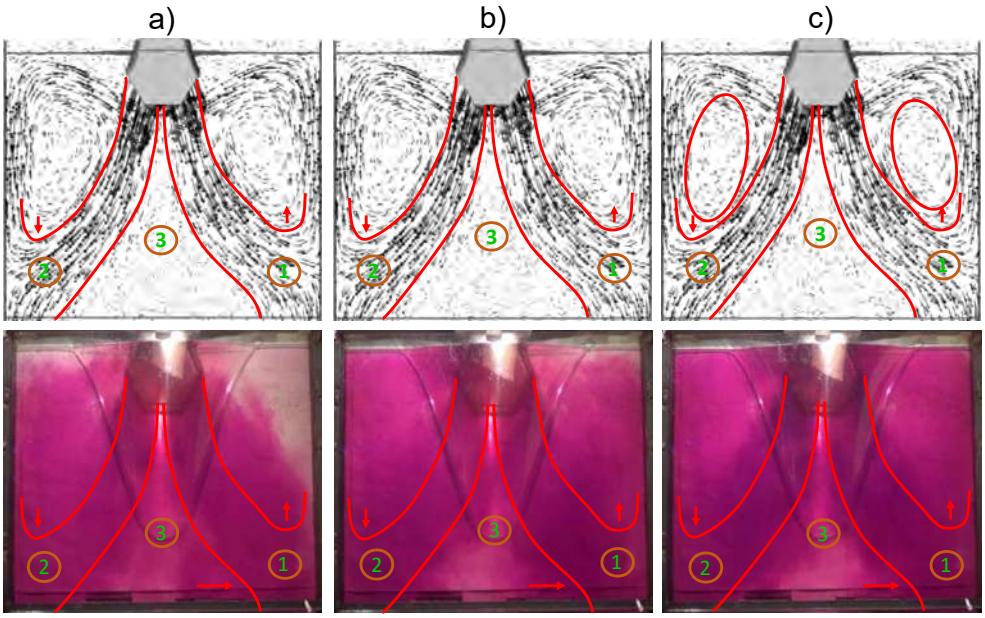

Figura 5.49. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

En la Fig. 5.49 incisos (a), b) y c)), se puede apreciar que el comportamiento es el mismo, penetrando más el chorro del lado izquierdo, punto 2, por lo que la altura de impacto sobre la pared delgada del molde será menor comparada con la altura de impacto del chorro del lado derecho, punto1, el cual penetra menos. Dicho comportamiento está relacionado como se ha explicado antes con el comportamiento energético en el interior de la buza, provocando que se tenga una entrega de flujo mayor por el puerto izquierdo que por el puerto derecho, induciendo que el chorro izquierdo penetre más, esto aunado a la disipación de energía por las vórticidades provenientes de la punta de la buza, las cuales tienen un sentido preferencial, siguiendo éstas al chorro con mayor flujo. Mientras tanto la vórticidad generada por las recirculaciones creadas en el fondo del molde disipa su energía en el chorro con menor flujo.

Por otra parte, como se puede apreciar en los tres incisos, la recirculación del lado izquierdo siempre es mayor que la del lado derecho, lo cual está íntimamente ligado con el flujo entregado por cada uno de los puertos.

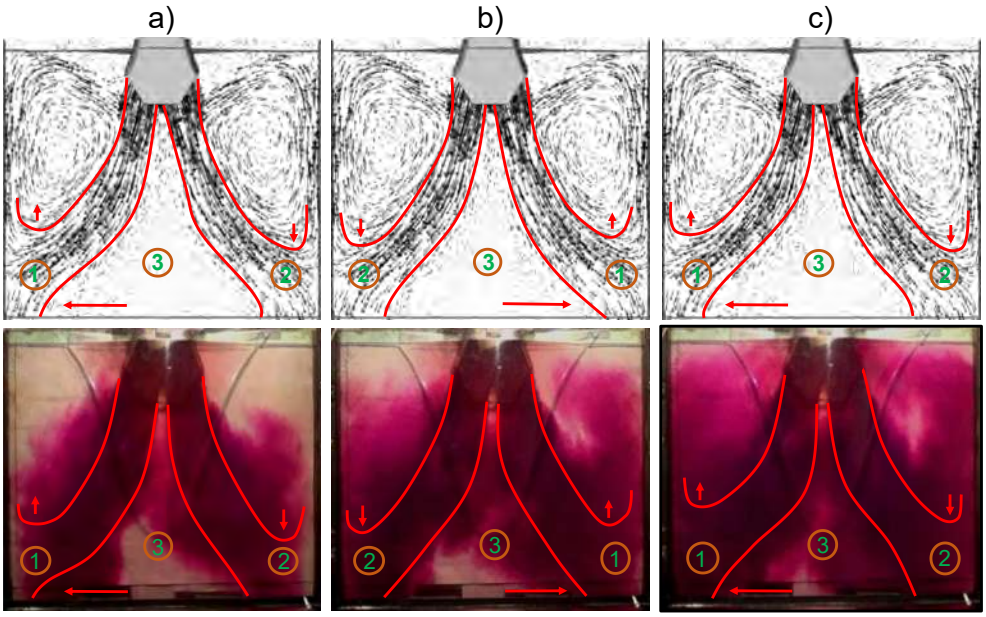

Figura 5.50. Vectores de velocidad (parte superior) e inyección de trazador (parte inferior) en un plano simétrico central del molde a 34cm de inmersión de buza y 4m/min de velocidad de colada diferentes tiempos, inciso a) 14s, b) 18s y c) 22s.

En la Fig. 5.50 se pueden observar en la parte superior los vectores de velocidad para un plano longitudinal al centro del molde y en la parte inferior se muestra la inyección de trazador para un tiempo de 14s, 18s y 22s, Fig. 5.50 incisos a), b) y c) respectivamente. En la Fig. 5.50 a) se puede observar que el chorro del lado derecho penetra más que el del lado izquierdo, por lo que será el chorro izquierdo, punto 1, el que impacte más arriba sobre la pared delgada del molde, comparado con el del lado derecho, punto 2. Comportamiento que se observa en el modelado físico con la inyección del trazador, Fig. 5.50 a), parte inferior.

Por otra parte, al analizar el inciso b) se puede apreciar como el comportamiento de éste es inverso al del inciso a) ya que ahora es el chorro del lado derecho, punto 1, el que penetra menos y el chorro del lado izquierdo más, punto 2. Por lo que ahora será el impacto del chorro izquierdo más profundo comparado al del lado derecho, dicho comportamiento está relacionado principalmente con la cantidad de flujo entregada por cada uno de los puertos ya que a esta velocidad de colada comienzan a haber cambios en la entrega de flujo por cada uno de los puertos, lo que conduce a oscilaciones periódicas de los chorros.

En la Fig. 5.50 c) se puede apreciar que tenemos el mismo comportamiento del inciso a) siendo menos profundo el impacto del chorro sobre la pared delgada del lado izquierdo, punto 1, que el presentado por el chorro del lado derecho para el cual tanto su penetración como el lugar de impacto es menos profundo siendo este fenómeno provocado por el fenómeno generado al interior de la buza antes expuesto. En lo que respecta al punto 3 se puede apreciar la generación del camino de vórtices, proveniente del desprendimiento del flujo de la parte de la división de los puertos, sumándose la vórticidad generada por las recirculaciones provenientes del fondo del molde.

La vórticidad proveniente de la división de los puertos disipa su energía sobre el chorro con mayor flujo contribuyendo a que el chorro penetre más, mientras que la vórticidad generada en el fondo del molde disipa su energía en el chorro con menos flujo contribuyendo con esto a que éste penetre menos. Esto se repite para cada uno de los casos y para cada una de las velocidades.

Como se puede apreciar, en las discusiones de cada una de las figuras anteriores, el comportamiento de cada una de éstas coincide con los fenómenos presentados con anterioridad. Sucede lo mismo con los fenómenos generados a partir del análisis de la inyección del trazador. Se tuvo una muy buena aproximación con los resultados obtenidos con la simulación matemática en un modelo 1:1 con la simulación física en un modelo 1:½, validando con esto la simulación matemática. Se puede concluir que el modelo construido en base a los criterios de similitud, obtenidos a partir del número Froude, genera resultados confiables y reproducibles.

5.6. Validación del uso del acelerómetro.

Se hicieron ensayos, con un modelo de agua, para validar la utilidad y sensibilidad de un sensor para medir de manera indirecta la energía liberada sobre las paredes del molde de colada continua de planchón delgado por el movimiento del acero en el interior del mismo y correlacionarlo con la oscilación de los chorros provenientes de los puertos de la buza. Para ello se hizo uso de un acelerómetro del tipo piezoeléctrico y una tarjeta DAQ para digitalizar la señal analógica del mismo.

Basándose en los resultados de la simulación física, fue posible analizar y determinar que existe una relación que es directamente proporcional entre el incremento en el nivel de vibraciones del molde y el incremento en la velocidad de colada continua. Esta relación es mostrada en la Fig. 5.51. Los resultados fueron obtenidos mediante el monitoreo continuo, para cada uno de los flujos volumétricos mostrados en esta figura, durante un tiempo de 210s. La señal digitalizada fue normalizada, se le sustrajo el ruido de fondo y a continuación se le hizo una integración matemática utilizando el método de Simpson de los 3/8, para obtener así un valor neto de vibración equivalente a la energía disipada en un cierto punto de la pared del molde, previamente definido.

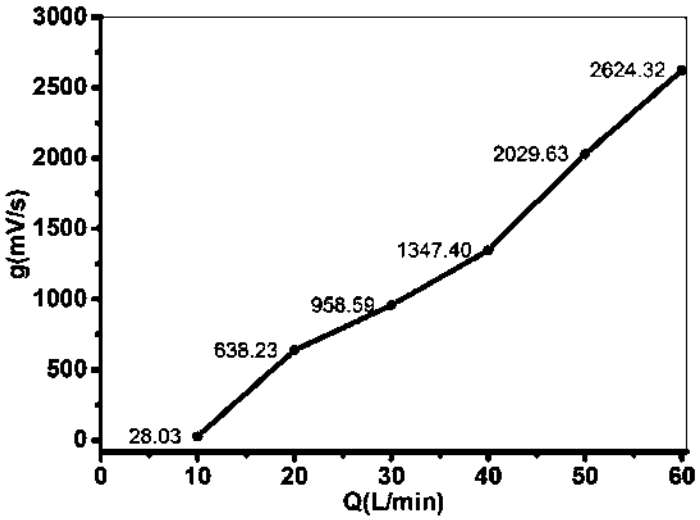

Figura 5.51 Magnitud de las vibraciones en función del flujo volumétrico.

De la información obtenida en la fase de la simulación matemática, se hizo un análisis para observar cómo se comporta el fluido sobre las paredes delgadas del modelo, en la Fig. 5.52 se muestran los puntos dónde el sensor fue colocado para las diferentes condiciones de colada llevadas a cabo en el modelo físico.

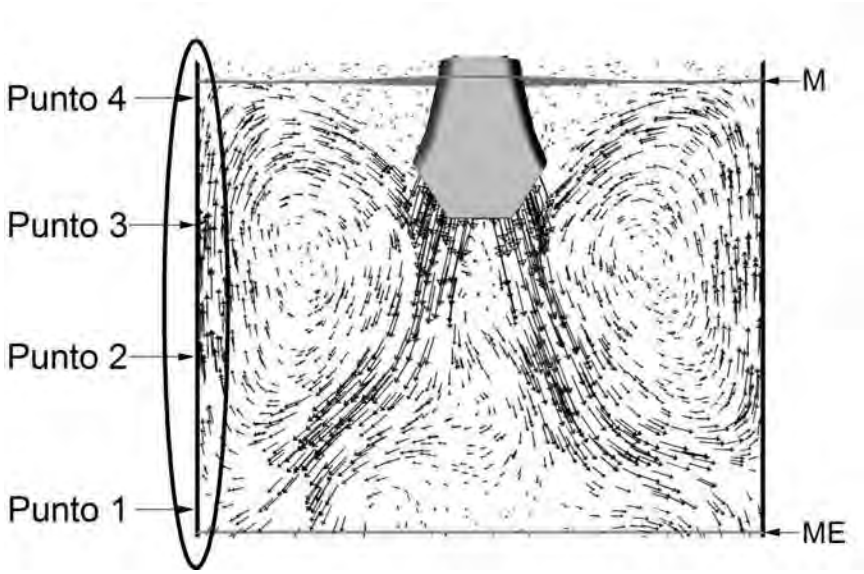

Figura 5.52. Lugares donde el transductor fue colocado.

En la Fig. 5.53. Se muestran las diferentes velocidades de colada, 6, 5 y 4 m/min, y los puntos donde el acelerómetro fue colocado.

Como era de esperarse para altas velocidades de colada, equivalente a altas velocidades del flujo, existe un incremento en las vibraciones sobre las paredes del molde, lo que se puede interpretar como una mayor disipación de energía.

Tomando como referencia los puntos 1, 2, 3 y 4, Fig. 5.52, con respecto a la digitalización de las señales del acelerómetro, se observan diferentes niveles de vibraciones para las tres velocidades de colada utilizadas. En las Figs. 5.54 y 5.55 se muestran las señales del acelerómetro, que corresponden con los cuatro puntos seleccionados en el molde.

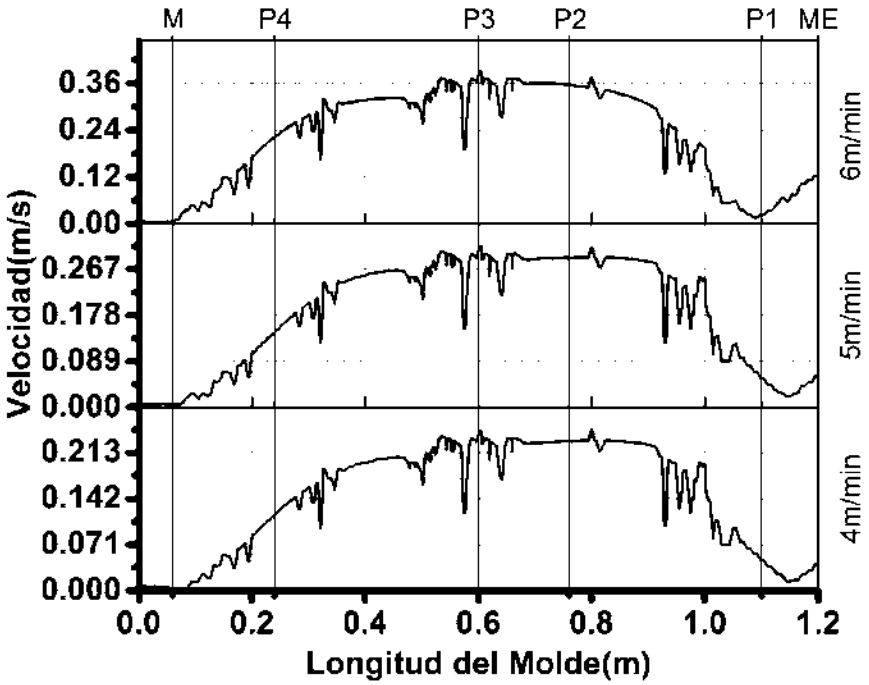

Figura 5.53. Perfil de velocidad en una línea trazada sobre la cara estrecha del molde y lugares donde el transductor fue colocado.

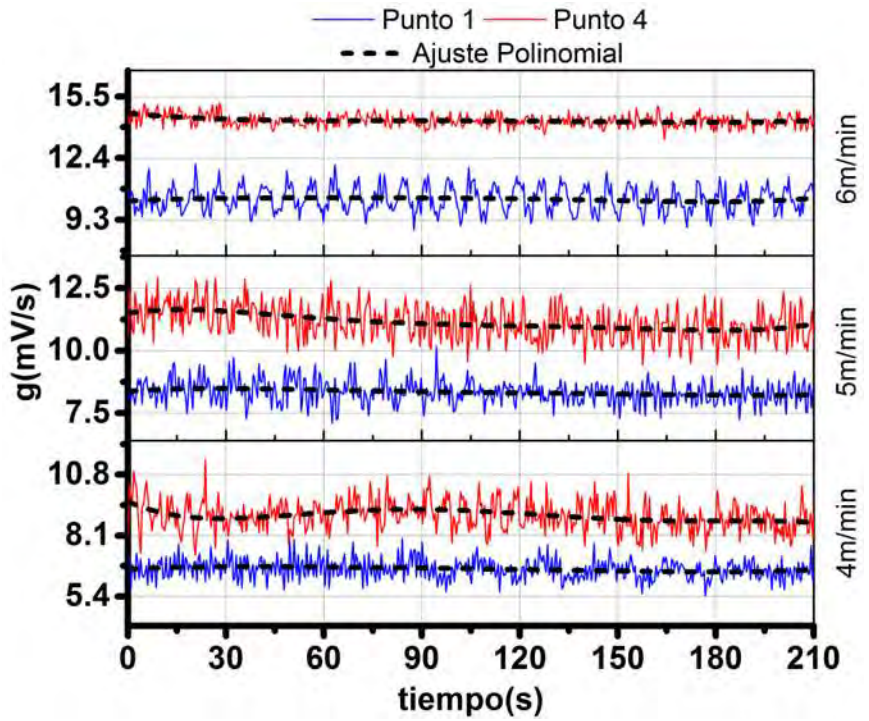

Figura 5.54. Comparación de los niveles de vibraciones a distintas velocidades y diferentes posiciones sobre la pared delgada del molde (Puntos 1 y 4).

Como se puede observar, a mayores velocidades de colada, mayores son los valores de las vibraciones alcanzadas, esto debido a que ocurre una mayor actividad del fluido dentro del molde. Otro aspecto importante a analizar es que, la lógica muestra que el punto 1, Fig. 5.54, es en donde se esperaría obtener la señal más intensa de vibraciones ya que éste se encuentra situado en el área donde el chorro de fluido impacta directamente. Sin embargo, en realidad esta zona es de poca actividad ya que el fluido proveniente de la buza no impacta directamente, sino que éste se incorpora a las recirculaciones tanto superior como inferior del patrón de flujo presentado en el interior del molde.

Enfocando la atención a la recirculación superior se puede apreciar que el flujo más que disipar su energía, incrementa su velocidad debido al esquema de mezclado que presenta, además de mantener el equilibrio mecánico. La intensidad de las vibraciones en el punto 4 es de mayor intensidad al que se detecta en el punto 1, esto se debe a que el punto 4 está posicionado en una región de mayor velocidad sobre la pared delgada del molde. También se observa que éste se encuentra posicionado en una zona donde el fluido se comienza a separar de la pared delgada, debido a su incorporación a la recirculación en dirección a la zona del embudo del molde, donde se encuentra la buza, reduciendo con esto tanto su velocidad como la intensidad de las vibraciones.

El punto 1 al encontrarse situado por debajo o ligeramente por encima de la zona de impacto de los chorros, del fluido provenientes de los puertos de la buza, siendo ésta una zona con una velocidad casi nula y por consiguiente las vibraciones apenas son detectadas. La causa de lo anteriormente mencionado es debida a la oscilación de los chorros, afectando la intensidad de las vibraciones sobre éste y los otros puntos monitoreados.

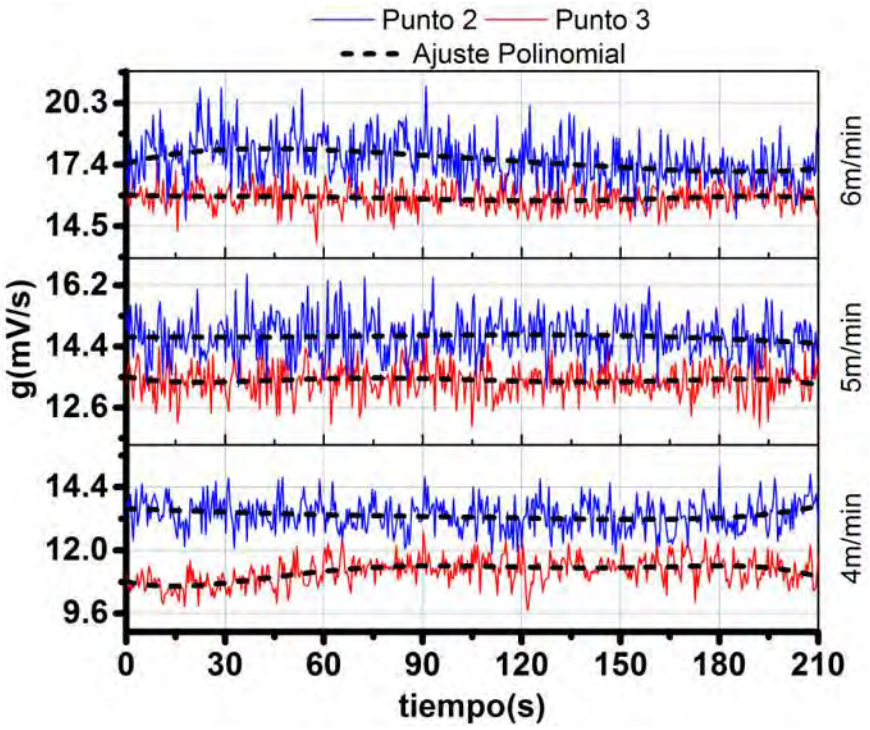

Figura 5.55. Comparación de los niveles de vibraciones a distintas velocidades y diferentes posiciones sobre la pared delgada del molde (Puntos 2 y 3).

En el punto 2 Fig. 5.55, posicionado a 34cm por encima del área de impacto del chorro con la pared delgada, punto 1, es en donde el fluido comienza a tomar velocidad en su ascenso hacia el menisco, debido a la transferencia de movimiento provocada por los chorros provenientes de los puertos de la buza.

Muestra que aunque la velocidad es ligeramente menor a la del punto 3, Fig. 5.53, no lo es así para la disipación de energía cinética turbulenta, por lo cual, la intensidad de las vibraciones será mayor para el punto 2 que para el punto 3 ya que existe mayor fricción del fluido con la pared delgada del molde, lo cual, puede incrementar el lavado de la costra de acero recién solidificado incrementando el riesgo de un posible rompimiento de hilo y además presenta la zona de mayor velocidad en la recirculación del fluido hacia la zona del menisco.

Para asegurar que los resultados mostrados en las Figs. 5.54 y 5.55 son confiables y que la intensidad de las vibraciones medida sobre la pared delgada del molde en el modelo físico, guardan una relación directa tanto con los chorros provenientes de los puertos de esta buza como con la disipación de la energía cinética turbulenta,

medida a 5 mm de la pared delgada del molde en un plano central haciendo uso de la simulación matemática, se hicieron tres gráficos, cuyos resultados son mostrados en las Figs. 5.56, 5.57 y 5.58 para tres diferentes tiempos: 190s, 200s y 210s, a tres diferentes velocidades de colada 4, 5 y 6m/min para ambas escalas, utilizadas tanto en la simulacion fisica como en la simulacion matematica, Tabla V-I.

Tabla V-I. Posiciones del transductor sobre la pared delgada, de acuerdo a la escala usada para la simulación física, 1:½ y modelación matemática, 1:1.

Posición del Transductor	Simulación Física(m)	Simulación Matemática(m)
M (Menisco)	0.03	0.06
Punto 4 (P4)	0.12	0.24
Punto 3 (P3)	0.3	0.6
Punto 2 (P2)	0.38	0.76
Punto 1 (P1)	0.55	1.1
ME (Fin del Molde)	0.6	1.2

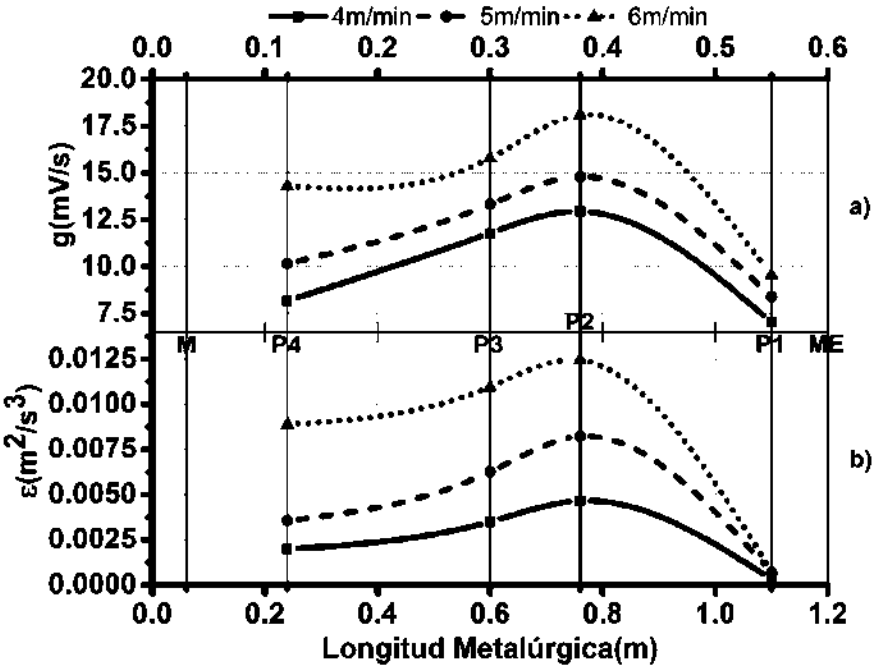

Figura 5.56. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 190s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática.

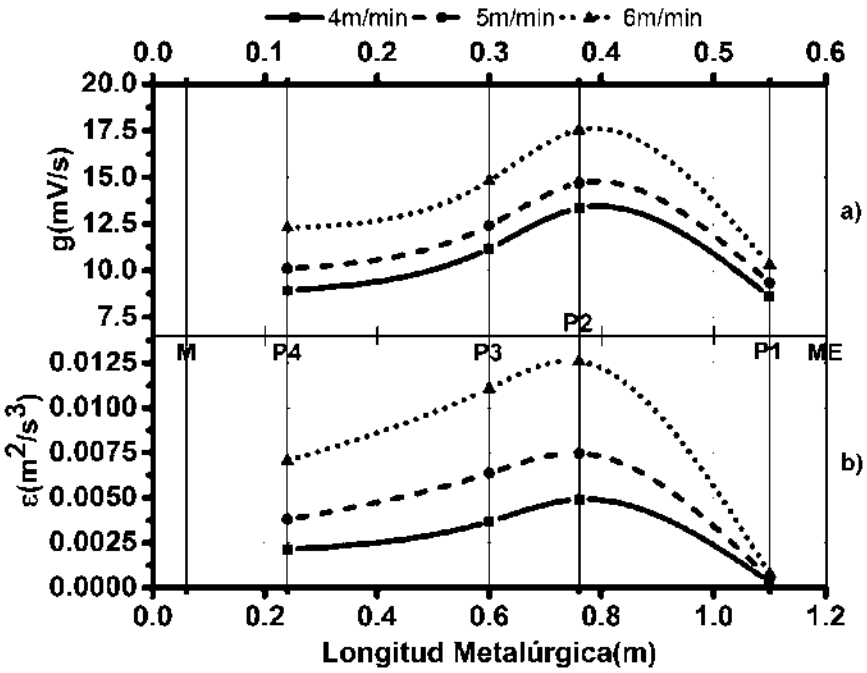

Figura 5.57. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 200s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática.

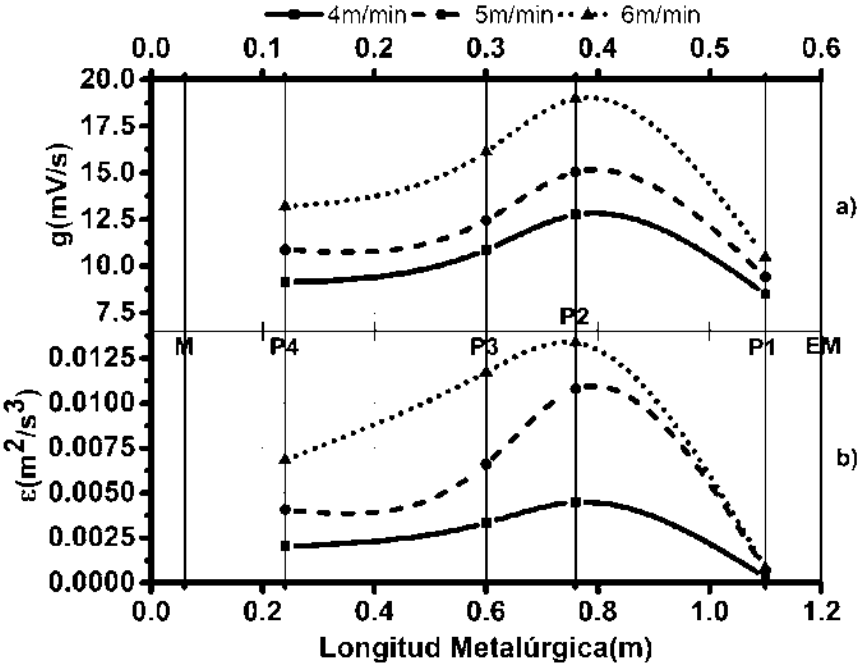

Figura 5.58. Intensidad de las vibraciones y perfil de la relación de disipación turbulenta en una línea trazada sobre la cara delgada del molde a un tiempo de 210s y lugares donde el transductor fue colocado para la a) simulación física y b) simulación matemática.

Analizando la Fig. 5.56, 5.57 y 5.58 se observa que el punto mas cercano al final del molde (ME) es el punto 1, en el cual, se puede apreciar claramente que la disipacion turbulenta (b) en este punto es muy cercana a cero ya que no existe friccion directa del fluido con la pared delgada del molde siendo mas bien esta zona una region estancada del fluido. Ahora, sí observamos la intensidad de las vibraciones (a) al igual que la disipacion, muestra poca actividad en esta zona aunque ésta se incremente ligeramente con el incremento en la velocidad de colada algo que es logico de acuerdo con la Fig. 5.51.

En el punto 2, Figs. 5.56, 5.57 y 5.58, se puede apreciar claramente que tanto la disipacion de energia cinetica turbulenta como la intensidad de las vibraciones es mayor en esta zona, lo cual, es un indicativo de que es en ésta zona donde existe una mayor friccion del fluido con la pared delgada del molde y por lo tanto un mayor lavado de la costra de acero recien solidificado, reduciendose las vibraciones gradualmente en los puntos 3 y 4.

Se demuestra así que el transductor propuesto (acelerómetro), no únicamente puede ser usado para la detección de cambios en el patrón de flujo, lo que se traduce en la detección de las oscilaciones creadas por los chorros provenientes de los puertos de la buza que impactan la delgada costra de acero solidificado, sino que además se pueden detectar las fluctuaciones en la interface acero-escoria y en consecuencia se pueden prevenir y corregir posibles rompimientos en el hilo de colada. Esto podría conducir a una mayor productividad del proceso de colada continua y a mejorar el control de éste.

Conclusiones.

Además de definir el origen de la oscilación de los chorros al interior del molde se llevó a cabo una simulación matemática para observar la dinámica de fluidos de los efectos del cambio en el diseño interno de la buza sumergida (SEN) sobre los patrones de flujo. Asimismo, se hizo la validación física de la fase del modelado matemático usando como herramienta la inyección de un trazador. Se hicieron mediciones de la cantidad de energía existente al interior del molde, en una de las paredes delgadas del molde, y para ello se usó un acelerómetro, del tipo piezoeléctrico. De los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Aún para diseños de buzas (SEN) con un comportamiento operacional, aparentemente estable, se presentan oscilaciones de los chorros en los puertos de salida. Esas oscilaciones se incrementan al aumentar tanto la velocidad de colada como la profundidad de inmersión de la buza. Solamente a muy altas velocidades de colada se pueden observar distorsiones dinámicas menores, por lo que se deduce que las oscilaciones de los chorros tienen su origen al interior de la SEN.

2. El diseño de la geometría en la zona donde las áreas transversales de la buza comienzan a cambiar provocan perturbaciones en el flujo, generando zonas de presión dinámicas altas y bajas, lo cual, junto con la naturaleza turbulenta del flujo hacen que el acero líquido salga de manera preferencial por alguno de los puertos. Se encontró, además, que el tamaño de las zonas de presión es una función inversa de la velocidad de colada. rompible

3. Se da un balance de fuerzas muy delicado y frágil que tiene lugar en la punta de la bifurcación interna de la buza. Este balance está directamente relacionado con el flujo fluctuante en dicha zona, siendo éste afectado por la presión ferrostática. Cuando éste balance es interrumpido, debido a la posición de la buza y/o por altas velocidades de colada, las oscilaciones son más evidentes e intensas cuando la buza se posiciona a mayor profundidad promoviendo variaciones permanentes en el flujo másico de un puerto al otro.

4. Al disminuir la profundidad de la buza, respecto a la superficie del metal, se logra controlar el efecto de la presión ferrostática y por ende el del flujo fluctuante sobre ésta zona y los cambios en las micro escalas, sin embargo, ésta acción trae como consecuencia un aumento en la presión interna de la buza, lo cual afectará indudablemente la vida útil de la misma.

5. Sí se suprime la zona donde se forma un camino de vórtices (distorsión dinámica) que va desde la punta de la buza hacia el fondo del molde y se hacen converger los chorros justo al centro del molde, las oscilaciones de los chorros son mejor controlados, lo cual, se logra a partir de la modificación geométrica de la división de los puertos. Esto se comprobó con los resultados de la buza modificada III.

6. Se ha demostrado que las oscilaciones de los chorros tienen su origen desde el interior de la buza (SEN), consecuentemente para tener un mejor control de las oscilaciones es necesario hacer un estudio más detallado de la geometría interna de la buza y así evitar zonas de fluctuación por efecto de; la presión dinámica y de las zonas con cambio en el balance de fuerzas en el orden de las micro escalas.

7. Las simulaciones física y matemática, así como también, el análisis de vibraciones del molde, demostraron ser herramientas muy útiles, una vez que pueden proporcionar valores reales y medibles de la cantidad de energía presente en el molde.

8. Se encontró que el acelerómetro es un transductor capaz de correlacionar la intensidad de las vibraciones, en el modelo físico, con la energía cinética disipada en las paredes del molde. Una mayor intensidad en las vibraciones indica el lugar en donde existe mayor fricción del fluido con dicha pared.

9. El acelerómetro puede ser usado como un dispositivo para detectar y prevenir posibles rompimientos en la capa de acero recién solidificada en el molde de colada continua de planchón delgado.

10. La validación de los resultados obtenidos con el modelo físico y matemático del molde se hicieron para la buza original a profundidades de inmersión de buza de 0.11 y 0.17m en el modelo físico y de 0.22 y 0.34m para el modelo matemático.

11. De acuerdo a los resultados obtenidos, con la inyección de trazador, del modelo físico del molde y los resultados de la simulación matemática, los patrones de flujo coinciden perfectamente entre ambos. Esto deja ver que las oscilaciones de los chorros tienen su origen, debido al fenómeno de transferencia de movimiento, al interior de la buza y que éstas son amplificadas por la calle de vórtices que se forma por debajo de la punta de la buza. Estas oscilaciones alcanzan su máxima intensidad al ser impactadas por la vórticidad proveniente de las recirculaciones de la región del sub-molde (fondo del molde).

12. Se comprobó, mediante la simulación física, que las oscilaciones de los chorros son más frecuentes a mayor profundidad de inmersión de buza que a menor profundidad. A menor profundidad de buza tiende a que se dé un mayor flujo por uno de los puertos, rompiéndose este equilibrio cuando se alcanza una velocidad de colada de 7m/min. A mayor profundidad de la buza los chorros comienzan a oscilar, desde una velocidad de colada de 4m/min, recordando que a éstas profundidades se ven especialmente afectados por la mayor presión ferrostática del fluido.

Originalidad del proyecto.

En cualquier trabajo de investigación existen dos posibles resultados:

- *Sí el resultado confirma la hipótesis, entonces se ha hecho una buena medición.*
- *Si el resultado es contrario a la hipótesis, entonces se ha hecho un descubrimiento.*

Enrico Fermi.

En el presente trabajo de investigación se puede dimensionar la magnitud o alcance del mismo al descubrir y explicar el origen de las oscilaciones de los chorros provenientes de la buza, fenómeno que se da en el interior de ésta. Además, se encontró una relación entre la magnitud de las vibraciones del molde con la energía disipada en las paredes de éste, factores que influyen directamente en la calidad del planchón colado.

Haciendo uso de modelación matemática se encontró que las distorsiones dinámicas se dan como resultado del fenómeno energético provocado por la variación en las micro escalas en la capa límite de la división de los puertos y por las fluctuaciones en la velocidad y la presión en zonas por encima de la parte superior de ésta, lo que ocasiona el fenómeno oscilante de los chorros desde el mismo interior de la buza.

La modelación matemática fue validada con los resultados de la modelación física del sistema molde-buza, mediante la inyección de un trazador, los cuales, se corresponden unos con otros dejando ver que los patrones de flujo obtenidos en un sistema y otro mantienen una excelente similitud. Demostrando que la oscilación de los chorros se da principalmente cuando la buza se encuentra a 34cm (simulación matemática), 17cm (modelación física), y que a 22cm de inmersión, simulación matemática, u 11cm, simulación física, la oscilación de los chorros se da solamente a velocidades de colada superiores a 7m/min. Lo cual, coincide perfectamente entre ambas técnicas. Además, se mostró que la distorsión dinámica o producción continua de un camino de vórtices que van desde una pequeña longitud hasta alcanzar un tamaño máximo colisionan con la vórticidad generada por las

recirculaciones provenientes del fondo del molde, lo cual, da como resultado un incremento en la magnitud de las oscilaciones.

Se propone el uso de acelerómetros para medir la cantidad de energía existente en el interior del molde y sobre todo, sobre la pared delgada del molde colocándose en puntos estratégicos, los cuales, fueron elegidos a partir de los resultados obtenidos con la modelación matemática. Se medió la relación de disipación de energía cinética turbulenta a 5mm de dicha pared (parte interna del molde), encontrando que los resultados obtenidos con el acelerómetro mantienen una excelente similitud con la disipación de la energía cinética turbulenta. El acelerómetro es un dispositivo capaz de medir la cantidad de fricción existente del fluido con la costra de acero recién solidificado y prevenir posibles rompimientos de ésta.

Con la realización de éste trabajo de investigación se generaron dudas e ideas para futuros trabajos de investigación, tanto en el diseño de las buzas utilizadas como en los posibles efectos o fenómenos que se puedan originar al rediseñar el interior de la buza.

Bibliografía.

1. D. Gupta and A. K. Lahiri: "Water-Modelling Study of the Surface Disturbances in Continuous Slab Caster", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 25B (1994), 227.
2. D. Gupta and K. Lahiri: "A Water Model Study of the Flow Asymmetry Inside a Continuous Slab Casting Mold", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 27B, 1996, pp 757.TA
3. Raul Miranda, Miguel Angel Barron, Jose Barreto, Luis Hoyos y Jesus Gonzales: "Experimental and Numerical Analysis of the Free Surface in a Water Model of a Slab Continuous Casting Mold", ISIJ International, Vol. 45 (2005), No. 11, pp 1626.L
4. Bingzhen SHEN, Houfa SHEN y Baicheng LIU: "Inestability of Fluid Flow and Level Fluctuation in Contonuous Thin Slab Casting Mould", ISIJ International, Vol. 47, 2007, No. 3, pp. 427–432.
5. Bingzhen SHEN, Houfa SHEN y Baicheng LIU: "Water modelling of level fluctuation in thin slab continuous casting mould", Ironmaking and Steelmaking, 2009, Vol. 36, No. 1, pp 33.
6. E. Torres-Alonso, R. D. Morales, S. García Hernández and J. Palafox-Ramos: "Cyclic Turbulent Instabilities in a Thin Slab Mold. Part I: Physical Model" Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 41B, June 2010, pp.583-597.
7. H. Trippelsdorf, R. Marracini and S. Kollberg: "Advances in Strip Surface Quality from Thin Slab Casters" International Scientific Colloquium, Modelling for Electromagnetic Processing, Hannover, March 24-26, 2003, pp189.
8. Baokuan LI and Fumitaka TSUKIHASHI: "Effects of Electromagnetic Brake on Vortex Flows in Thin Slab Continuous Casting Mold", ISIJ International, Vol. 45 (2006), No. 1, pp. 30-36.
9. Mehmet Metin Yavuz: "The Effects of Electromagnetic Brake on Liquid Steel Flow in Thin Slab Caster", Steel Research International Vol. 82. No. 7, 2011, pp 809.

10. X.-Y. Tian, B.-W. Li and J.-C. He: "Numerical analysis of influences of casting speeds on fluid flow in funnel shape mouldwith new type EMBr", International Journal of Cast Metals Research, Vol. 23, 2010, No. 2, pp. 73-80.
11. Baokuan LI and Fumitaka TSUKIHASHI: "Effects of Electromagnetic Brake on Vortex Flows in Thin Slab Continuous Casting Mold", ISIJ International, Vol. 46 (2005), No. 12, pp. 1833–1838.
12. Chapter 15, Modeling for Casting and Solidification Processing, O. Yu, editor, ed. Marcel Dekker, New York, NY, (2001), 499.
13. Thomas G. O`Connor and Jonathan A. Dantzig: "Modelling the Thin-Slab Continuous-Casting Mold", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 25B (1994), 443.
14. Heping LIU, Chunzheng YANG, Hui ZHANG, Qijie ZHAI and Yong GAN: "Numerical Simulation of Fluid Flow and Thermal Characteristics of Thin Slab in the Funnel-Type Molds of Two Casters", ISIJ International, Vol. 51 (2011), No. 3, pp. 392–401
15. T. Honeyands and J. Herbertson: "Flow Dynamics in Thin Slab Mold" Steel Research, Vol. 66, 1995, pp 287.
16. R. D. Morales, J. Palafox Ramos, L. Garcia Demedices and R. Sanchez Perez: "A DPIV Study of Liquid Steel Flow in a Wide Thin Slab Caster Using Four Ports Submerged Entry Nozzles", ISIJ International, Vol. 44, No. 8, (2004), pp 1384.
17. QUAN YUAN, BRIAN G. THOMAS, and S.P. VANKA: "Study of Transient Flow and Particle Transport in Continuous Steel Caster Molds: Part I. Fluid Flow", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 35B, 2004, pp 685.
18. E. Torres Alonso, R. D. Morales, L. G. Demedices, Alfonso Nájera, J. Palafox Ramos and P. Ramirez Lopez: "Flow Dynamics in Thin Slab Molds Driven by Sustainable Oscillating Jets from the Feeding SEN", ISIJ Int., 47 (2007), 679.
19. A. Hajari and M. Meratian: "Surface Turbulence in a Physical Model of a Steel Thin Slab Continuous Caster", International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, Vol. 17, No. 6, pp. 697-703.

20. E. Torres-Alonso, R. D. Morales and S. García Hernández: "Cyclic Turbulent Instabilities in a Thin Slab Mold. Part II: Mathematical Model", Mathematical Model" Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 41B, June 2010, pp.675-690.

21. Rodolfo D. MORALES, Yong TANG, Gerald NITZL, Cristoph EGLSÄEER and Gernot HACKL: "Design of a Submerged Entry Nozzle for Thin Slab Molds Operating at High Casting Speeds", ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 9, pp. 1607–1615.

22. Cesar REAL, Raul MIRANDA, Cristina VILCHIS, Miguel BARRON, Luis HOYOS and Jesus GONZALEZ: "Transient Internal Flow Characterization of a Bifurcated Submerged Entry Nozzle", ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 8, pp. 1183–1191.

23. HANS-JURGEN ODENTHAL, INA LEMANOWICZ, RAINER GORISSEN, and HERBERT PFEIFER: "Simulation of the Submerged Energy Nozzle–Mold Water Model System Using Laser-Optical and Computational Fluid Dynamics Methods", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 33B, 2002, pp 163.

24. YU Hai-qi, ZHU Miao-yong y WANG jun: "Interfacial Fluctuation Behavior of Steel/Slag in Medium-Thin Slab Continuous Casting Mold With Argon Gas Injection", Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 17, No. 4, 2010, pp 5.

25. R. Kalter, M.J. Tummers, S. Kenjereš, B.W. Righolt and C.R. Kleijn: "Oscillations of the fluid flow and the free surface in a cavity with a submerged bifurcated nozzle", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 44, 2013, pp 365.

26. N. J. LAWSON and M. R. DAVIDSON: "Self-Sustained Oscillation of a Submerged Jet in a Thin Rectangular Cavity", Journal of Fluids and Structures, Vol. 15, 2001, pp 59.T

27. M.H. Zare, A.H. Meysami, Sh. Mahmoudi, M. Hajisafari and M. Mazar Atabaki: "Simulation of flow field and steel/slag interface in the mold region of

a thin slab steel continuous caster with tetra-furcated nozzle", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, 2013, pp 307.N

28. B. ZHAO, B.G. THOMAS, S.P. VANKA and R.J. O'MALLEY: "Transient Fluid Flow and Superheat Transport in Continuous Casting of Steel Slabs", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 36B, 2005, pp 801.TA
29. Young Ying Jeon, H. J. Sung and S. Lee: "Flow Oscillations and Meniscus Fluctuations in a Funnel-Type Water Model" Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 41B, February 2010, pp.121-130.
30. Fady M. Najjar, Brian G. Thomas, and Donald E. Hershey: "Numerical Study of Steady Turbulent Flow Through Bifurcated Nozzles in Continuous Casting" Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 26B, 1995, pp 749TION
31. Brett M. Gebert and M. R. Davidson: "Computed Oscillations of a Confined Submerged Liquid Jet", International Conference on CFD in Mineral and Metal Processing and Power Generation, CSIRO, 1997.
32. R. CHAUDHARY, GO-GI LEE, B.G. THOMAS, and SEON-HYO KIM: "Transient Mold Fluid Flow with Well- and Mountain-Bottom Nozzles in Continuous Casting of Steel", Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 39B, 2008, pp 870.ION
33. Brian G. THOMAS y Lifeng ZHANG: "Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting", ISIJ International, 2001, Vol. 41, No. 10, pp 1181-1193.
34. Brian G. Thomas: "Continuous Casting of Steel", Modeling for Casting and Solidification Processing, Chapter 15, 2001, pp 499-540.
35. D. F. Wu and S. S. Cheng: "Effect of SEN Design on Surface Fluctuation and Solidifying Shell in Slab Mold and its Optimization", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008, Vol. 21, No. 5, pp 341-350.
36. L. Zhang, S. Yang, K. Cai and B. G. Thomas: "Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Strand", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 38B, No. 1, 2007, pp. 63-83.
37. Yogeshwar Sahai and Toshihiko Emi: "Tundish Technology for Clean Steel Production" World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp 131-142.

38. Sahai and Emi: "Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 36, 1996, No. 6, pp 667-672.

39. L. J. Heaslip, A. C. Mclean and I. D. Sommerville: "Chemical and Physical Interactions During Transfer Operations", Continuous Casting, Vol. 1,1983, pp. 67-71.

40. Fluent Inc.: "Fluent 6.1 User´s Guide", Volume II, Fluent Inc., Lebanon, NH, 2003, pp. 8-1 to 8-3, 10-1 to 10-9.

41. B.E. Lauder and D.B. Spalding: "Lectures in Mathematical Models of Turbulence" Academic Press, London, 1972.

42. B.E. Lauder and D.B. Spalding: "Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering", London, 1974, Vol. 3, pp. 269-89.

43. Roland Schiestel: "Modeling and Simulation of Turbulent Flows", Editorial John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 1-58.

44. Stephen B. Pope: "Turbulent Flows", Cambridge University Press, 2000, pp. 1-178.

45. David C. Wilcox: "Turbulence Modeling for CFD", DCW Industries Inc., 1994, pp. 1-67.

46. J. Blazek: "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", ELSEVIER, 2001, pp. 1-25.

47. B. E. Launder and D. B. Spalding: "The numerical computation of turbulent flow", Comp. Meth. In Appl. Mech. And Eng, Vol. 3, 1974, pp.269-289.

48. FLUENT 6.2. User's Guide. Chapter 20 and 22. Fluent Inc., Lebanon, New Hampshire, 2005.

49. R. Aparicio F.: "Inyección de Gases en Procesos de Refinación Secundaria, Uso de Superconductores de Calor" Tesis de Maestría, IIM, UMSNH, 2006, pp 59-60.

50. R. Sánchez and R.D. Morales: "Dynamics of a Coupled and Uncoupled Two-Phase Flows in a Slab Mold" Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 35B, February (2004), pp. 85-99.

51. K. Wunnenberg and K. Schwerdtfeger: "Principles in Thin Slab Casting" Turkdogan Symposium Proceedings, (1994) pp. 185-193.

52. J. Szekely: "Fluid Phenomena in Metals Processing" Academic Press, New York, 1979.

53. D. Gupta, S. Chakraborty and A. K. Lahiri: "Asymmetry and Oscillation of the Fluid Flow Pattern in a continuous Casting Mould: A Water Model Study" ISIJ Int., 37(7), pp. 654-658

54. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., and Thomas B.G.: "Proc. Comp. Modeling of Materials", Minerals and Metals, Cross, Bailey and Evans eds., Warrendale PA, 2001, 491-500.