



UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Mecánica

TESIS

**Estudio de la fluido dinámica en el molde de
colada continua con el uso de una buza de
alimentación disipadora de energía cinética.**

Que para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Presenta:

M. C. FERNANDO SALDAÑA SALAS

ASESOR:

Dr. Gildardo Solorio Díaz

CO-ASESOR:

Dr. Enrique Torres Alonso

MORELIA, MICHOACÁN. MARZO/2024

Agradecimientos

A mis padres, Martha Patricia Salas y Ernesto Saldaña, por brindarme su apoyo y cariño incondicional en mi vida.

A Flor López quien ha sido parte fundamental de mi desarrollo como persona y me ha dado su cariño y paciencia en cada etapa de esta investigación y el transcurso de mis últimos 10 años.

A mis hermanos, Oscar, Belén y Monse por ofrecerme su cariño siempre.

A los Doctores Gildardo Diaz Solorio, Enrique Torres Alonso, José Ángel Ramos Balderas, Constantin Hernández Bocanegra por brindarme su amistad y darme las observaciones necesarias, su tiempo y conocimientos para que este trabajo se realizara de la mejor forma posible.

A mis amigos; Pablo, Sinhue, Gerardo, Alfonso, Daniel... solo por mencionar a algunos de ellos, por brindarme su amistad y haberme apoyado en situaciones difíciles.

Al CONACYT y al Posgrado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana San Nicolas de Hidalgo por el apoyo económico recibido para llevar a cabo la investigación de la cual se desprende esta tesis.

RESUMEN

Los defectos relacionados con la fluido dinámica en el planchón convencional en el molde de colada continua han sido reportados ampliamente en la literatura, sin embargo, pocas investigaciones abordan el tema desde la perspectiva de qué dicha fluido dinámica dentro del molde está intrínsecamente relacionada con la posible aparición de defectos superficiales en el acero.

En la presente investigación se trabajó con los datos de un molde para planchón convencional de acero utilizado en la industria, se utilizó un modelo a escala 1:1 de dicho molde y buza. Se caracterizó la dinámica de fluidos dentro de este modelo, empleando diversas técnicas, como lo fueron; la velocimetría de partícula por imagen, el uso de un trazador vegetal, así como también la dinámica de fluidos computacional. Al usar estas herramientas en conjunto fue posible la caracterización de dicha fluido dinámica dentro del molde y con estos resultados fue posible correlacionar dicha fluido dinámica con la aparición de posibles defectos reportados en la literatura. Una vez conocidas las posibles causas raíz de dichos defectos, se planteó una solución que consistió en diseñar una buza de alimentación que disipara su energía cinética con la finalidad de disminuir la aparición de dichos defectos.

Para lograr lo anterior, se utilizó la dinámica de fluidos computacional y se diseñaron diversas buzas, de todas estas, se eligió la que presentó mayor disipación de energía cinética (una menor velocidad a la salida de la misma bajo las mismas condiciones de operación). Una vez que se tuvo dicha buza, se construyó su modelo a escala 1:1 y se realizaron las mismas pruebas que con la buza convencional.

De los resultados encontrados se puede decir que dicha buza disipativa presentó una disipación de energía debido a su forma geométrica (zonas convergentes y divergentes). Dicha disipación de energía cinética se vio reflejada que dentro del molde se obtuvo un patrón de flujo más simétrico y con menores velocidades dentro del molde, principalmente en la zona de la superficie libre, esto contribuyó a que se genere un patrón de flujo que pueda provocar menores apariciones de defectos superficiales en el molde en comparación con el patrón de flujo que produjo la buza convencional.

Palabras Clave: Molde de planchón convencional, buza disipativa, dinámica de fluidos computacional, velocimetría de partícula por imagen.

ABSTRACT

The defects related to the fluid dynamics in the conventional slab in the continuous casting mold have been widely reported in the literature, however, few investigations address the topic from the perspective of what fluid dynamics inside the mold is intrinsically related to the possible appearance of surface defects in steel.

In this research, we worked with data from a conventional steel slab mold used in the industry; a 1:1 scale model of slab mold and nozzle was used. The fluid dynamics within this model were characterized, using various techniques, such as; particle imaging velocimetry, the use of a plant tracer, as well as computational fluid dynamics. By using these tools together, it was possible to characterize fluid dynamics within the slab mold and with these results it was possible to correlate fluid dynamics with the appearance of possible defects reported in the literature. Once the possible root causes of these defects were known, a solution was proposed that consisted of designing a submerged nozzle that would dissipate its kinetic energy in order to reduce the appearance of superficial defects.

To achieve the above, computational fluid dynamics was used and various submerged nozzles were designed. Of all of these, the one with the greatest dissipation of kinetic energy was chosen (a lower velocity at its exit under the same operating conditions). Once this submerged nozzle was available, its model was built at a 1:1 scale and the same tests were carried out as with the submerged conventional nozzle.

From the results found, it can be said that the dissipative nozzle presented energy dissipation due to its geometric shape (converging and divergent zones). This dissipation of kinetic energy was reflected in the fact that a more symmetrical flow pattern was obtained inside the mold and with lower velocities inside the mold, mainly in the free surface zone, this contributed to the generation of a flow pattern that could cause fewer occurrences of surface defects in the mold compared to the flow pattern produced by the conventional nozzle.

Keywords: Conventional Slab Mold, Dissipative Nozzle, Computational fluid Dynamics, Image particle velocimetry.

CONTENIDO

Capítulo I.....	10
Introducción	10
1.1 Introducción.....	11
1.2 Objetivo General	12
1.2.1 Objetivos Específicos.....	12
1.3 Justificación.....	12
1.4 Bibliografía	13
Capítulo II.....	25
Marco Teórico.....	25
2.1 Colada Continua.....	26
2.1.1 El Molde.....	27
2.1.2 Buza de Alimentación Sumergida.....	28
2.2 Defectos en el acero relacionados con la fluido dinámica al interior del molde	30
2.3 Modelación Física	31
2.3.1 Elección de la Escala	33
2.3.2 Propiedades de los Fluidos de Trabajo.....	33
2.4 Velocimetría de Partícula por Imagen	34
2.5 Dinámica Computacional de Fluidos	36
2.5.1 Ecuaciones Constitutivas	37
2.5.2 Discretización	38
2.5.3 Geometrías y Mallas	41
2.5.4 Modelos Empleados.....	42
2.5.5 Modelo Multifásico (VOF).....	46
Capítulo III.....	49
Metodología Experimental.....	49
3.1 Experimentación Física	50
3.1.1 Descripción del molde.....	50

3.1.2 Dimensiones principales del molde y buza	52
3.1.3 Procedimiento de Experimentación Física	53
3.2 Simulación Matemática	56
Capítulo IV	61
Resultados y Discusión de Resultados.....	61
4.1 Caracterización de la Fluido dinámica en el Molde utilizando la Buza Convencional.....	63
4.1.1 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal.....	63
4.1.2 Campo de vectores de velocidad obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula	65
4.1.3 Oscilaciones de nivel para la Buza Convencional Cp	69
4.1.4 Validación del modelo matemático	73
4.2 Modelo Matemático del Sistema Acoplado Molde-Buza	74
4.2.1 Campo de Velocidad en el Interior del Molde	75
4.2.2 Campo de Velocidad sobre la superficie libre.....	76
4.2.3 Oscilaciones de nivel en la superficie libre obtenidos mediante simulación matemática	78
4.2.4. Correlación de la Fluido Dinámica en el interior del molde con la aparición de defectos superficiales en el producto final	81
4.3 Obtención de una Buza Disipadora de Energía Cinética	82
4.3.1 Caracterización de la Buza Convencional con y sin piscina.....	82
4.3.2 Modelos de Buzas Disipadoras de energía cinética	88
4.3.3 Comparación entre la Buza convencional y las Buzas Disipativas.	99
4.4 Caracterización de la Fluido dinámica en el Molde utilizando la Buza de tres cámaras.....	104
4.4.1 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal para la Buza B3c Cp	104
4.4.2 Campo de vectores de velocidad obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula para la Buza B3c Cp.....	105
4.4.3 Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp.....	111
4.4.4 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal para la buza B3c Cp con cruceta.....	117

4.4.5 Campo de velocidades obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula para la Buza B3c Cp Cruceta	120
4.4.6 Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta.....	124
4.4.7 Comparación de Resultados de la Buza convencional vs Buza B3c Cp y B3c Cp cruceta.....	131
4.4.8 Correlación de la Fluido Dinámica en el interior del molde con la aparición de defectos superficiales en el producto final para las B3c Cp y B3c Cp cruceta	135
4.5 Modelo Matemático del Sistema Molde-Buza Acoplado para la Buza B3c Cp.	136
4.5.1 Campo de Velocidad en el Interior del Molde	136
4.5.2 Campo de Velocidad sobre la superficie libre.....	137
4.5.3 Oscilaciones de nivel en la superficie libre para la Buza B3c Cp obtenidos mediante simulación matemática.....	139
Conclusiones.....	143
Recomendaciones.....	146
Referencias Bibliográficas.....	147

Índice de Figuras

Fig. 1.1. Buza estándar con diferentes modificadores de flujo, a) Modelo A, buza normal, b) Modelo B, buza con modificador sólido, c) Modelo C, buza con modificador sólido con el 25% de orificios, d) Modelo D, buza con modificador sólido con el 50% de orificios	14
Fig. 1.2. Esquema de las buzas. a) Buza convencional, b) Buza con inhibidor de turbulencia en forma de ancla	14
Fig. 1.3. Buzas con inhibidor de turbulencia en forma rectangular	15
Fig. 1.4 Esquema de las buzas utilizadas, a) Buza convencional, b) Buza con cámaras cuadradas, c) Buza con cámaras en forma de diamante	16
Fig. 1.5. Campos de velocidad para el plano de simetría a) 0°, b) -15°, c) -25°	17
Fig. 1.6. Líneas de corriente dentro de las buzas a) Buza de 15° normal, b) Buza de 15° optimizada	17
Fig. 1.7. Geometría de la buza, a) Cuerpo de la buza, b) Fondo de la buza con piscina, c) Fondo de la buza con forma de “montaña”	19
Fig. 1.8. Fenómeno de Separación y Difusión del chorro, a) Esquema de explicación del fenómeno, b) Fenómeno real obtenido a través de mediciones con PIV	20
Fig. 1.9. Patrones de flujo en el interior del molde. a) DRF (patrón de flujo de doble rollo), b) SRF (patrón de flujo de un solo rollo), c) PUF (patrón de flujo inestable permanente) . 21	
Fig. 1.10. Esquema de la asimetría del flujo. a) Comienzo del periodo de asimetría, b) Final del periodo de asimetría	22
Fig. 2.1. Proceso de colada continua	26
Fig. 2.2. Dimensiones típicas para planchón convencional.	27
Fig. 2.3. Esquema de un molde para planchón convencional.	27
Fig. 2.4. Fenómenos presentes en el molde.	29
Fig. 2.5. Fenómenos en el molde. 1. Arrastre de polvo producido por el chorro, 2. Arrastre de partículas de polvo desde la interfaz, 3. Formación de remolinos, 4. Ruptura de la capa protectora producida por burbujas, 5. Formación de ondas superficiales, 6. Arrastre de polvo a la buza	30
Fig. 2.6. Configuración típica de PIV.	35
Fig. 2.7. Soluciones posibles para la función imaginaria $f(x)$. a) Solución analítica, b) Solución discreta.	39

Fig. 2.8. Discretización por volúmenes finitos.....	40
Fig. 2.9. Funciones de interpolación de la variable de integración dentro del volumen de control. A la izquierda paso constante, a la derecha paso lineal.	40
Fig. 2.10. Tipos de mallas. a) Malla estructurada, b) Malla híbrida.	42
Fig. 2.11. Descomposición del espectro de energía en el modelo LES	45
Fig. 3.1 Diseño del molde. a) Configuración interna del molde, b) Molde con los refuerzos añadidos.....	51
Fig. 3.2. Sistema de Tuberías del Molde.....	51
Fig. 3.3. Planos del Molde y Buza. a) Vista frontal del molde, b) Vista lateral del molde, c) Vista frontal de la buza.....	52
Fig. 3.4. Área de grabación para la difusión del trazador en el molde.....	54
Fig. 3.5. Zonas a analizar la oscilación de nivel.....	55
Fig. 3.6 Esquema del circuito hidráulico y sistema PIV en vista isométrica.	56
Fig. 3.7. Diagrama de flujo del procedimiento de simulación matemática.....	57
Fig. 3.8. Geometrías modeladas en 3d. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde. 58	
Fig. 3.9. Geometrías malladas. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde.	59
Fig. 3.10. Condiciones de frontera aplicadas al modelo. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde.....	59
Fig. 4.1. Cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza Convencional Cp. a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s.	65
Fig. 4.2. Campo de vectores de velocidad obtenido mediante PIV para la Buza Convencional Cp.	66
Fig. 4.3. Campo de vectores de velocidad obtenido mediante PIV en la zona por encima del chorro derecho para la Buza Convencional Cp.	67
Fig. 4.4. Gráfica de velocidad obtenida del modelo físico a 5 cm de la pared derecha para la Buza Convencional CP.....	68
Fig. 4.5. Gráfica de velocidad obtenida del modelo físico a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza Convencional Cp.	69
Fig. 4.6. Oscilaciones de nivel del modelo físico sobre la superficie libre para la Buza Convencional Cp.	72
Fig. 4.7. Aparición de Vórtices obtenidas del modelo físico sobre la superficie libre para la Buza Convencional Cp.	73

Fig. 4.8. Validación del modelo matemático. a) Modelo físico, b) Simulación matemática, c) Trazador vegetal.....	76
Fig. 4.9. Campo de velocidad en un plano de simetría longitudinal ($Z=0$) del molde obtenido mediante simulación matemática utilizando el modelo LES a un tiempo de 330 s para la Buza Convencional.....	76
Fig. 4.10. Campo de velocidad obtenido mediante simulación matemática en un plano ubicado a 2 cm por debajo de la superficie libre para la Buza Convencional Cp.	78
Fig. 4.11. Contornos de Fases, oscilaciones de nivel en la superficie libre en la pared frontal del molde a diferentes tiempos obtenidas mediante simulación matemática. Zona Derecha e Izquierda del molde para la Buza Convencional Cp.	80
Fig. 4.12. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre en el plano longitudinal ($Z=0$) obtenida mediante simulación matemática para la Buza Convencional Cp.	81
Fig. 4.13. Modelos en 3D de la Buza, a) Buza Convencional Con Piscina (Bc Cp), b) Buza Convencional Sin Piscina (BC Sp).....	83
Fig. 4.14. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza Convencional Cp, b) Buza Convencional Sp.....	84
Fig. 4.15. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza Convencional Cp, b) Buza Convencional Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos Bc Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos Bc Sp.....	85
Fig. 4.16. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal ($X=0$) en la Buza Convencional.....	86
Fig. 4.17. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=0.07$) en la Buza Convencional.....	87
Fig. 4.18. Modelos en 3D de las buzas disipativas modeladas mediante CFD.....	89
Fig. 4.19. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 3 Cámaras Cp, b) Buza 3 Cámaras Sp.....	91
Fig. 4.20. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 3 Cámaras Cp, b) Buza 3 Cámaras Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos B3c Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos B3c Sp.	92
Fig. 4.21. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal ($X=0$) en la Buza de tres cámaras.	93
Fig. 4.22. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=\pm 0.07$) en la Buza B3c Cp y Sp.....	94

Fig. 4.23. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 2 Cámaras Cp, b) Buza 2 Cámaras Sp.	95
Fig. 4.24. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 2 Cámaras Cp, b) Buza 2 Cámaras Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos B2c Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos B2c Sp.	96
Fig. 4.25. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal ($X=0$) en la Buza de dos cámaras.	97
Fig. 4.26. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=\pm 0.07$) en la Buza B2c Cp y Sp.	98
Fig. 4.27. Comparación de la buza convencional vs la buza con tres cámaras y buza dos cámaras.	99
Fig. 4.28. Comparación de las gráficas en los ejes $X=0$ y $X=0.07$ para la buza convencional vs la buza con tres cámaras y buza dos cámaras.	100
Fig. 4.29. Esfuerzos de Reynolds en el plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática para las buzas analizadas. a) Buza Convencional Cp, b) Buza 3 cámaras Cp, c) Buza 2 cámaras Cp.	102
Fig. 4.30. Tasa de deformación en el plano $z=0$ para las buzas analizadas. a) Buza Convencional Cp, b) Buza 3 cámaras Cp, c) Buza 2 cámaras Cp.	103
Fig. 4.31. Efecto del aumento de la velocidad de colada en las buzas.	104
Fig. 4.32. Comparación de la Cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza B3c Cp y la buza convencional Bc Cp. a) -- f) para la B3c Cp y a ₁) -- f ₁) para la Bc Cp a diferentes tiempos: a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s. ..	106
Fig. 4.33. Comparación del campo de vectores de velocidad y líneas de corriente para la Buza B3 Cp y la Buza convencional obtenidos mediante PIV. a) y b) Buza B3c Cp, a ₁) y b ₁) Buza Bc Cp.	108
Fig. 4.34. Comparación del campo de vectores de velocidad obtenidos mediante PIV en la zona por encima del chorro derecho para la Buza B3c Cp (a) y la buza Bc Cp (b).	109
Fig. 4.35. Comparación de las gráficas de velocidad a 5 cm de la pared derecha para la Buza B3c Cp y Bc Cp.	110
Fig. 4.36. Comparación de las gráficas de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp y la Buza Cp.	111
Fig. 4.37. Comparación de las oscilaciones de nivel en el lado derecho para la Buza B3c Cp y la Buza Bc Cp sobre la superficie libre.	113

Fig. 4.38. Comparación de las oscilaciones de nivel en el lado derecho para la Buza B3c Cp y la Buza Bc Cp sobre la superficie libre.	115
Fig. 4.39. Comparación de la aparición de Vórtices sobre la superficie libre para la Buza B3c Cp.	116
Fig. 4.40. Buza B3c Cp con cruceta. a) Vista frontal, b) Vista isométrica.	117
Fig. 4.41. Comparación de la cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza B3c Cp cruceta y la Buza convencional. a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s.....	119
Fig. 4.42. Campo de vectores de velocidad y líneas de corriente para la Buza B3 Cp cruceta obtenidos mediante PIV.....	121
Fig. 4.43. Campo de vectores de velocidad en la zona por encima del chorro derecho para la Buza B3c Cp cruceta obtenidos mediante PIV.....	122
Fig. 4.44. Gráfica de velocidad a 5 cm de la pared derecha para la Buza B3c Cp cruceta.	123
Fig. 4.45. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp cruceta.....	124
Fig. 4.46. Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta sobre la superficie libre. ...	126
Fig. 4.47. Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta sobre la superficie libre. ...	128
Fig. 4.48. Aparición de Vórtices sobre la superficie libre para la Buza B3c Cp cruceta. ..	130
Fig. 4.49. Comparación del campo vectorial obtenidas mediante PIV en el plano $Z=0$. a) Bc Cp, b) B3c Cp, c) B3c Cp cruceta.	132
Fig. 4.50. Comparación de las gráficas de velocidad a 5 cm de la pared derecha para las tres buzas.	133
Fig. 4.51. Comparación de las gráficas de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para las tres buzas.	133
Fig. 4.52. Comparación de las Oscilaciones de nivel. a)-b) Bc Cp, c)-d) B3c Cp, e)-f) B3c Cp cruceta.	134
Fig. 4.53. Campo de velocidad para la B3c Cp en un plano de simetría longitudinal ($Z=0$) del molde obtenido mediante simulación matemática.....	137
Fig. 4.54. Campo de velocidad obtenido mediante simulación matemática en un plano ubicado a 2 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp.	138
Fig. 4.55. Contornos de Fases, oscilaciones de nivel en la superficie libre en la pared frontal del molde a diferentes tiempos. Zona Derecha e Izquierda.....	141

Fig. 4.56. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre en el plano longitudinal ($Z=0$) obtenida mediante simulación matemática. 142

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Resultados de Lin Xu	23
Tabla 2.1. Propiedades físicas del agua y del acero.	33
Tabla 4.1. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.	88
Tabla 4.2. Porcentaje de reducción de velocidades.	90
Tabla 4.3. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.	94
Tabla 4.4. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.	99

Simbología

A_m	Área del Modelo
A_p	Área del Prototipo
F_i	Fuerzas Inerciales
F_r	Número de Froude
g	Gravedad
K	Coeficiente de Conducción térmica
k	Energía Cinética Turbulenta
L	Longitud
L_m	Longitud del modelo
L_p	Longitud del prototipo
P	Presión
Q	Caudal
Re	Número de Reynolds
S	Término Fuente
T	Temperatura
v	Velocidad
u,v,w	Componentes de la velocidad (x,y,z)

η	Viscosidad Absoluta	ρ	Densidad
λ	Factor de Escala	σ	Tensión Superficial
ν	Viscosidad Dinámica	ω	Tasa de Disipación Turbulenta

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

El proceso de colada continua es actualmente el método de producción de acero más utilizado en el mundo, alrededor de 869 millones de toneladas se fabricaron el año pasado ^[1], de las cuales cerca del 90% se realizan por el proceso de colada continua, siendo los subproductos como el planchón y la palanquilla los que representan el mayor volumen de dicha producción.

Básicamente, el proceso de colada continua consiste en extraer el calor del acero fundido para su solidificación y al mismo tiempo darle una forma adecuada para su posterior utilización como subproducto (planchón, palanquilla o tocho). La extracción de calor se realiza mediante un molde fabricado en cobre y/o aleaciones con plata y otros metales. En este proceso las variables más importantes incluyen la velocidad y temperatura de colada, geometría del molde y la buza sumergida, condiciones de operación en la planta; así como la dinámica de flujo que se presenta al interior de éste.

Algunos de los problemas frecuentemente encontrados en la práctica de la colada continua en el molde de planchón convencional son: el arrastre de partículas o inclusiones al acero líquido, una superficie libre inestable, arrastre de escoria por vórtices, ruptura de la capa de escoria, adelgazamiento de la costra recién solidificada, asimetría del campo fluido dinámico, zonas de baja velocidad en la interfaz acero-escoria, entre otros. Además, es necesario considerar el efecto de los parámetros de operación tales como; velocidad de colada, geometría del molde y la buza, así como las profundidades de inmersión de esta última, ya que están directamente relacionados con el campo fluido dinámico al interior del molde y finalmente con la calidad del acero a producir.

Actualmente, la mayoría de los estudios realizados sobre el molde tienden a incluir los frenos magnéticos, a fin de obtener una mayor limpieza del acero, sin embargo, utilizar dicha herramienta es costosa y no siempre se obtienen buenos resultados. Otra opción para mejorar la calidad del acero, es el diseño de la buza, debido a que ésta controla los chorros y estos a su vez son capaces de modificar la fluido dinámica en el interior del molde y, por ende, la calidad y limpieza del acero.

Por tal motivo, se plantea disminuir la energía cinética del fluido durante el recorrido del mismo por el interior de la buza de alimentación. Esto se pretende realizar mediante simulaciones físicas y numéricas, además del uso de la técnica del PIV para obtener un diseño de buza que disminuya los defectos relacionados a la fluido dinámica en el molde.

1.2 Objetivo General

Disminuir los problemas que se presentan en el molde de colada continua originados por el comportamiento fluido dinámico del acero líquido en el interior mediante la disipación de la energía cinética durante su recorrido a través de la buza de alimentación.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Construir un modelo a escala de un molde y buza utilizada en planta.
- Caracterizar la fluido dinámica mediante PIV del molde para condiciones de operación en planta.
- Mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) proponer el diseño de una buza mediante la cual se logre un comportamiento fluido dinámico que favorezca la calidad del acero.
- Evaluar la buza propuesta en el modelo físico bajo condiciones típicas de operación.

1.3 Justificación

Actualmente la investigación sobre la dinámica de fluido en un molde para planchón ha sido ampliamente realizada. Sin embargo, existen pocos trabajos que se dediquen exclusivamente al diseño de buzas con el propósito de mejorar la calidad del acero, la investigación en el pasado, se ha realizado principalmente en los puertos de descarga con la finalidad de investigar el efecto de la geometría del puerto sobre el campo fluido dinámico al interior del molde y, además, utilizar toda el área de salida de dichos puertos. Por otro lado, la mayoría de los estudios realizados en la actualidad se han enfocado en el uso de Frenos Magnéticos (EMBr) para la disminución de la turbulencia superficial en la zona superior del molde y así contribuir a la remoción de inclusiones y otros tipos de defectos en particular. Un fuerte inconveniente de este tipo de estudios, es que las inclusiones por lo general, son no metálicas y, por lo tanto, las fuerzas electromagnéticas pierden la mayoría de su efecto sobre ellas, sobre todo, en las inclusiones más pequeñas se da que éstas no son atrapadas por la capa de escoria que recubre el molde, dejando así de lado toda la inversión económica realizada para acoplar este tipo de tecnología en el molde de colada continua en la industria.

En cambio, una alternativa por demás viable y barata es diseñar una nueva buza, que, dicho así, controla el patrón de flujo en el interior del molde, y, por lo tanto, al diseñar una buza que sea capaz de disipar la energía cinética del fluido en el interior de ésta, ayudaría a la limpieza del acero en lo que respecta a la disminución de las velocidades superficiales y podría contribuir a reducir los defectos relacionados con

la fluido dinámica en el interior del molde. Además, de que se protegería el material refractario de la buza, al tener una profundidad de inmersión relativamente pequeña, sin contar con los problemas de turbulencia excesiva en la superficie libre e incluso, se podría aumentar la velocidad de colada para una mayor producción de acero, manteniendo relativamente estable la interfaz acero-escoria.

1.4 Bibliografía

La investigación realizada para conocer los efectos del diseño de la buza sobre la fluido dinámica en el interior del molde han sido bastantes y se pueden dividir en dos campos principalmente; simulación matemática y simulación física. Se presentan a continuación algunas de las principales contribuciones al tema.

Fady M. y cols., ^[2] mediante dinámica de fluidos computacional variaron el ángulo del puerto, forma geométrica del puerto y número de puertos a fin de observar su efecto sobre el comportamiento de los chorros que salen de la buza. Entre sus resultados más importantes cabe destacar, que entre mayor sea el ángulo de la buza es mayor el área efectiva ocupada por el fluido en el interior de la buza y, por lo tanto, un menor retro flujo existirá a la salida del puerto. También se encontró que al aumentar la velocidad de colada se incrementó el valor del ángulo con que el chorro abandona la buza.

Anapul S. y cols., ^[3] realizaron una simulación matemática donde se enfocaron en el diseño de una buza para mejorar la limpieza del acero. De sus resultados se pudo concluir que; al existir una alta turbulencia en la zona del menisco se puede producir un atrapamiento de polvo colador hacia el interior del molde y, por otro lado, una baja turbulencia en la zona del menisco puede causar una solidificación del polvo colador, debido principalmente a un flujo de calor distribuido deficientemente sobre esta zona.

En una búsqueda por un diseño óptimo de la buza Real-Ramírez y cols., ^[4] realizó un estudio mediante CFD para probar un nuevo diseño de buza que ayude al atrape de inclusiones. El dispositivo tiene una piscina deslizante, con la finalidad de que una vez que se sature de inclusiones, dicho dispositivo descienda ligeramente y de nueva cuenta pueda operar con normalidad, evitando así la aglomeración de inclusiones en dicha zona. Entre sus principales conclusiones, encontró que, al usar el nuevo dispositivo, se inhibe el estancamiento de las inclusiones en la piscina de la buza en comparación con el diseño tradicional, el cual tiene una longitud de piscina fija. En un estudio posterior ^[5] se enfocaron en disminuir las velocidades superficiales en la zona del menisco. Uso una buza con forma de ancla en la parte superior, varió la cantidad de orificios en el ancla para ayudar a disipar la energía cinética y con esto, bajar las velocidades en la zona de la superficie libre en el molde (ver Fig. 1.1). Entre sus principales resultados encontró que con una perforación del

25% del área sumergida del dispositivo modificador (ancla) se obtienen resultados visibles; reducción de las velocidades en la superficie libre y se encontró que la mejor localización de los orificios sobre el ancla se ubica en el área central.

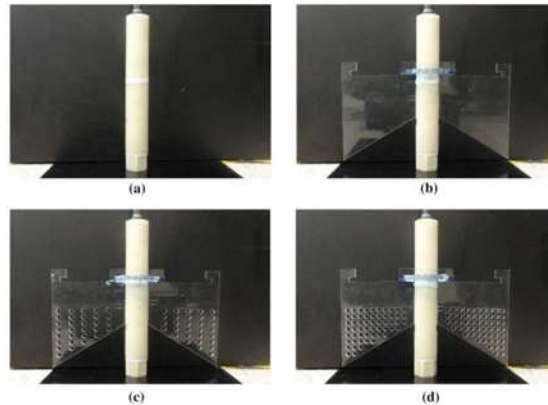


Fig. 1.1. Buza estándar con diferentes modificadores de flujo, a) Modelo A, buza normal, b) Modelo B, buza con modificador sólido, c) Modelo C, buza con modificador sólido con el 25% de orificios, d) Modelo D, buza con modificador sólido con el 50% de orificios [5].

Siguiendo la misma lógica de utilizar un inhibidor de turbulencia sólido en la superficie libre, Hernández C. A., y cols., [6] encontraron que existe una disminución de velocidad y turbulencia en la superficie libre (en las zonas adyacentes al dispositivo inhibidor) para el caso del nuevo diseño de buza. Por el contrario, la buza convencional presentó mayores oscilaciones de nivel y velocidades superficiales.

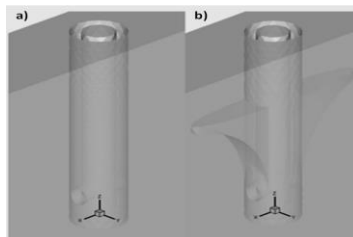


Fig. 1.2. Esquema de las buzas. a) Buza convencional, b) Buza con inhibidor de turbulencia en forma de ancla [6].

Después de comprobar la hipótesis del inhibidor de turbulencia sobre la superficie libre, Miranda R. y cols., [7] realizaron un estudio para evaluar el efecto que produce el espesor del inhibidor en forma de ancla. Se encontró que las buzas con forma de ancla con bajos espesores disminuyen notablemente las velocidades en la superficie libre en comparación a las que presentaban un mayor espesor. En la búsqueda de optimizar completamente el dispositivo inhibidor de turbulencia en la superficie libre, Gonzales-T. J. y cols., [8] realizaron un estudio mediante CDF para evaluar el comportamiento de dos buzas; una buza convencional y la otra tiene modificadores con forma rectangular, estos están ubicados por encima de los puertos (ver Fig. 1.3). Además, variaron el espesor y longitud de dichos

modificadores para evaluar su comportamiento en el patrón de flujo al interior del molde. De sus principales resultados, se encontró que, al adicionar dichos modificadores de flujo, se observó un mejor desempeño en lo que a la calidad se refiere, es decir, con dichos modificadores tienden a disminuir las oscilaciones superficiales en el molde en comparación con la buza convencional, esto resultó válido para los modificadores con pequeño espesor, mientras que al aumentar dicho espesor resulta en un comportamiento contrario.



Fig. 1.3. Buzas con inhibidor de turbulencia en forma rectangular ^[8].

Por otro lado, Ramírez P. y cols., ^[9] realizaron una modelación matemática de un molde de colada continua, donde se varió la velocidad de colada. De sus resultados cabe destacar que, a bajas velocidades de colada, se promueve la estabilidad del menisco en la zona cercana a la buza y altas velocidades se promueve la estabilidad del menisco en las zonas cercanas a las paredes laterales del molde. Además, se encontró que para poder colar a altas velocidades en el molde de colada continua es necesario utilizar una buza con diseño tal, que la energía sea disipada en los chorros de descarga cosa que no ocurre en las buzas actualmente utilizadas.

Teniendo en mente buscar una buza que sea capaz de disipar la energía cinética en su interior, Solorio G. y cols., ^[10] realizaron una modelación matemática con el objetivo de probar el funcionamiento de buzas con diferentes geometrías sobre el campo fluido dinámico y la remoción de inclusiones en un distribuidor de colada continua. En la Fig. 1.4 se muestran las buzas probadas. La primera corresponde a una buza tradicional, la segunda presenta cámaras con formas rectangulares y, además, en la parte superior se adaptó un dispositivo para hacer que el fluido gire al entrar a la buza, la tercera es una buza con cámaras en forma de diamante. Se encontró que la buza con forma de diamante presentó una disminución en la velocidad de salida, de hasta el 50% en comparación con las velocidades a la entrada de las otras dos buzas probadas.

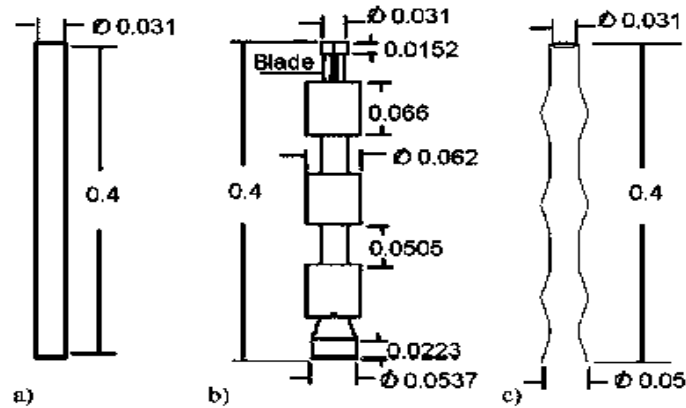


Fig. 1.4 Esquema de las buzas utilizadas, a) Buza convencional, b) Buza con cámaras cuadradas, c) Buza con cámaras en forma de diamante ^[10].

Uno de los estudios principales cuando se correlaciona el efecto de los chorros de descarga y el crecimiento de la cascarilla recién solidificada fue realizado por Brian G. T. y cols., ^[11]. Entre sus resultados, encontraron que el adelgazamiento de la cascarilla se incrementa con altas velocidades de colada, un alto grado de sobrecalentamiento del acero y una transferencia de calor insuficiente en la zona del menisco. También se encontró que si ocurre un taponamiento de la buza, este efecto se incrementa.

Siguiendo esta misma temática D. F. Wu y S. S. Cheng ^[12] se enfocaron en las oscilaciones de nivel y en el crecimiento de la cascarilla recién solidificada. Se varió el ángulo de inclinación de la buza (0° , 15° y 25°). Entre sus principales resultados se encontró que un ángulo de puerto mayor provoca un chorro que impacta más profundo en el molde y hace que el centro de la recirculación inferior se mueva hacia la parte baja y céntrica del molde, causando un flujo ascendente más débil, así como, por ende, una mayor dificultad para la flotación de inclusiones (ver Fig. 1.5).

En relación a las oscilaciones de nivel, se observó una disminución del nivel de 11.6, 6.9 a 3.8 mm en relación con la buza de 0° a la de -25° . De forma similar sucedió con las magnitudes de velocidad en las oscilaciones de nivel. Por otro lado, era de esperarse que al mover el ángulo de inclinación de la buza se moviera la profundidad de impacto del chorro, éste alcanza valores de 260 mm, 360 mm y 470 mm respectivamente. Mientras más profundo sea el impacto del chorro será menor la velocidad del chorro al impactar, por lo que esto beneficia en gran medida el crecimiento y estabilidad de la capa recién solidificada.

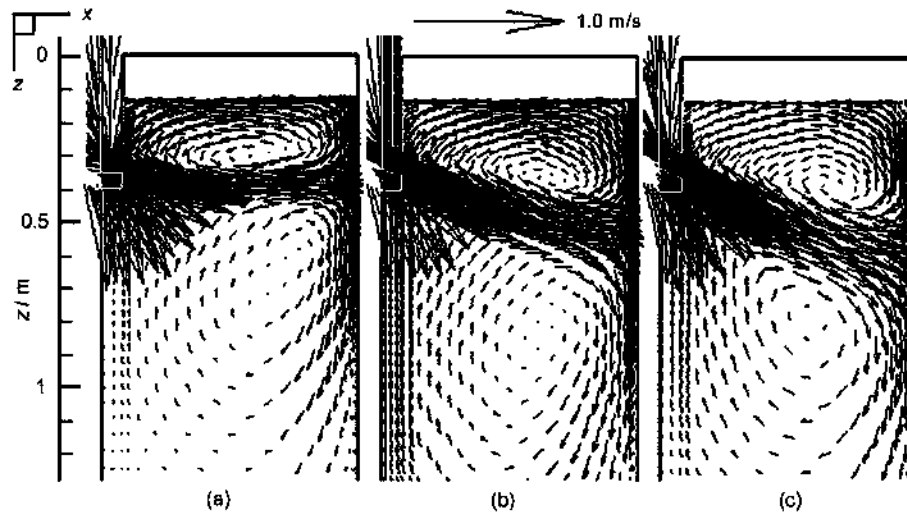


Fig. 1.5. Campos de velocidad para el plano de simetría a) 0° , b) -15° , c) -25° [12].

De sus resultados encontrados, se pudo deducir que al cambiar solo uno de los ángulos de la buza (ver Fig. 1.6) se logra aumentar el área efectiva de ésta, lo cual reduce de manera considerable las oscilaciones de nivel en el molde, las cuales descendieron de valores de 6.9 a 2.4 mm. Un efecto por demás interesante que se encontró en sus resultados, fue que la buza modificada es capaz de no mover el punto de impacto del chorro, pero si bajar la velocidad de impacto de este con la pared, con lo que se promueve una mayor estabilidad en el crecimiento de la costra recién solidificada sin comprometer el atrapamiento de inclusiones en la superficie libre.

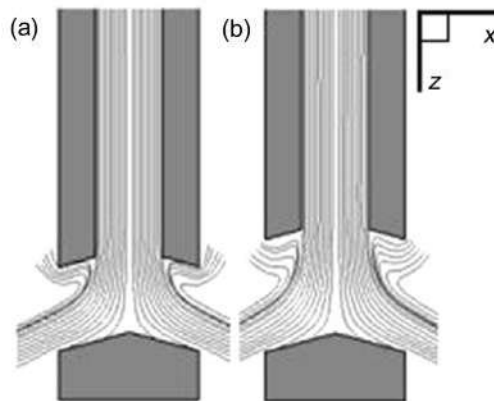


Fig. 1.6. Líneas de corriente dentro de las buzas a) Buza de 15° normal, b) Buza de 15° optimizada [12].

Por otro lado, una tendencia tradicional en la búsqueda de un patrón fluido dinámico que favorezca la calidad en el acero ha sido eliminar el retro-flujo en los puertos de la buza. Se presentan a continuación algunas de las investigaciones más relevantes

sobre este tema en específico. Ruiz C. y cols., ^[13] realizaron un estudio donde evaluaron cinco diferentes diseños de la buza. De sus conclusiones cabe destacar lo siguiente: Se eliminó el retro-flujo en los diferentes diseños que se propusieron en base al redondeado del ángulo superior de los puertos, esto eliminó el cambio brusco de dirección del chorro, evitando así la separación de flujo en la pared de la buza. Además, se encontró que los puertos circulares de las buzas no son los más apropiados para la entrega del metal líquido debido a que tienden a producir chorros fluctuantes y generan altas velocidades y turbulencia en la superficie libre, puertos cuadrados, rectangulares o trapezoidales, generan una mayor utilización del área transversal del puerto y pequeños gradientes de velocidades, es decir, una mejor distribución de velocidades o chorros con mayor superficie de contacto. Por último, se encontró que los cambios bruscos de dirección o velocidad del flujo son debidos a la geometría de la buza y estos son la principal causa del retro-flujo.

Por su parte, García-H. S. y cols., ^[14] utilizó diferentes configuraciones; puertos circulares, puertos rectangulares, variando el ángulo de inclinación y el radio de curvatura del puerto. Encontró que la principal razón del retro flujo en la buza es el diseño inadecuado de los puertos, en donde la baja presión que se presenta a la salida del mismo produce una disipación de energía y propicia que exista una succión del fluido a la salida del puerto en la zona superior de este. Para evitarla se debe de redondear el puerto en su zona superior produciendo así menores velocidades superficiales en el molde, incluso, sí dicho radio se aumenta lo suficiente ya no se requerirá la inclinación del puerto de la buza y el chorro cambiará su dirección por sí solo.

En investigaciones más recientes, Mizobe A. y cols., ^[15] realizaron un estudio en un molde para planchón convencional donde su objetivo consistió en optimizar una buza para evitar el taponamiento de inclusiones en los puertos de descarga. Utilizaron dos modelos de buza, el primero es convencional, mientras que el segundo por su parte, tiene las esquinas de los puertos de la buza redondeados. Entre sus principales resultados encontraron que la buza convencional genera más energía cinética turbulenta en la parte baja de los puertos en comparación con la buza redondeada. Esto tiene como principal repercusión que las inclusiones se adhieran a esta parte de la buza y puedan generar un taponamiento y causar así grandes problemas en lo que a calidad se refiere. Un tiempo después, Mizobe A. y Masanori U. ^[16] basados en un análisis teórico diseñaron una buza para planchón convencional. Su objetivo principal fue disminuir la velocidad máxima a la salida de los puertos. Mediante una simulación matemática se encontró que dicha buza es capaz de reducir la velocidad máxima en los puertos, además de disminuir la energía cinética turbulenta que como es bien sabido, una mayor cantidad de esta

sobre los puertos de la buza contribuye al aumento de la posibilidad de adhesión de inclusiones sobre los puertos, así como un posible desgaste por erosión.

En lo que respecta a las investigaciones utilizando modelos físicos se presentan las contribuciones más destacables.

Chaudhary R. y cols.,^[17] realizaron una investigación, donde su objetivo fue evaluar el cambio en el patrón de flujo al modificar la geometría de la parte inferior de la buza. Ellos utilizaron una buza convencional y en el diseño propuesto la piscina tiene forma de “montaña” (ver Fig. 1.7). Estos investigadores reportaron que el chorro que produce la buza convencional es más grueso, tiene mayor inclinación, es más difusivo en comparación con el chorro que produce la nueva propuesta. Se encontró que la nueva propuesta buza tiende a generar mayores velocidades superficiales, por lo tanto, una mayor turbulencia y en consiguiente, es más fácil que se produzca un atrapamiento de escoria hacia el interior del baño metálico.

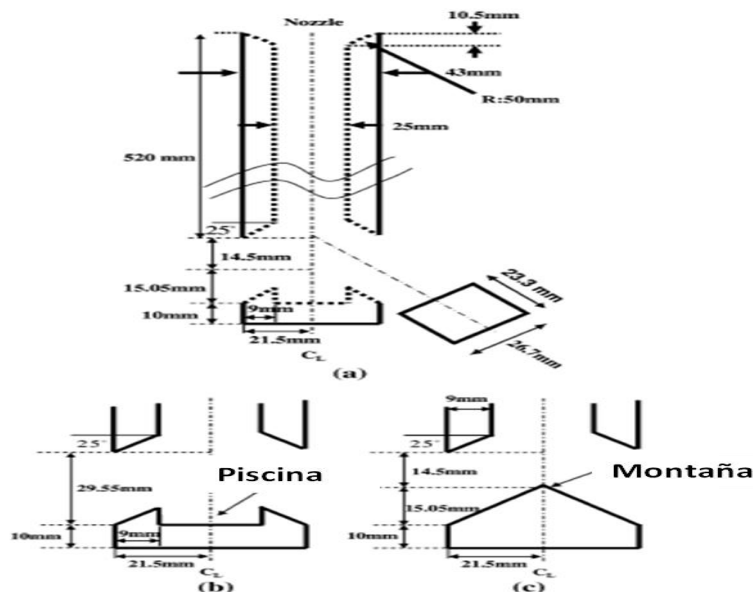


Fig. 1.7. Geometría de la buza, a) Cuerpo de la buza, b) Fondo de la buza con piscina, c) Fondo de la buza con forma de “montaña”^[17].

Calderón I. y cols.,^[18] utilizaron tres propuestas de buzaz, la primera tiene puertos rectangulares (R), la segunda puertos cuadrados (S) y finalmente, la tercera tiene puertos circulares (C). Se encontró, que cada diseño del puerto genera su propio patrón característico de disipación de energía cinética turbulenta al interior de la buza y también en el interior del molde. En un estudio posterior^[19], encontraron que el chorro sufre modificaciones en su trayecto hacia las paredes laterales del molde, dicho fenómeno se aprecia en la Fig. 1.8, donde se puede apreciar que el chorro se

separa en dos principalmente: “separación” y “difusión”. También se encontró que la buza con puerto R propicia altas velocidades incluso cuando está más sumergida que en una posición más superficial y la buza con puerto S tiene un comportamiento inverso al descrito anteriormente.

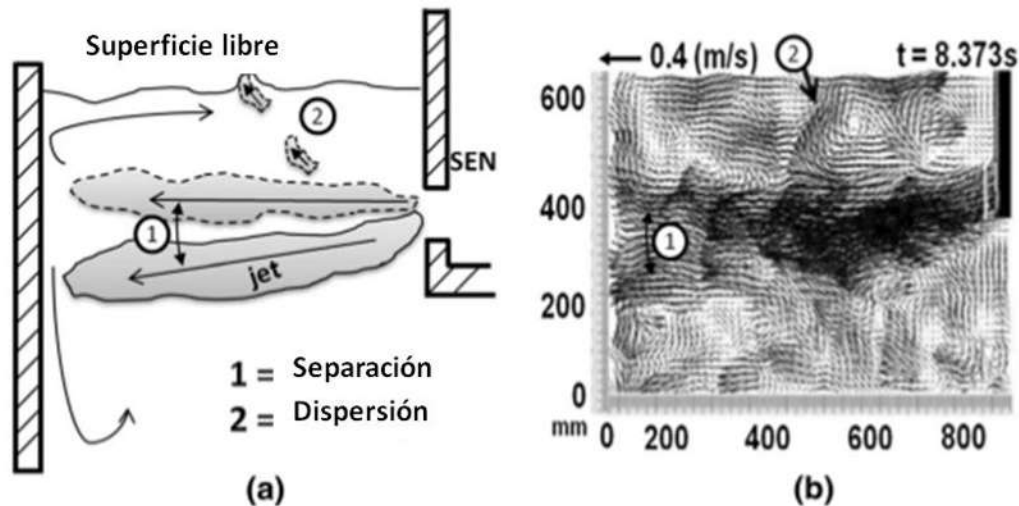


Fig. 1.8. Fenómeno de Separación y Difusión del chorro, a) Esquema de explicación del fenómeno, b) Fenómeno real obtenido a través de mediciones con PIV ^[18].

En lo referente al fenómeno de separación del chorro, en la buza con puerto R se apreció más fuerte el efecto, e incluso con esta misma buza se observaron mayores variaciones en la velocidad en las zonas justo por debajo del menisco, y, por lo tanto, dicha buza genera mayor turbulencia.

Salazar-C. M., y cols., ^[20] realizaron una modelación física con el objetivo de evaluar el efecto del diseño de los puertos de la buza en relación a la inyección del gas Argón al molde. Utilizaron tres diferentes buzas, la primera de ellas tiene puertos cuadrados (S), una buza con puertos cuadrados, pero con un diseño especial en el fondo de esta (U) y una buza con puertos circulares (C). Se encontró que la buza con puerto S provoca un chorro recto y largo, la buza con puerto U provoca un chorro corto y recto y la buza con puerto C provoca un chorro largo y curvado, cabe mencionar que todas estas buzas generan un campo de flujo diferente. En esta misma investigación se reportaron tres distintos patrones de fluido generados a su vez con los incrementos de velocidad de flujo, profundidad de inmersión y argón inyectado. Dichos patrones de fluido se denominan a continuación; DRF (patrón de doble rollo), SRF (patrón de un solo rollo) y PUF (flujo permanentemente inestable). Dichos patrones de fluido se ilustran esquemáticamente en la Fig. 1.9.

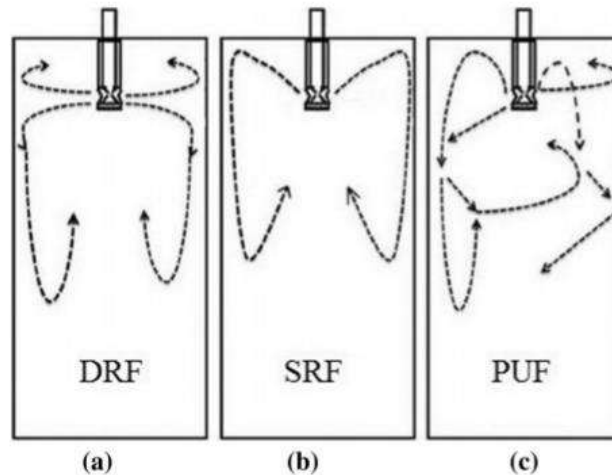


Fig. 1.9. Patrones de flujo en el interior del molde. a) DRF (patrón de flujo de doble rollo), b) SRF (patrón de flujo de un solo rollo), c) PUF (patrón de flujo inestable permanente) ^[20].

El patrón de flujo ilustrado en el inciso a) es muy comúnmente ilustrado en la literatura, se da en muchas condiciones de operación. Por el contrario, el caso b), se da principalmente cuando el ángulo del puerto de la buza tiene una orientación positiva, utilizando altas velocidades de colada y un abuso excesivo de la inyección de argón. En lo que respecta al patrón del caso c), este tiende a originarse cuando existe un alto nivel de turbulencia en el molde.

Por su parte, Rajat K. y cols., ^[21] estudiaron el efecto de variar las dimensiones del puerto de la buza (altura y espesor del puerto) con el propósito de evaluar el crecimiento de la cascarilla que comienza a solidificar y la turbulencia superficial. De sus resultados se concluye que: incrementando la relación entre la altura de la buza y su espesor se disminuyó la amplitud de las oscilaciones sobre la superficie libre y de forma similar se favoreció el crecimiento de la cascarilla de acero, ayudando así a la calidad del producto final.

Buscando encontrar las causas de los diferentes tipos de patrones fluido dinámicos presentes en el molde de colada continua Liqin J., y cols., ^[22] realizó un estudio de un molde utilizando diferentes buzas usando la técnica del PIV. Su estudio se enfocó en la identificación de las causas del flujo asimétrico. Encontró que las fluctuaciones de nivel son un fenómeno inherente a la alta turbulencia en el molde y la causa principal es la asimetría en el flujo. Se encontró que cuando el centro de las recirculaciones inferiores desciende, el flujo ascendente del lado opuesto se incrementa, incrementando, así la altura de las ondas superficiales generadas en la superficie libre. Esto tiende a repetirse cada cierto tiempo en forma de ciclo, que depende de las condiciones de operación utilizadas en el molde (ver Fig. 1.10).

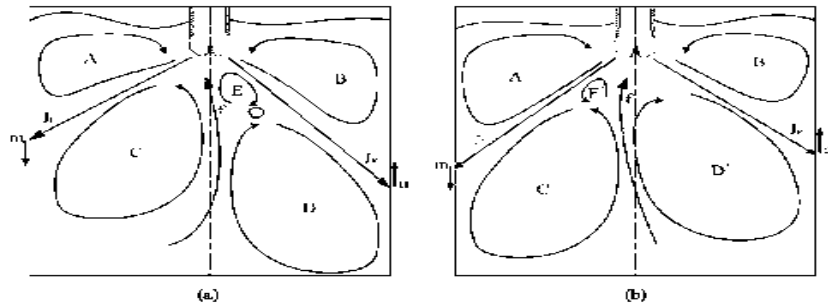


Fig. 1.10. Esquema de la asimetría del flujo. a) Comienzo del periodo de asimetría, b) Final del periodo de asimetría [22].

Ren L. y cols. [23] utilizando la velocimetría de partícula por imagen (PIV) encontraron que los campos instantáneos de velocidad al interior del molde siempre son asimétricos, mientras que en el campo de flujo promediado es simétrico.

Kasai N., y Iguichi M., [24] realizaron un estudio, donde su objetivo fue mediante modelación física estudiar el comportamiento del atrape de escoria desde el menisco hacia el interior del molde. Entre sus principales resultados se encontró que el atrapamiento de escoria se da en el lado con menor velocidad en la superficie libre y la frecuencia de atrapamiento tiende a incrementarse con el aumento de la velocidad de colada.

En los últimos años se ha venido investigando mucho sobre el uso y efecto de los frenos magnéticos en el molde. Dichos dispositivos tienen la capacidad de frenar la velocidad con que los chorros salen de los puertos de la buza y disminuir en gran medida el impacto de estos sobre las paredes angostas del molde, cambiando así la fluido dinámica que se presenta. Algunos de los trabajos más relevantes son presentados a continuación.

Kouji T. y cols., [25] realizaron una simulación matemática utilizando frenos electromagnéticos para controlar la turbulencia superficial en la superficie libre del molde. Ellos encontraron en primer lugar, que al usar dicho dispositivo se disminuyó la turbulencia en la superficie libre, además, se debe de poner una atención especial en el ángulo del puerto de la buza, debido a que los frenos electromagnéticos cambian el patrón de flujo ascendente hacia la superficie libre y, por ende, se puede modificar el porcentaje de atrapamiento de inclusiones a pesar de utilizar dicho dispositivo. Resultados similares encontró Zhogqui L. y cols. [26] y Zhuang L. [27].

Por su parte, Xu L. y cols., [28] utilizaron dos tipos de frenos; uno convencional y un nuevo diseño. El primero de ellos, es un freno tipo “EMBr” o freno convencional que se instala en las caras anchas del molde y cubre a estas en su totalidad, el segundo llamado “V-EMBr”, el cual está instalado en las caras angostas del molde y tiene

como objetivo frenar al chorro cuando impacta dichas caras y disminuir el flujo ascendente hacia la superficie libre. Sus resultados más importantes se muestran en la Tabla 1.1 que refleja el comportamiento del fluido a una velocidad de colada de 1.6 m/min y con una profundidad de inmersión de 225 mm. Se puede notar que al emplear el nuevo diseño de freno (V-EMBr) se logran reducir las oscilaciones de nivel y las velocidades superficiales, incluso, se necesita el doble de potencia 0.2 T vs 0.1 T para producir el mismo efecto al usar el freno EMBr.

Tabla 1.1. Resultados de Lin Xu ^[28].

	Sin EMBr	EMBr a 0.1 T	EMBr a 0.2 T	V-EMBr a 0.1T	V-EMBr a 0.2T
Oscilaciones de nivel máximas	16.2 mm	15 mm	11.9 mm	11.2 mm	6 mm
Velocidad máxima en la superficie libre	0.24 m/s	0.23 m/s	0.22 m/s	0.20 m/s	0.15 m/s

Kubota y cols., ^[29] encontraron un valor en la velocidad sobre la interfaz metal-escoria, sobre la cual se puede evitar el arrastre de polvo colador hacia el interior del molde, dicho valor corresponde al rango de 0.3 m/s a 0.4 m/s, dichos investigadores resaltan que, si no se excede dicho valor, la emulsificación no podría ocurrir.

Otro de los tipos de estudios frecuentemente encontrados cuando se utilizan frenos magnéticos en el molde es la variación de la profundidad de inmersión. A este respecto, Jin K. y cols., ^[30] encontraron que los frenos electromagnéticos pueden disminuir la asimetría del flujo en comparación cuando no se usan dichos frenos. De forma similar, el chorro al salir de los puertos de la buza tienden a ser más delgados e intensos, esto trae como consecuencia una disminución en las velocidades del flujo sobre la superficie libre, que incluso puede llegar a ser muy bajas (por debajo de 0.05 m/s) y provocar defectos como la solidificación del menisco, entre otros. Además, se encontró que con la aplicación de los frenos magnéticos disminuyó en gran medida la formación de vórtices en las inmediaciones de la buza.

Cabe mencionar que la mayoría de los estudios realizados con los dispositivos de frenos magnéticos se hicieron mediante simulación matemática, algunos de ellos utilizaron la técnica del PIV para validar los resultados obtenidos mediante CFD, sin embargo, utilizar dichos dispositivos en el flujo de metales líquidos en la vida real es muy costoso y además de complicado por la nula visibilidad en el fluido y las altas temperaturas presentes. A pesar de esto, Zhan Y. y cols., ^[31] realizó una modelación física de un molde de colada continua para estudiar el efecto de los frenos magnéticos sobre la estabilidad del flujo al utilizar velocidades de colada de hasta 3 m/min, utilizó como fluido de trabajo; mercurio líquido. Se encontró que los

frenos magnéticos no solamente tienden a bajar las velocidades del chorro, sino que pueden incluso cambiarlo de dirección y de esta forma es posible reducir las velocidades superficiales y, por lo tanto, las oscilaciones de nivel. En relación a la distancia entre los magnetos, se encontró que cuando la distancia entre ellos es reducida el efecto de freno es mayor y debilita las recirculaciones superiores en el molde, sí esta tendencia se incrementa, puede incluso llegar a generar velocidades muy bajas produciendo el defecto de estancar el flujo en la superficie libre (“meniscus frezzing”).

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Colada Continua

El proceso de colada continua consta de seis partes y se describe brevemente a continuación; una vez que el acero líquido se encuentra en la olla metalúrgica pasa a través de una boquilla recubierta hacia el distribuidor. En el distribuidor se realizan algunas operaciones de limpieza en el acero líquido, dicho acero sale del distribuidor a través de una buza sumergida y entra al molde. En el molde, se lleva a cabo la extracción de calor para posteriormente comenzar a solidificar por las paredes de éste hacia el centro. Una vez que se tiene una capa solidificada suficientemente gruesa es extraído por medio de unos rodillos de tracción que se ubican por debajo de la máquina de colada continua. Inmediatamente que el planchón abandona completamente el molde es rociado con chorros de agua, lo que causa que la capa solidificada de acero crezca hacia el centro del planchón, Se sabe que el punto donde el planchón se encuentra solidificado totalmente es a diez metros por debajo del molde de colada [32]. Al final de los rodillos de tracción y una vez que el planchón está totalmente solidificado es cortado en placas con ayuda de un soplete. Estas placas son procesadas posteriormente, por ejemplo, son laminadas en caliente o frío para darles forma de láminas, barras, rieles y otras formas.

El proceso de colada continua se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.1.

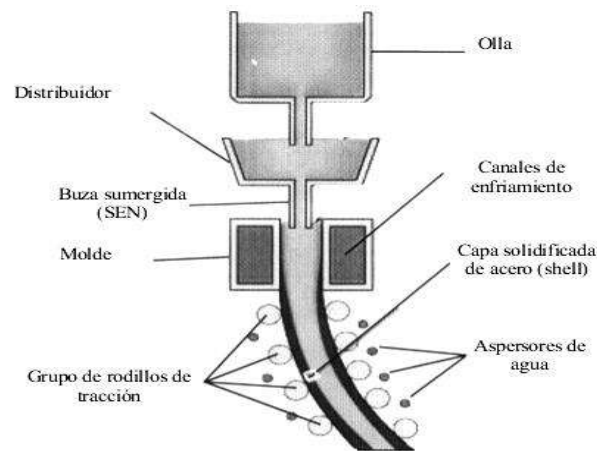


Fig. 2.1. Proceso de colada continua.

Para el caso específico del planchón las dimensiones pueden variar para la sección transversal, pero siempre se conserva una relación de tamaño mucho mayor entre el ancho y el espesor, ver Fig. 2.2.

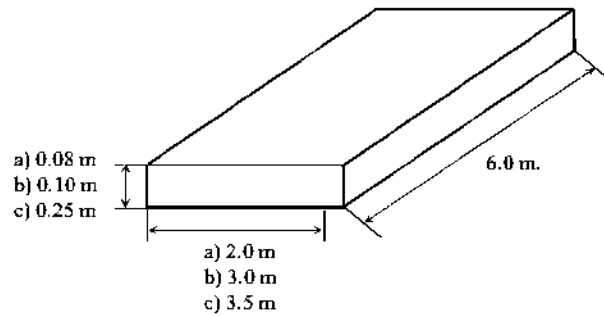


Fig. 2.2. Dimensiones típicas para planchón convencional.

2.1.1 El Molde

El molde es la parte más importante de una máquina de colada continua, debido a que es precisamente en su interior donde se lleva a cabo la extracción de calor y posterior solidificación del acero. Generalmente el molde está fabricado de cobre de gran pureza y por consiguiente de alta conductibilidad térmica. En ocasiones tienen recubrimientos en cromo por la parte interior. Algunos moldes tienen placas lisas de cobre en cada cara, apoyadas sobre placas de acero en las que se han tallado los canales de agua de refrigeración.

En general al obtener un acero más limpio, la consecuencia directa es obtener un producto con mayor calidad y con mejores propiedades esto se puede llevar a cabo mediante una buena práctica del control del flujo de acero líquido y de una extracción de calor apropiada, con esto se logrará una buena calidad tanto interna como superficial del acero colado. Todos los procesos mencionados anteriormente están estrechamente relacionados y son gobernados por la dinámica de flujo del acero al interior del molde mediante mecanismos como; convección y difusión del transporte de momento, masa y energía. En la Fig. 2.3 se muestra un esquema del molde.

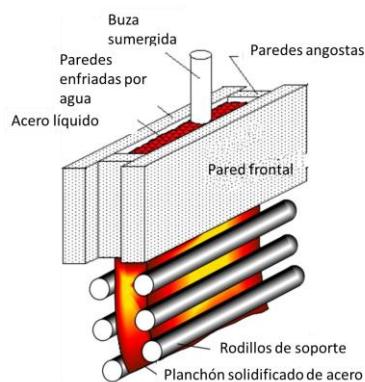


Fig. 2.3. Esquema de un molde para planchón convencional.

2.1.2 Buza de Alimentación Sumergida

Las buzas de alimentación sumergidas (“SEN”) están fabricadas de materiales refractarios, generalmente de una aleación de alúmina-carbono. Una porción de buza que permanece sumergida en el molde, tiene un recubrimiento exterior de zirconia-carbono debido a excelente resistencia a la corrosión de zirconia contra el ataque corrosivo de la escoria. La buza sumergida tiene como objetivo principal entregar el acero uniformemente al molde, además de protegerlo de una reoxidación por contacto con la atmosfera y, por consiguiente, una caída de temperatura del acero líquido.

Las observaciones en planta han encontrado que muchos problemas de calidad se asocian directamente con la operación de la buza y el patrón de flujo resultante en el interior del molde. Por ejemplo, la oscilación de nivel y la turbulencia en la superficie libre pueden arrastrar parte de la escoria o burbujas de gas hacia el acero, causando el atrape de grandes inclusiones muy perjudiciales y “remaches” superficiales conocidos como “slivers”. También se ha demostrado la importancia de la buza en el rompimiento de la capa recién solidificada de acero ^[12], sí el sobrecalentamiento del chorro y la velocidad de colada es alta, entonces el calor suministrado por el chorro al impactar la costra recién solidificada pudiera exceder la extracción de calor en la zona exterior de dicha costra, lo que resultaría en una erosión y una posible ruptura de dicha costra.

Por otro lado, en la industria es muy común que la profundidad de inmersión de la buza se cambie durante el proceso, esto se lleva a cabo para minimizar la erosión en la interfaz metal-escoria-cerámico. Incrementando la profundidad de inmersión, se cambia el patrón de flujo ascendente, disminuyendo el ascenso del chorro hacia la interfaz y disminuyendo también la intensidad de las velocidades en la superficie del baño. Así, posiciones más profundas de la buza reducen el atrapamiento de escoria. Sin embargo, una inmersión muy profunda puede mandar partículas dentro de las zonas de recirculación inferiores, donde una gran cantidad quedaran atrapadas y generaran defectos permanentes en el producto final. Además, el metal que fluye dentro del molde en la parte superior se vuelve más lento y pierde temperatura; se puede producir un mezclado insuficiente ocasionando defectos tales como fracturas longitudinales y transversales ^[33].

Un aspecto muy ligado a la profundidad de inmersión es el ángulo de inclinación en los puertos de la buza. La dirección del chorro de descarga de la buza debe de ser diseñada para evitar que el chorro tenga un ángulo de inclinación muy pequeño o grande según sea el ancho del molde, la velocidad de colada y otros parámetros. Un ángulo pequeño del chorro puede causar que el acero líquido llegue con alta velocidad al menisco, dando lugar a una alta turbulencia en la superficie libre y, por

consiguiente, al posible arrastre de escoria hacia el molde. Entonces, la escoria emulsionada puede causar la formación de inclusiones perjudiciales de aluminio, silicio y calcio. Cuando estos óxidos están presentes cerca la superficie del planchón de acero se puede presentar defectos críticos de línea (conocidos como “astillas o slivers”). Un ángulo de chorro pronunciado puede provocar que éste penetre demasiado en el molde e inhibir así la flotación de inclusiones y el posterior atrape de estas en la capa de escoria. También, puede causar que el acero líquido pierda su sobrecalentamiento y al momento en que alcanza el menisco pueda ocurrir un fenómeno conocido como “solidificación del menisco”, que puede provocar defectos conocidos como oscilaciones profundas, entre otros.

La Fig. 2.4 muestra un esquema de una buza típica, donde se muestran sus diferentes parámetros.

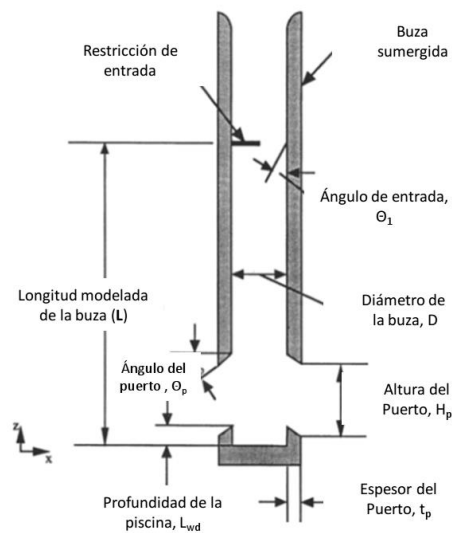


Fig. 2.4. Fenómenos presentes en el molde.

La buza entonces debe diseñarse para suministrar el acero con el nivel óptimo de sobrecalentamiento hacia el menisco, evitando a la vez la turbulencia excesiva de la superficie libre y en la medida de lo posible las altas velocidades del chorro sobre las paredes angostas. En algunas operaciones, también es importante que el patrón de flujo ayude a la flotación de inclusiones no metálicas hacia la capa de escoria y de manera general, debe de generar un campo fluido dinámico que favorezca la reducción de los defectos relacionados a la fluido dinámica en el molde.

2.2 Defectos en el acero relacionados con la fluido dinámica al interior del molde

La Fig. 2.5 ilustra algunos de los fenómenos presentes en el molde que pueden provocar defectos. Los chorros de acero fundido son dirigidos hacia el seno de metal líquido a través de los puertos de la buza, éstos impactan las paredes angostas del molde, dicho impacto puede provocar el adelgazamiento de la cascarilla recién solidificada e incluso generar rompimientos de línea; si el sobrecalentamiento del chorro (“Superheat”) es demasiado alto y el espacio interfacial es excesivo [11].

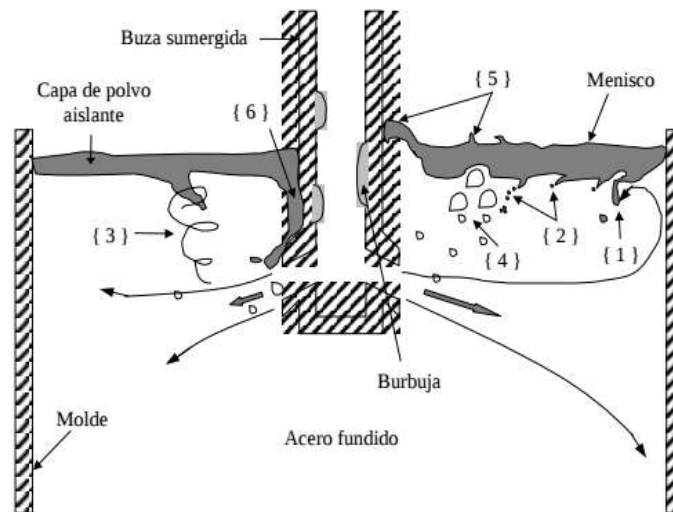


Fig. 2.5. Fenómenos en el molde. 1. Arrastre de polvo producido por el chorro, 2. Arrastre de partículas de polvo desde la interfaz, 3. Formación de remolinos, 4. Ruptura de la capa protectora producida por burbujas, 5. Formación de ondas superficiales, 6. Arrastre de polvo a la buza [11].

Inmediatamente después del impacto del chorro con las paredes angostas, el fluido que se mueve hacia la parte superior del molde avanza muy pegado a la cara angosta y alcanza la superficie libre, si las velocidades en esta zona son muy elevadas, pueden provocar fluctuaciones del nivel sobre dicha superficie [5,6,12,28]. Cuando las oscilaciones de nivel son demasiado altas, la infiltración del polvo colador en el espacio interfacial se hace más difícil, lo que puede conducir a un flujo de calor no uniforme sobre el menisco, grietas longitudinales y otros defectos superficiales. También, la turbulencia superficial excesiva puede causar fluctuaciones rápidas del nivel en la superficie libre. Esto puede interrumpir la solidificación estable en el menisco, dando lugar a marcas de oscilación profundas, depresiones superficiales, grietas superficiales y atrapamiento de escoria, que conduce a defectos de laminación.

Por otro lado, si las velocidades superficiales del flujo son bajas, o si el sobrecalentamiento del acero en las inmediaciones del menisco es demasiado bajo entonces éste puede solidificarse parcialmente para formar marcas profundas de oscilación y un defecto conocido como "ganchos" (hook) [34]. El sobrecalentamiento también afecta a la nucleación y al crecimiento de los granos, que controlan la estructura cristalina y defectos tales como la segregación del material.

Además, es muy conocido que los chorros arrastran inclusiones no metálicas al interior del molde. Si la dinámica de flujo permite que estas partículas alcancen la superficie libre, deberían quedar atrapadas en la capa de escoria, siempre y cuando ésta no esté saturada y las fuerzas de tensión superficial no sean excesivas. Las inclusiones no metálicas producen defectos conocidos comúnmente como hendiduras ("gaps"), ampollas de "tubo de lápiz" y otros defectos costosos [35].

2.3 Modelación Física

Las altas temperaturas junto con la nula visibilidad en el acero líquido hacen imposible observar el fenómeno de dinámica de fluidos que ocurre dentro del molde, por lo cual se tiene que recurrir a otro tipo de herramientas para su análisis, tal herramienta es la modelación física, la cual permite simular el fenómeno de estudio con modelos hechos de materiales transparentes y a escala, dado que el costo de hacerlo en planta es muy alto. Rigurosamente, la construcción de modelos físicos debe satisfacer los criterios de similitud, los cuales son:

Similitud Geométrica: Es evidente que si no se cumple esta condición la comparación de resultados entre el modelo y el prototipo es imposible. Se designará con el subíndice p a las magnitudes del prototipo y con el subíndice m a las de modelo. Por lo tanto, las longitudes L , superficies A , y volúmenes V homólogos del prototipo y del modelo han de verificar las siguientes relaciones:

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad \frac{A_p}{A_m} = \lambda^2 \quad \frac{\text{Volumen}_p}{\text{Volumen}_m} = \lambda^3 \quad (2.1)$$

Donde λ – escala del prototipo con relación al modelo.

Similitud Dinámica. Para que los fenómenos en el modelo y el prototipo sea comparables no basta que los modelos de estructuras sean geoméricamente semejantes a los prototipos, sino que también los flujos, o sea las líneas de corriente, han de ser semejantes. Para ello es necesario que las velocidades,

aceleraciones, fuerzas etc., se hallen también en relaciones bien determinadas. Estas relaciones se reducen a los números de Euler, Froude, Reynolds, etc., según sea el caso. Las fuerzas más importantes que gobiernan el flujo del líquido en el molde son: inerciales, viscosas, gravitacionales y son expresadas a continuación:

$$\text{Fuerzas Inerciales } F_i = \rho v^2 L^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Fuerzas Viscosas } F_\eta = \eta v L \quad (2.3)$$

$$\text{Fuerzas Gravitacionales } F_g = \rho g L^3 \quad (2.4)$$

Por lo tanto, en el modelo y el prototipo

$$\frac{F_{i,m}}{F_{i,p}} = \frac{F_{\eta,m}}{F_{\eta,p}} = \frac{F_{g,m}}{F_{g,p}} = \text{Constante} \quad (2.5)$$

Teniendo en cuenta los dos primeros términos de la relación anterior conducirá a la relación de fuerzas inerciales y viscosas en el modelo y el prototipo:

$$\frac{F_{i,m}}{F_{\eta,m}} = \frac{F_{i,p}}{F_{\eta,p}} \quad (2.6)$$

$$\left[\frac{\rho v^2 L^2}{\eta v L} \right]_m = \left[\frac{\rho v^2 L^2}{\eta v L} \right]_p \quad (2.7)$$

$$Re_m = Re_p \quad (2.8)$$

De igual forma, la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales en el modelo y prototipo es dada por el número de Froude

$$\frac{F_{i,m}}{F_{g,m}} = \frac{F_{i,p}}{F_{g,p}} \quad (2.9)$$

$$\left[\frac{v^2}{gL} \right]_m = \left[\frac{v^2}{gL} \right]_p \quad (2.10)$$

$$Fr_m = Fr_p \quad (2.11)$$

Similitud Térmica. Se refiere al efecto de la temperatura en el modelo y en el sistema real. Dos cuerpos son térmicamente similares si ellos tienen igual u homóloga temperatura en un tiempo correspondiente. El significado de esta idea es, si los patrones de flujo de calor en los dos cuerpos son similares, entonces estos cuerpos pueden ser considerados térmicamente similares.

2.3.1 Elección de la Escala

Las principales fuerzas que se consideran para obtener los criterios de similitud en un molde de colada continua son las fuerzas inerciales, las fuerzas viscosas, las fuerzas gravitacionales y las fuerzas de tensión superficial. Representando a su vez a los números adimensionales de Reynolds, Froude, y el número de Weber. Satisfacer los números de Reynolds y Froude al mismo tiempo, a temperatura ambiente para un modelo de agua, solamente es posible con el uso de un modelo a escala 1:1 manteniendo la misma velocidad en el modelo-prototipo.

Por lo tanto, se pretende utilizar una escala de 1:1 entre el modelo y el prototipo a fin de minimizar los posibles problemas del escalamiento. Siendo así, se considerará despreciable el efecto de la tensión superficial, además de considerar únicamente un flujo homogéneo, es decir, sin la intervención de un gas o arrastre de aire. En base a esto último, es posible obtener una buena precisión del flujo de fluidos utilizando solo los criterios de similitud relacionados con el número de Reynolds y Froude.

2.3.2 Propiedades de los Fluidos de Trabajo

Desde hace mucho tiempo atrás, es una práctica muy común y bastante documentada utilizar agua como fluido de trabajo en la modelación de un molde de colada continua, debido a que es un material fácil de obtener, manejar y principalmente porque su viscosidad cinemática a temperatura ambiente es muy similar a la del acero líquido a 1600 °C. La Tabla 2.1 muestra las propiedades físicas de ambos fluidos.

Tabla 2.1. Propiedades físicas del agua y del acero. ^[36]

Propiedad	Agua a 20 °C	Acero a 1600 °C
Viscosidad absoluta (μ) (kg/ms)	0.001	0.0064
Densidad (ρ) (kg/m ³)	1000	7000
Viscosidad Cinemática (η) (m ² /s)	1.0*10 ⁻⁶	0.913*10 ⁻⁶
Tensión superficial (σ) (N/m)	0.072	1.6

Cuando se utiliza un modelo a escala 1:1 para un molde de colada continua y agua como fluido de trabajo se puede comprobar la similitud entre los números de Reynolds y Froude tanto en acero en el modelo como en el prototipo:

$$Re_m = Re_p \quad (2.8 \text{ repetida})$$

$$\frac{\rho_{\text{agua}} v_{\text{agua}} L_{\text{agua}}}{\mu_{\text{agua}}} = \frac{\rho_{\text{acero}} v_{\text{acero}} L_{\text{acero}}}{\mu_{\text{acero}}} \quad (2.12)$$

Sabiendo que las viscosidades cinemáticas y las longitudes son iguales entre el modelo y el prototipo se tiene que la velocidad en ambos sistemas es:

$$v_{acero} = \frac{0.913 \cdot 10^{-6} v_{agua}}{1 \cdot 10^{-6}} \rightarrow 1.1 v_{acero} \cong 1.0 v_{agua} \quad (2.13)$$

Esto quiere decir que la velocidad en el modelo es aproximadamente igual a la velocidad en el prototipo.

Por otro lado, si se considera ahora solo el número de Froude se tiene:

$$Fr_m = Fr_p \quad (2.11 \text{ repetida})$$

$$\frac{v_{agua}^2}{g_{agua} L_{agua}} = \frac{v_{acero}^2}{g_{acero} L_{acero}} \rightarrow v_{acero} = v_{agua} \quad (2.14)$$

Resulta destacable que las relaciones entre las velocidades entre el prototipo y el modelo son iguales entre sí.

2.4 Velocimetría de Partícula por Imagen

La velocimetría de imagen de partícula (PIV, por sus siglas en inglés) es una técnica de láser pulsátil doble que se usa para medir la distribución de velocidad instantánea en un plano de flujo cuando se determina fotográficamente el desplazamiento de las partículas en el plano durante un intervalo muy breve. A diferencia de los métodos como la anemometría de hilo caliente y la LDV, que miden velocidad en un punto, la PIV proporciona valores de velocidad simultáneamente a lo largo de toda una sección transversal, y por ende es una técnica de campo completo. La PIV combina la precisión de la LDV con la capacidad de visualización del flujo y proporciona un mapeo instantáneo de campo de flujo.

La técnica PIV se ha utilizado desde mediados de la década de los años ochenta, y su uso y capacidades han aumentado en años recientes con las mejoras en las tecnologías de cámara de carga acoplada (CCD) y dispositivo de registro de imagen. La precisión, flexibilidad y versatilidad de los sistemas PIV con su capacidad de capturar imágenes de todo el campo con tiempo de exposición por abajo de los microsegundos, los ha convertido en herramientas extremadamente valiosas en el estudio de los flujos supersónicos, las explosiones, la propagación de fuego, el crecimiento y colapso de burbujas, turbulencia y flujo no-estacionario.

La técnica PIV para medición de velocidad consiste de dos pasos principales: visualización y procesamiento de imagen. El primer paso es sembrar el flujo de partículas adecuadas con la finalidad de indicar el movimiento del fluido. Luego un pulso de haz de luz de láser ilumina una delgada rebanada de campo de flujo en el plano deseado, y las posiciones de las partículas en dicho plano se determinan

cuando se detecta la luz dispersada por las partículas en un video digital o cámara fotográfica colocada en ángulos adecuados al plano iluminado (Fig. 2.6).

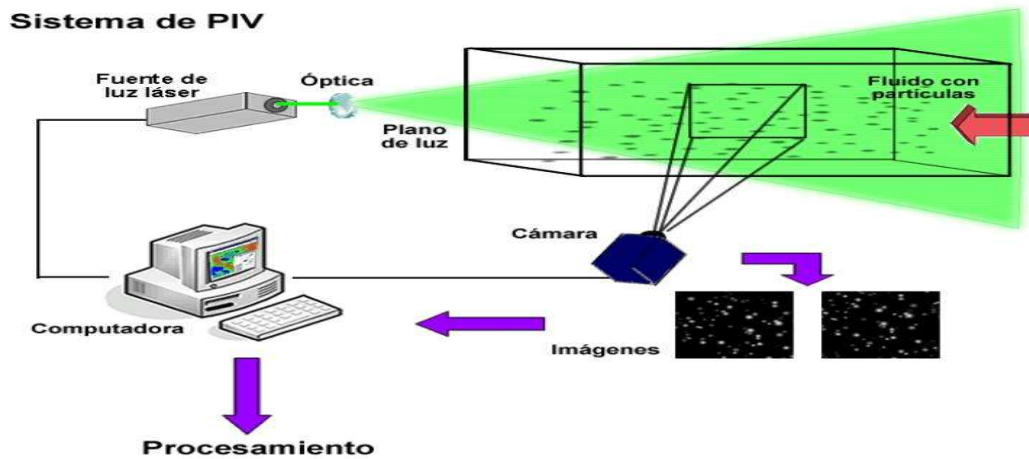


Fig. 2.6. Configuración típica de PIV.

Después de un breve periodo Δt (usualmente en ms), las partículas se iluminan de nuevo con un segundo pulso de luz de láser, y se registran sus nuevas posiciones. Con la información de estas dos imágenes se determinan los desplazamientos Δs de partícula para todas las partículas, y la magnitud de la velocidad de las partículas en el plano iluminado por el haz de luz de láser se determina a partir de $V = \Delta s / \Delta t$. La dirección del movimiento de las partículas también se determina a partir de las dos posiciones, de modo que se calculan los dos componentes de velocidad en el plano. Los algoritmos integrados de los sistemas PIV determinan las velocidades a miles de elementos de área llamados regiones de interrogación a través de todo el plano y muestran el campo de velocidad sobre el monitor de computadora en cualquier forma deseada.

Las partículas sembradas deben tener la capacidad de seguir las líneas de trayectoria en el flujo para que sus movimientos sean representativos del flujo, y esto exige que la densidad de la partícula sea igual a la densidad del fluido (de modo que sean neutramente flotantes) o las partículas serán tan pequeñas (del tamaño de μm) que sus movimientos relativos al fluido serán insignificantes. Las partículas muy pequeñas se deben usar en flujos de alta velocidad. Las partículas de carburo de silicio (diámetro medio de $1.5 \mu\text{m}$) son adecuadas para flujo tanto de líquido como de gas, las partículas de dióxido de titanio (diámetro medio de $0.2 \mu\text{m}$) por lo general se usan para flujo de gas y son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura, y las partículas de látex de poliestireno (diámetro nominal de $1.0 \mu\text{m}$) son adecuadas para aplicaciones de baja temperatura. Las partículas recubiertas de metal (diámetro medio de $9.0 \mu\text{m}$) también se usan para flujos de agua sembrada para

mediciones LDV debido a su alta reflectividad. Las burbujas de gas, así como las gotas de ciertos líquidos como el aceite de oliva o el de silicio se usan como partículas sembradas después de que se atomizan a esferas en el orden de los micrómetros.

Con la PIV también se pueden obtener otras propiedades del flujo, como la vorticidad y las razones de esfuerzo, y se pueden estudiar los detalles de la turbulencia. Los recientes avances en la tecnología PIV han hecho posible obtener perfiles de velocidad tridimensionales en una sección transversal de un flujo con el uso de dos cámaras. Esto se hace cuando se registran simultáneamente las imágenes del plano que sirve de blanco por medio de ambas cámaras en diferentes ángulos, procesan la información para producir dos mapas de velocidad bidimensional separados, y los combinan para generar el campo de velocidad tridimensional instantáneo [37].

2.5 Dinámica Computacional de Fluidos

Existen dos métodos fundamentales para diseñar y analizar sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos: experimentación y cálculo. El primero conlleva, por lo general, la construcción de modelos que son probados en túneles de viento u otras instalaciones, mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de manera analítica o computacional. Aquí es donde la Dinámica de Fluidos Computacional (“CFD”) entra en juego. CFD es una herramienta que utiliza métodos numéricos para la solución de las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos y transferencia de calor (conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, etc.) en un dominio fluido en el que han de definirse:

- Geometría y mallado.
- Condiciones frontera.
- Condiciones iniciales.
- Modelos matemáticos y algoritmos.

Sobre dicho dominio se resuelven las ecuaciones de continuidad, Navier Stokes y las adicionales específicas del modelo en cuestión (turbulencia, multifásico, fuerzas de flotación, energía, etc.) en cada una de las ‘celdas’ que conforman el mallado del ‘dominio’, ya sea en régimen estacionario o en régimen transitorio. De la solución de estas ecuaciones se obtienen los campos de presión y velocidad en cada punto del dominio. Los resultados se obtienen y trabajan en forma de gráficas (animaciones espaciales o temporales) y de forma numérica (base de datos, gráficas, curvas, etc.).

2.5.1 Ecuaciones Constitutivas

Una solución teórica es aquella que puede ser escrita en forma de ecuación usando funciones conocidas y notación matemática. Las ecuaciones de Navier-Stokes son la herramienta más poderosa para la dinámica de fluidos computacional, sin embargo, son extremadamente difíciles de resolver en su forma completa. Con el objeto de describir completamente el movimiento de un fluido deben conocerse las siguientes cantidades del sistema:

- Densidad (ρ)
- Presión (P)
- Temperatura (T)
- Velocidad en las tres direcciones espaciales u , v y w (correspondientes a x , y , z)

Ya que hay seis incógnitas, se necesitan seis ecuaciones en total para encontrar la solución de un flujo tridimensional no isotérmico y transitorio. Junto con la Ley de los gases perfectos, las cinco ecuaciones restantes son las ecuaciones de Continuidad, de Navier-Stokes y de energía, las cuales se muestran a continuación.

Conservación de la masa (Ecuación de Continuidad): La ecuación de conservación de masa dice que, la velocidad de acumulación de masa es igual a la velocidad de entrada de masa menos la velocidad de salida de masa. Expresada en forma diferencial se tiene que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0 \quad (2.15)$$

Conservación de la cantidad de movimiento: La ecuación de movimiento dice que, la velocidad de acumulación de cantidad de movimiento será igual a la velocidad de entrada de cantidad de movimiento menos la velocidad de salida de cantidad de movimiento, más la sumatoria de las fuerzas que actúen en el sistema. Expresada en forma diferencial para cada componente se tiene:

Componente x :

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.16)$$

Componente y :

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.17)$$

Componente z :

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.18)$$

Conservación de la Energía: Afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía. Expresada en forma diferencial, se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[p \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[p u \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[p v \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[p w \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] = \\ k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \mu \left[u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} + \right. \\ \left. \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \rho u g_x + \rho u g_y + \rho u g_z \end{aligned} \quad (2.19)$$

La resolución de estas ecuaciones es imposible, y la razón es que están acopladas. Esto significa que no pueden ser resueltas una a la vez de manera independiente, además de que los valores obtenidos para cada una afectan simultáneamente las soluciones en otros puntos del campo de flujo [38].

2.5.2 Discretización

Se ha visto que las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido se componen de diferenciales parciales. Estas ecuaciones están construidas basándose en combinaciones de las variables del flujo tales como las componentes de velocidad, la presión del fluido y sus derivadas, lo que evita que los ordenadores puedan ser usados directamente en su resolución. La razón principal de este hecho es que la solución teórica (analítica) es válida en cada punto del campo de flujo mientras que la solución computacional (discreta) utilizada en la dinámica de fluidos computacional intenta resolver las ecuaciones sólo en un número específico de puntos o dominio, definido por una malla como se mostrará posteriormente.

Como ejemplo podemos tomar una función $f(x)$; en donde la solución analítica es posible y continua en todos los puntos y por otro lado la solución computacional no resulta en una función continua, sino que simplemente reporta una respuesta numérica en los puntos específicos donde hayamos decidido calcularla (Fig. 2.7) [39].

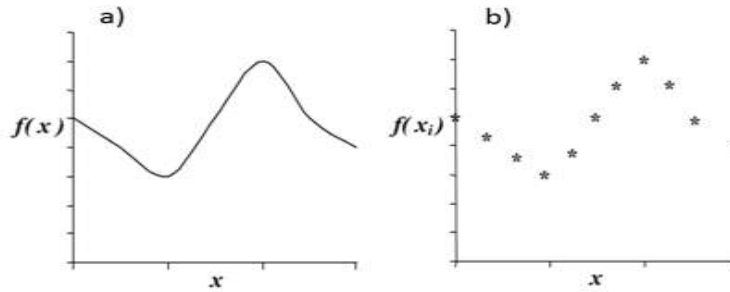


Fig. 2.7. Soluciones posibles para la función imaginaria $f(x)$. a) Solución analítica, b) Solución discreta.

Por tanto, las ecuaciones diferenciales parciales tienen que ser transformadas en ecuaciones que contienen solo números y la combinación de éstos tiene que estar descrita por operaciones simples. A este proceso de transformación de las ecuaciones diferenciales parciales a una ecuación numérica análoga susceptible de resolverse en una computadora se le conoce como discretización numérica.

Existen varios métodos mediante los cuales la discretización numérica puede llevarse a cabo y se agrupan en:

- Diferencias Finitas.
- Elemento Finito.
- Volumen Finito.

Para el presente trabajo se utilizó la técnica de volumen finito, razón por lo cual se describe brevemente la forma de discretizar una ecuación mediante esta técnica.

2.5.2.1 Discretización por el Método de Volumen Finito

Esencialmente, las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el sistema se convierten a su forma numérica mediante una transformación basada en la física. La forma más sencilla de analizar este proceso es considerar una ecuación diferencial parcial típica como ejemplo y realizar su discretización. Para este efecto se tomará la ecuación de conducción de calor unidimensional en estado estable:

$$\frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (2.20)$$

Donde K es el coeficiente de conducción térmica, T es la temperatura y S es un término fuente que en este caso representa la tasa de generación de calor por unidad de volumen. Para la discretización mostrada en la Fig. 2.8 se tiene el punto P de la malla, el cual tiene como vecinos los puntos W (a la izquierda, es decir en la dirección de $-x$) y E (a la derecha, es decir, en la dirección de x). La distancia entre

W y P es $(\delta x)_w$, la distancia entre P y E es $(\delta x)_e$. Entre los puntos W y P se encuentra el punto w que corresponde al límite izquierdo del volumen de control construido en torno a P. Entre los puntos P y E se encuentra el punto e que corresponde al límite derecho del volumen de control considerado. La distancia entre w y e es Δx . Como este es un problema unidimensional, el volumen de control tiene dimensiones: $\Delta x \times 1 \times 1$.

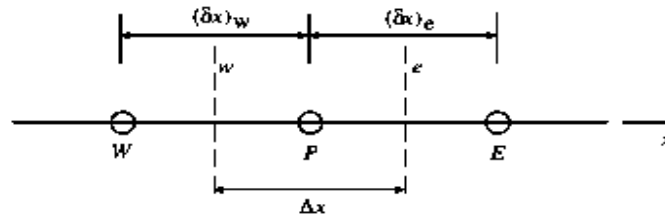


Fig. 2.8. Discretización por volúmenes finitos.

Integrando la ecuación (2.20) en el volumen de control considerado, se tiene:

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0 \quad (2.21)$$

Definiendo $\underline{S} \Delta x = \int_w^e S dx$ la ecuación anterior se reduce a:

$$\left(K \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(K \frac{dT}{dx} \right)_w + S \Delta x = 0 \quad (2.22)$$

Para evaluar las derivadas de T en los puntos w y e, se requiere hacer una suposición respecto de la variación de T en el volumen de control. Por ejemplo, en la Fig. 2.9 se muestran dos simples suposiciones posibles: paso constante (stepwise) y paso lineal (piecewise linear). Es claro que la suposición de paso constante no es buena, ya que las derivadas en los puntos w y e no están definidas. Desde ese punto de vista la suposición más simple que permite evaluar las derivadas en w y e es la de paso lineal. En ese caso dichas derivadas valen:

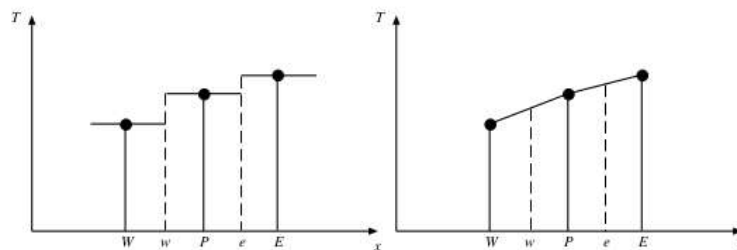


Fig. 2.9. Funciones de interpolación de la variable de integración dentro del volumen de control. A la izquierda paso constante, a la derecha paso lineal.

$$\left(K \frac{dT}{dx}\right)_w = k_w \frac{T_p - T_w}{\delta x_w} \quad (2.23)$$

$$\left(K \frac{dT}{dx}\right)_e = k_w \frac{T_e - T_p}{\delta x_e} \quad (2.24)$$

Sustituyendo estos resultados en (2.22), se obtiene:

$$k_w \frac{T_e - T_p}{\delta x_e} - k_w \frac{T_p - T_w}{\delta x_w} + S \Delta x = 0 \quad (2.25)$$

Ecuación que puede simplificarse para llegar a:

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + b \quad (2.26)$$

Dónde:

$$a_e = \frac{k_e}{\delta x_e}, \quad a_w = \frac{k_w}{\delta x_w}, \quad a_p = a_e + a_w, \quad b = S \Delta x \quad (2.27)$$

Esta ecuación indica que la temperatura en P puede expresarse en función de la temperatura en los puntos vecinos W y E. Por último, una vez que se conocen estas expresiones para las derivadas, pueden resolverse mediante métodos directos o iterativos [40].

2.5.3 Geometrías y Mallas

El proceso de creación de la geometría comienza con el establecimiento del área en que se realizarán los cálculos, conocida como dominio computacional. Al proceso de subdivisión del dominio en puntos, elementos o volúmenes delimitados por el dominio computacional se le conoce como generación de la malla.

Cada problema relacionado a un flujo contiene una gran variedad de particularidades, esto provoca que coexistan en un solo sistema fenómenos como vórtices, capas límites, transiciones y regiones de cambios rápidos de presión y velocidad, por tanto, la cualidad más importante de una malla es definir suficientes puntos para capturar con detalle cada uno de los fenómenos antes mencionados y permitir que puedan ser modelados en las regiones críticas donde ocurren. Esto ha provocado la diversificación de los tipos de mallado, ya que dependiendo de la geometría bajo análisis pueden agruparse según sus características básicas en:

- Estructuradas
- Híbridas

Las mallas estructuradas están compuestas generalmente por elementos rectangulares o polares lo que provoca que su orientación sea uniforme. Las mallas híbridas son aquellas con celdas regulares e irregulares para un mismo objeto como se muestra en la Fig. 2.10.

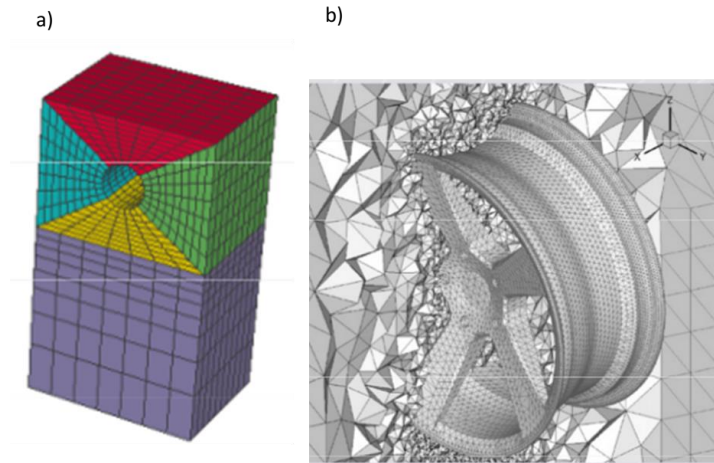


Fig. 2.10. Tipos de mallas. a) Malla estructurada, b) Malla híbrida.

2.5.4 Modelos Empleados

Es bien sabido que el número de Reynolds representa una medida de la importancia entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Si el flujo llega a tener un valor por encima del crítico (aproximadamente de 4000) se considera turbulento, presentando así perturbaciones que generan grandes variaciones en la presión y la velocidad en instantes de tiempo muy cortos. El estudio de este tipo de flujos se vuelve extremadamente complicado, además, de ser no estacionario.

Después de la creación de la geometría en CAD y su posterior mallado, es de vital importancia elegir correctamente algún modelo de turbulencia que sea adecuado para el tipo de fenómeno que se está estudiando.

La turbulencia es básicamente un fenómeno de disipación de energía en un fluido. Esta disipación se manifiesta en el flujo turbulento como desplazamientos “aleatorios” que generan torbellinos y movimientos “caóticos” de sus partículas. Estos desplazamientos se deben a la principal característica de un flujo turbulento que es la fluctuación en diferentes escalas de espacio y tiempo de sus parámetros básicos: la velocidad y la presión.

Las variables de un fenómeno de flujo turbulento pueden ser descritas mediante las ecuaciones de Continuidad, Momento y Energía, se han tomado diversos enfoques matemáticos a lo largo del último siglo para su resolución:

- Resolución Directa (DNS –Direct Numerical Simulation)
- Promediado estadístico (Modelos RANS--Reynolds Averaged Navier-Stokes)
- Simulación de grandes remolinos (LES–Large Eddy Simulation)

La herramienta utilizada en esta investigación es el promedio estadístico de las ecuaciones de Navier-Stokes, ya que, por las características de aleatoriedad del fenómeno de turbulencia, es ideal para un análisis de este tipo. El fundamento de esta teoría radica en los promedios en un punto y tiempo de las ecuaciones fundamentales para flujo incompresible. Este análisis es posible gracias a que se ha demostrado que tanto los promedios como las derivadas parciales pueden coexistir e intercambiarse para definir la teoría matemática de la turbulencia.

Los parámetros que serán los promedios puntuales corresponden a la velocidad (U) y la presión (P). De esta manera se asume que la velocidad y la presión en un punto determinado del espacio y tiempo pueden encontrarse en base a la superposición de componentes de velocidad y presión medias o promedio que varían de forma mínima y otros componentes fluctuantes que cambian rápidamente. Entonces:

$$U_i = \langle \tilde{U}_i \rangle + u_i \quad (2.28)$$

$$P_i = \langle \tilde{P}_i \rangle + p_i \quad (2.29)$$

En donde $\langle U_i \rangle$ y $\langle P_i \rangle$ son el resultado de promediar un número de experimentos independientes que “imaginariamente” tienen las mismas condiciones nominales. Por otra parte, u_i y p_i son la velocidad y la presión fluctuante.

El uso de uno u otro modelo depende del problema bajo análisis, por lo que, si para un sistema un modelo presenta buenos resultados podría ser completamente ineficaz para otro. La descripción de cada modelo de turbulencia y sus principios de resolución matemática están fuera del alcance de este estudio, sin embargo, los modelos utilizados en la modelación se describen de forma breve a continuación.

Modelo de turbulencia K-w SST

Para la inicialización del problema, se usó el modelo k-w SST propuesto por Menter [41]. El modelo de Turbulencia k-w SST es un modelo de dos ecuaciones que ha venido siendo utilizado en la actualidad para simular el molde de colada continua, el cual toma en cuenta la anisotropía de la turbulencia y por lo tanto los tensores de Reynolds [28,42-43]. El transporte del esfuerzo cortante (Shear Stress Transport “SST”) combina lo mejor de los modelos de turbulencia k-w y k-ε. Cuando se emplea el modelo k-w se trata de modelar mejor la zona de la capa límite, sin embargo, esto conlleva al uso de una malla con una gran densidad de elementos en esta zona, por otro lado, el modelo k-w SST puede ser usado con bastante precisión en esta zona sin llegar a usar dicho mallado para la capa límite. Cuando se encuentra fuera de la capa límite, el modelo k-w SST se comporta parecido al modelo k-ε, evitando así el problema que trae consigo el usar el k-w (el cual es demasiado sensitivo a las condiciones de frontera iniciales).

Las ecuaciones de transporte para k y ω se escriben a continuación:

Energía Cinética Turbulenta

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.30)$$

Tasa de Disipación Turbulenta

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha_\omega S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.31)$$

La viscosidad turbulenta se calcula:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} \quad (2.32)$$

Menter ^[41] sugirió el uso de funciones de combinación, F_1 y F_2 que se utilizan cuando se resuelve cerca de la pared (modelo $k-\omega$) y fuera de dicha pared (modelo $k-\epsilon$). Las constantes del modelo son las siguientes: $\beta^* = 0.09$, $\alpha_1 = 0.31$, $\alpha_\omega = 0.31$, $\beta = 0.075$, $\sigma_k = 0.5$ y $\sigma_{\omega 2} = 0.85$ ^[41]. S representa a su vez la tasa de deformación:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.33)$$

Donde

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.34)$$

El modelo de grandes remolinos (LES)

Como se dijo en el apartado anterior, después de la inicialización del flujo y obviamente enseguida de haber alcanzado un estado estable, se cambió el modelo de turbulencia. Se optó por usar el modelo LES, dicho modelo se ha comenzado a utilizar recientemente y más cuando se utiliza la técnica del PIV ^[26,30,44-46] a fin de poder validar los resultados experimentales, entre otras cosas. Una breve descripción del método LES se presentará.

Para poder separar los vórtices grandes de los pequeños es necesario utilizar un procedimiento de filtrado. La variable filtrada se denota con un apóstrofe y se define a continuación

$$f = \int_D f(x') G(x - x') dx' \quad (2.35)$$

Donde D representa al dominio completo y G es la función filtrada. La función de filtrado determina el tamaño de los vórtices de escala pequeña que serán eliminados de $f(x)$, estos requerirán modelado independiente. El filtro que se utiliza es el siguiente

$$G(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{if } |x| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{if } |x| > \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (2.36)$$

Si las ecuaciones Navier Stokes se aproximan mediante diferencias finitas, la integral en la ecuación [2.35] introduce una aproximación, que filtra todas las escalas más pequeñas que Δ , que corresponde al espaciado de la malla. La simulación con LES toma en cuenta los espectros de energía turbulenta (ver Fig. 2.11), los de baja frecuencia (grandes remolinos) están representados por las ecuaciones filtradas de Navier Stokes son calculados y los de alta frecuencia (pequeños remolinos) son modelados como se indicó anteriormente. Este procedimiento divide el problema en dos partes: la primera consiste en resolver el filtrado de las ecuaciones de Navier Stokes sin la engorrosa tarea de evaluar los esfuerzos de Reynolds, y la segunda consiste en utilizar modelos simples para evaluar la viscosidad turbulenta y los pequeños remolinos.

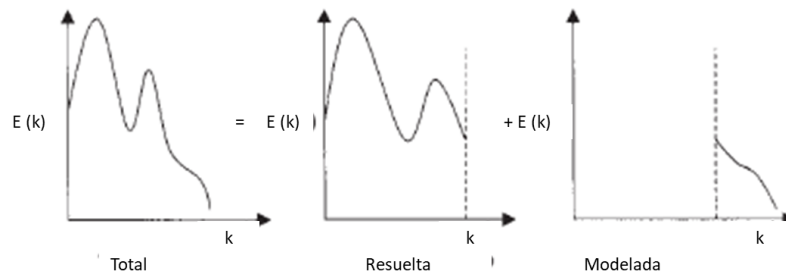


Fig. 2.11. Descomposición del espectro de energía en el modelo LES.

La velocidad instantánea es la suma de la velocidad filtrada y de la velocidad residual

$$u = \bar{u} + \acute{u} \quad (2.37)$$

Ecuación de momento y continuidad para el modelo LES

Ecuación de Continuidad

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = 0 \quad (2.38)$$

Ecuación de Transferencia de momento

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.39)$$

Las ecuaciones 2.38 y 2.39 describen el comportamiento de los vórtices grandes. Por otro lado, el efecto de los vórtices de escalas pequeñas se toma en cuenta con el tensor de submalla

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.40)$$

El modelo estándar de submalla fue propuesto por Smagorinsky ^[47]. Si el filtro se aplica a las ecuaciones de Navier Stokes (como se dijo anteriormente) el sub-modelo del tensor de esfuerzos asume la forma de

$$\tau_{ij} = -2\nu_T \bar{S}_{ij} + \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} \quad (2.41)$$

Donde $\tau_{kk} = \overline{u'_k u'_k}$ y S_{ij} esta dado por

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial u_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial u_i} \right) \quad (2.42)$$

En este modelo, la viscosidad turbulenta es proporcional a la deformación local de escala grande:

$$T = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (2.43)$$

Donde C_s es la constante que Smagorinsky propuso, y el tensor \bar{S} esta dado por

$$\bar{S} = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (2.44)$$

La constante de Smagorinsky es evaluada considerando la ley de 5/3 de la energía de espectro

$$E(k) = \alpha \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (2.45)$$

El valor de \bar{S} puede ser evaluado por integración

$$|\bar{S}| \approx 2 \int_0^{\pi/\Delta} k^2 E(k) dk \quad (2.46)$$

O

$$|\bar{S}| = \frac{3}{2} \alpha \varepsilon^{2/3} \left(\frac{\pi}{\Delta} \right)^{4/3} \quad (2.47)$$

Con $\alpha=1.41$ da:

$$C_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{3\alpha} \right)^{3/4} = 0.18 \quad (2.48)$$

2.5.5 Modelo Multifásico (VOF)

La técnica VOF ^[48] puede modelar dos o más fluidos inmiscibles al resolver un sólo juego de ecuaciones de conservación de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos a través del sistema. La formulación básica de esta técnica reside en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se ínter penetran. Para cada fase adicional que contenga el modelo, una variable que representa la fracción de volumen en cada celda computacional se introduce. En cada volumen de control la suma de las fracciones de todas las fases debe ser igual a 1.

Los campos para todas las variables y propiedades se comparten por las fases y representan valores promediados en volumen. De esta forma, las variables y

propiedades en cualquier celda son puramente representativas de una de las fases, o representa la mezcla de éstas, dependiendo de los valores de fracción de volumen presentes de cada fase para esa celda.

En notación matemática se puede decir que si la q-ésima fracción de volumen en la celda se denota por α_q , entonces las siguientes tres condiciones son posibles:

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

Las propiedades y variables indicadas se asignarán a cada volumen de control del sistema basándose en el valor local de α_q .

Ecuación de Fracción de Volumen

El rastreo de la(s) interfase(s) entre las fases mismas se acompaña 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 esta ecuación es:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + v * \nabla \alpha_q = \frac{S \alpha_q}{\rho_q} \quad (2.49)$$

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

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.50)$$

Propiedades

Las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte se determinan por la presencia de las fases componentes de cada volumen de control. En un sistema bifásico, por ejemplo, si 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:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (2.51)$$

En general en un sistema para una fase n, la densidad para la fracción de volumen promedio toma la siguiente forma:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (2.52)$$

Todas las otras propiedades como la viscosidad, se calculan de esta forma.

Ecuación de conservación de momento

Una sola ecuación de movimiento se resuelve a través del dominio, y el campo de velocidades resultante es compartido entre las fases. La ecuación de conservación de momento, que se muestra enseguida es dependiente de las fracciones de volumen de todas las fases a través de las propiedades ρ y μ (densidad y viscosidad) correspondientes a cada fase.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla * (\rho v v) = -\nabla p + \nabla * [\mu(\nabla v + \nabla v^T)] + p g + F \quad (2.53)$$

Una limitación de estos campos de velocidad compartidos es que en casos donde existen diferencias muy grandes entre las fases, la precisión de las velocidades calculadas cerca de la interfaz puede ser afectada negativamente.

Capítulo III

Metodología Experimental

Para cumplir con el objetivo principal de la presente investigación, el trabajo se dividió en varias etapas:

- Experimentación Física
 - Obtención de la fluido dinámica utilizando una buza convencional
- Simulación Matemática
 - Diseño de una buza disipadora de energía cinética
- Experimentación Física con la buza disipadora
 - Obtención de la fluido dinámica de la buza disipadora de energía cinética

3.1 Experimentación Física

3.1.1 Descripción del molde

La finalidad principal de construir un modelo físico es la visualización directa del comportamiento del fluido al interior del modelo. Por esta razón, se utilizó un modelo de un molde de colada continua con paredes transparentes a base de acrílico de 9 mm de espesor, se usó una escala de 1:1 entre el modelo y el prototipo, así se garantiza que se cumplan los números adimensionales de Froude y Reynolds. Como fluido de trabajo se empleó el agua a temperatura normal (20 °C) que emula el comportamiento del acero líquido a 1600 °C.

El modelo tiene algunas particularidades que se describen brevemente. Ya que se utilizaron láminas de acrílico para las paredes anchas y angostas fue necesario reforzar la zona inferior del modelo con un contenedor metálico de aluminio. Dicho contenedor mide 1 m de alto, 1.5 m de ancho y 0.6 m de espesor y es capaz de resistir la gran presión hidrostática que genera la columna del fluido de trabajo. Este contenedor tiene finalidades múltiples, una de ellas es ser un recipiente almacenador de agua, ayudando así a mantener un nivel estable de la superficie libre en el molde. Otra de sus funciones fue la de evitar que la succión de la bomba afecte la estabilidad de la superficie libre. Para lograr lo anterior, se le adicionaron varias cámaras a lo largo del espesor del contenedor que funcionaban como represas.

Por otro lado, en la zona superior del molde fue necesario añadir ciertos refuerzos metálicos (soleras de acero) para evitar que el acrílico se fracturara bajo la presión hidrostática del agua. Todo lo mencionado anteriormente se muestra en las figuras 3.1a y 3.1b.

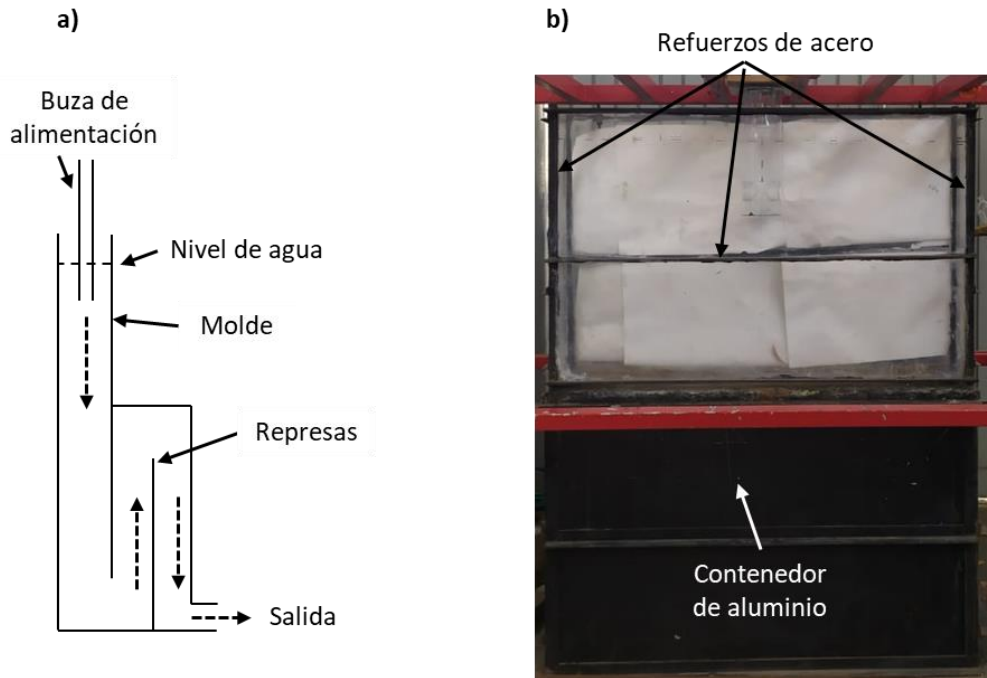


Fig. 3.1 Diseño del molde. a) Configuración interna del molde, b) Molde con los refuerzos añadidos.

Una vez que se tuvo el molde fijado al suelo, fue necesario adaptar un sistema de bombeo para recircular el agua. En la parte posterior del depósito se instaló un sistema de tubería con cédula hidráulica RD 26, consistente en: tubos, codos, coples, reductores, válvulas y flujómetros. En la Fig. 3.2 se muestra una fotografía del sistema de bombeo que transportaba al agua.

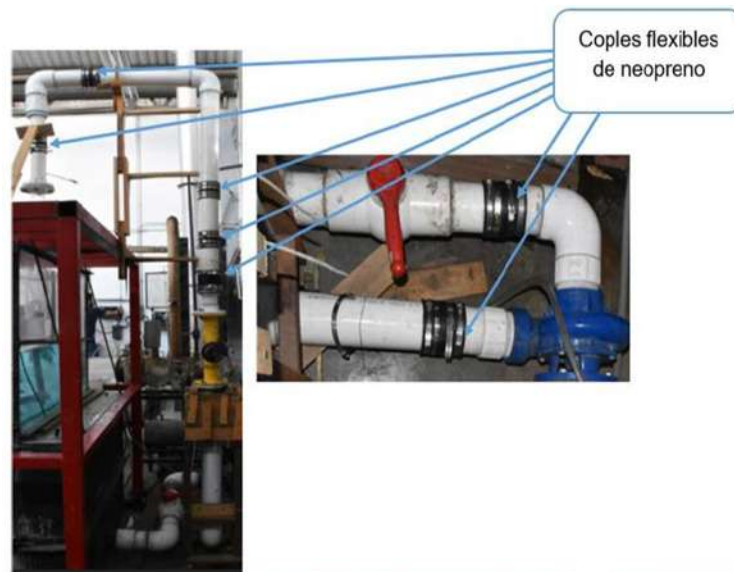


Fig. 3.2. Sistema de Tuberías del Molde.

Por último, cabe destacar que para conectar la buza al molde, fue necesario anclar la buza a una estructura de PTR (previamente hecha en el laboratorio). Se ancló la buza mediante una estructura de madera que tenía un mecanismo de tornillos deslizantes para controlar la profundidad de inmersión de esta, además, de nivelarla correctamente y así evitar en la medida de lo posibles errores indeseados que pudiesen afectar las mediciones experimentales.

3.1.2 Dimensiones principales del molde y buza

Hasta ahora se describió brevemente lo referente a la puesta en marcha del sistema experimental, pero no se han establecido las dimensiones, por lo cual, los siguientes renglones abordan esto. Las medidas principales del molde y la buza se muestran en la Fig. 3.3. El molde mide 2 m de alto, 1.5 m de ancho y 0.25 m de espesor. Se utilizó una altura de trabajo de 1.9 m. En lo referente a la buza, esta mide 0.86 m de largo y tiene dos puertos de descarga de 0.07 m de diámetro que están inclinados 15° .

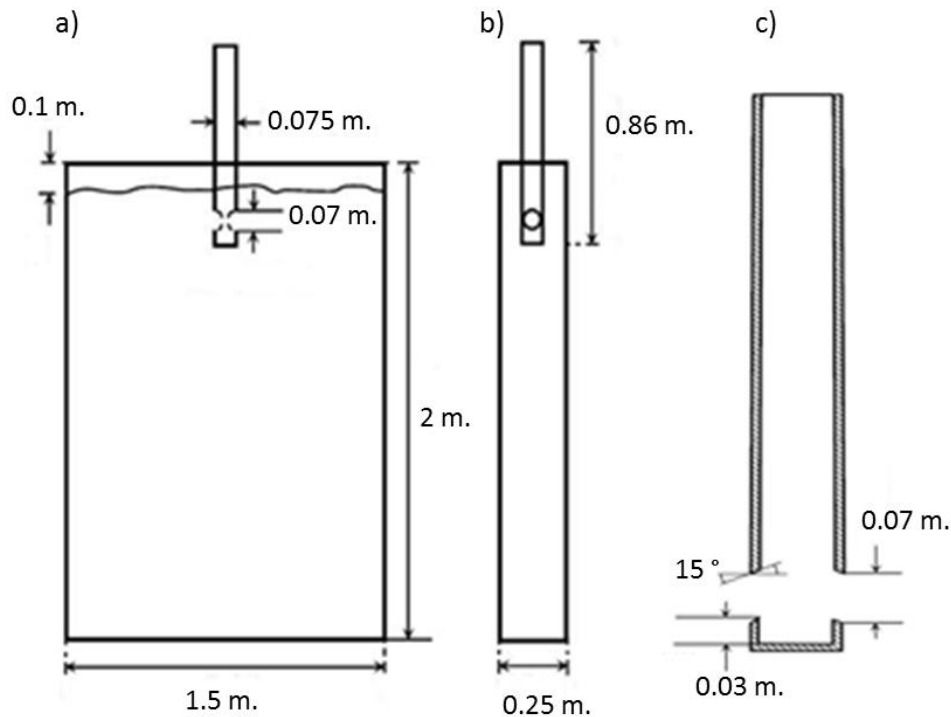


Fig. 3.3. Planos del Molde y Buza. a) Vista frontal del molde, b) Vista lateral del molde, c) Vista frontal de la buza.

3.1.3 Procedimiento de Experimentación Física

En este punto se debe mencionar que tanto las dimensiones del molde como la buza están basadas en un molde para planchón convencional que se usa en la industria siderúrgica del país. Debido a que el principal objetivo del trabajo era el diseño de una buza disipadora de energía cinética se decidió fijar las condiciones de operación del sistema. Esto es, se fijó una única velocidad de colada de 1 m/min y se utilizó una profundidad de inmersión de 0.150 m.

El flujo que impulsa la bomba por la tubería en el molde se obtuvo considerando la ecuación de continuidad, es decir;

$$Q_1 = Q_2 = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (3.1)$$

Donde Q es el caudal volumétrico (m^3/s), v es la velocidad del fluido en m/s y A en m^2 es el área de sección transversal.

Se tienen de datos iniciales que el molde opera a una velocidad de colada de 1 m/min que transformado sus unidades a m/s da 0.01666, además, tiene un diámetro a la entrada de la buza de 0.07 m mientras que en la salida el flujo sale por una sección rectangular de $1.5 m * 0.25 = 0.375 m^2$. Con estos datos se puede emplear la ecuación 3.1 de donde solo queda como variable v_1 :

$$Q_2 = V_2 A_2 = 0.01666 \frac{m}{s} * (1.5 m * 0.25 m) = 6.245 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} \quad (3.2)$$

Entonces:

$$v_1 = \frac{Q_2}{A_1} = \frac{6.25 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi * 0.07^2}{4}} = 1.624 m/s \quad (3.3)$$

Se tiene que para conservar un nivel de agua constante se debe de inyectar agua a la entrada de la buza a razón de 1.6233 m/s, esto expresado como un caudal da un flujo volumétrico de $6.25 * 10^{-3} m^3/s$ y transformando unidades a litros por minuto (l/m) queda de 375 l/min o 6.25 l/s, el cual es un flujo alto y por esta razón se utilizó cédula hidráulica para construir el sistema.

Una vez que se sabía el caudal que debía suministrar la bomba, se procedió a realizar el procedimiento siguiente:

Se verificó por última vez la correcta alineación de la buza, después, se llena de agua el molde a la altura de trabajo (1.9 m), una vez lleno, se enciende la bomba. Dicha bomba tiene un motor de 10 Hp de inducción trifásico y está conectada a un variador de frecuencia (Teco Westinghouse) que permitía variar los rpm del motor, variando así el caudal que se necesitaba. Se inició con un caudal bajo hasta alcanzar gradualmente el caudal requerido de 6.25 l/s. Una vez alcanzado el caudal de

operación se dejó que el sistema llegase al estado estable, este se supuso se alcanzó después de dejar pasar 10 minutos desde el encendido de la bomba. Pasado este tiempo se procedió a realizar los experimentos.

3.1.3.1 Visualización de la dinámica de flujo mediante un trazador

Como primera opción se decidió utilizar un colorante para visualizar la fluidodinámica. Se inyectó una cantidad fija de colorante rojo en uno de los coples por encima de la buza. Inmediatamente después se procedió a grabar en video convencional la difusión del colorante en el interior del molde para posteriormente analizar los resultados obtenidos mediante software de edición de videos y fotografías para ayudar a caracterizar la fluidodinámica. La Fig. 3.4 muestra el área donde se grabó la difusión del colorante.

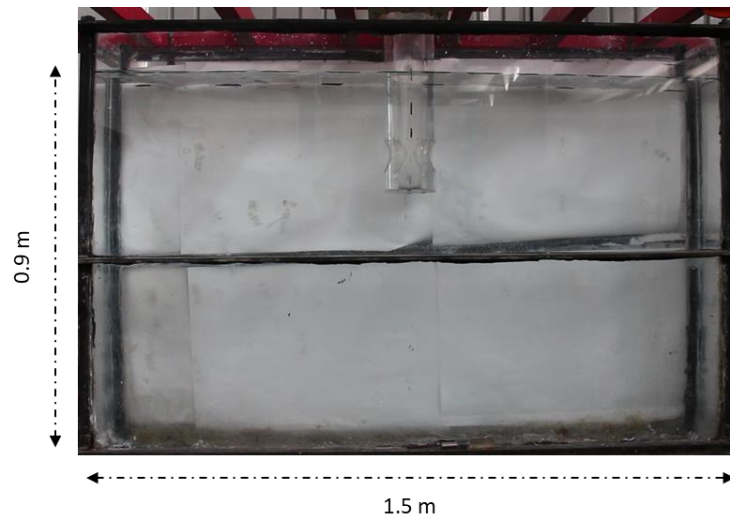


Fig. 3.4. Área de grabación para la difusión del trazador en el molde.

3.1.3.2 Medición de las oscilaciones en la superficie libre

Después de que se terminó la grabación de los videos de difusión del colorante se aprovechó esta agua coloreada para grabar a su vez los videos de la oscilación de la superficie libre. Se dividió el molde en zonas, cuatro del lado derecho. Se dibujaron líneas auxiliares a 10 y 5 mm por encima de la línea de referencia. Se grabaron videos convencionales de 3 minutos, de los cuales se convirtieron a fotografías y se eligieron de todas las fotos, las que presentaron los valores máximos de oscilación del nivel. Dichas fotografías se procesaron mediante software de edición para obtener valores puntuales de las oscilaciones de nivel en la superficie libre. La Fig. 3.5 muestra esquemáticamente las zonas en las que se subdividió el molde.

Lado Derecho

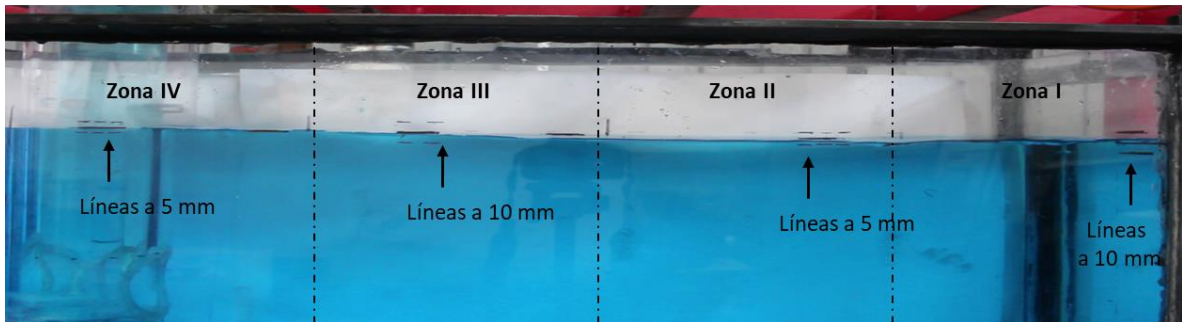


Fig. 3.5. Zonas a analizar la oscilación de nivel.

3.1.3.3 Obtención de la Dinámica de fluidos mediante PIV

El PIV utilizado es un sistema de velocimetría por análisis de partículas de dos componentes de velocidad con alta resolución temporal (modelo tr-piv-2d) con una fuente laser dual de 10 MJ y 1000 Hz, una cámara con captura de 3,200 FPS y 6 Gb (modelo tr-piv-2lm). Para poder obtener los campos de velocidad en el interior del molde mediante el PIV fue necesario conectar un sistema de bombeo. Dicha instalación se muestra en la Fig. 3.6. El circuito hidráulico funciona de la siguiente manera: a la salida del molde se encuentra la tubería de succión, la cual se realizó a partir de tubo PVC hidráulico cedula RD-26 de 4 in. Dicha tubería se conecta a la bomba de 10 hp (Teco Westinghouse y un arrancador trifásico N3 Siemens, la bomba permite regular la frecuencia de giro y, por lo tanto, el caudal) y sale por la tubería de descarga (4 in) hacia un flujómetro de la marca Jm Geysler con una capacidad de 0 a 25 l/s y una precisión de 2 l/s. Del flujómetro, el agua se dirige hacia la buza que se encuentra en el interior del molde, ésta descarga el flujo de agua y comienza a recircular en el molde. El molde se ubicó al interior de una estructura metálica de perfil ptr que sirve como soporte para la tubería y el arrancador de la bomba. El láser del PIV se colocó a un costado de la cara angosta del molde y la cámara de alta velocidad enfrente de la cara ancha (ver Figs. 3.6). El área de grabación tuvo un total de 1.5 m². Se grabó la dinámica de fluidos sobre un plano longitudinal que atraviesa el ancho del molde y pasa por el centro de la buza. Una vez funcionando el sistema de bombeo, se esperó alrededor de 10 minutos para obtener un estado estable en la dinámica de fluidos y posteriormente, se tomaron 2000 imágenes para un total de 4 segundos en tiempo real.

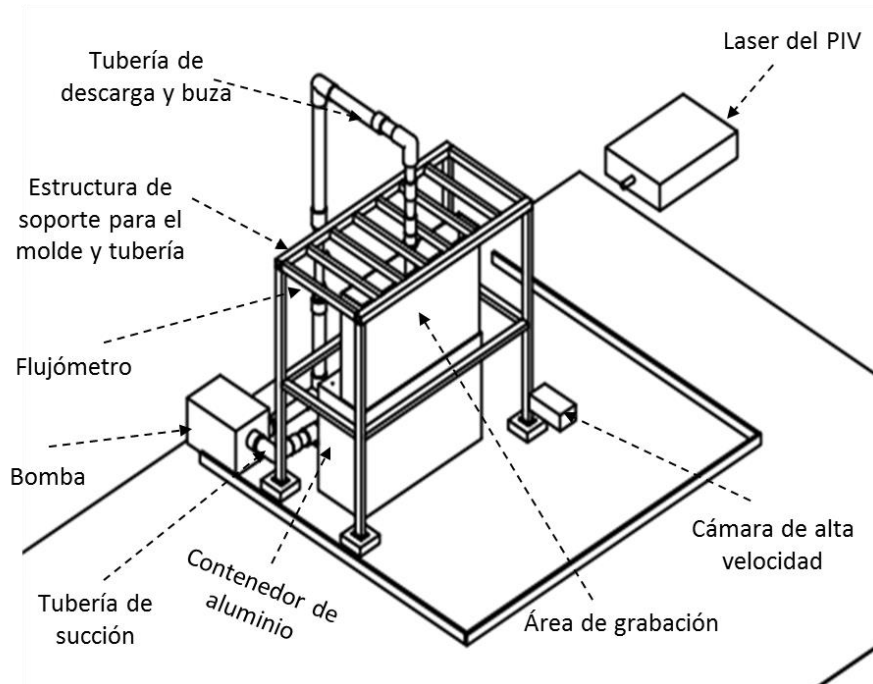


Fig. 3.6 Esquema del circuito hidráulico y sistema PIV en vista isométrica.

Después de finalizar la grabación, la información se procesó mediante el software de nombre Dynamics Studio y PIV-LAB de donde se obtuvo el campo de vectores de velocidad en el interior, además de algunas otras gráficas en diferentes puntos o zonas del molde.

3.2 Simulación Matemática

Para la realización de las simulaciones se decidió utilizar los modelos de turbulencia k-w SST y el modelo LES. Además, para ahorrar tiempo de cómputo se simuló primero las propuestas de la buza. En estas simulaciones solo se simuló la buza, la cual estaba desacoplada del molde. Una vez que se obtuvo la buza disipadora de energía cinética, se realizó la simulación completa (acoplada con el molde) para ver el efecto de ésta en el interior del molde. Todas las simulaciones se realizaron en computadoras de escritorio de 12 y 24 núcleos con 16 Gb de memoria RAM. Algunas de las simulaciones y más en las que se utilizó el modelo LES tomaron hasta 3 y 4 meses de tiempo de cómputo.

De manera general, cuando se realizan simulaciones de dinámica de fluidos computacional se suelen utilizar tres etapas, estas son: Pre-procesamiento,

Procesamiento y Post-procesamiento. En la Fig. 3.7 se muestra de manera esquemática dicho procedimiento.

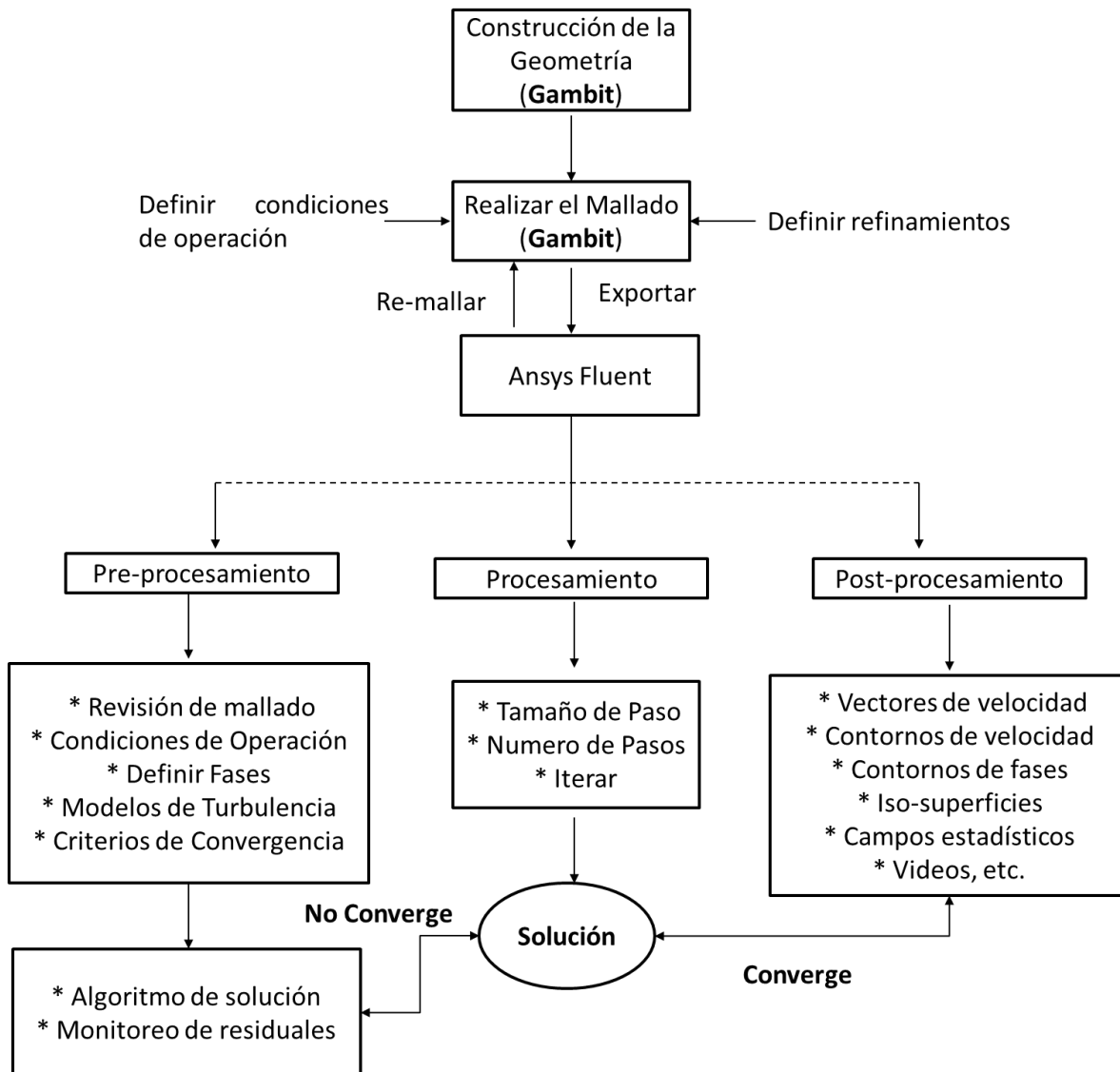


Fig. 3.7. Diagrama de flujo del procedimiento de simulación matemática.

Pre-procesamiento

Como primer paso fue necesario modelar la geometría del molde y la buza en 3D. Se modeló en el software Gambit. Dicha geometría representa únicamente la región fluida del problema, la cual se encuentra confinada por las paredes anchas y angostas del molde, así como el recubrimiento de Zirconia de la buza. La Fig. 3.8 presenta dichas geometrías en 3D.

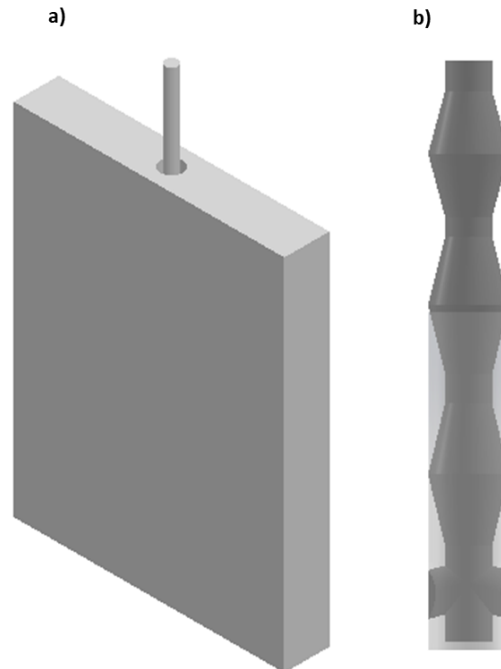


Fig. 3.8. Geometrías modeladas en 3d. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde.

Después de que se construyó la geometría, se procedió a realizar la discretización del dominio computacional o mallado. En la Fig. 3.9 se observan el tipo de mallas empleadas para la simulación. Se utilizó una malla mayormente estructurada (cerca de 88% de la totalidad de los elementos) y una malla del tipo no estructurada para la buza y una pequeña región alrededor de esta. Para las simulaciones donde se modelaba el sistema completo (molde y buza) se emplearon cerca 1 800 000 elementos, mientras que cuando solo se modelaban las propuestas de buzas se emplearon mallas con un tamaño de 500 000 elementos aproximadamente. Con estos tamaños de malla se garantizó la independencia de los resultados de las mallas empleadas. Cabe destacar que se subdividió el modelo para poder mallar de forma más precisa en la zona superior del molde, ya que en esta zona se esperan grandes variaciones de nivel en la superficie libre, de 5 a 10 mm, por lo cual, en dicha zona se realizó un gran refinamiento.

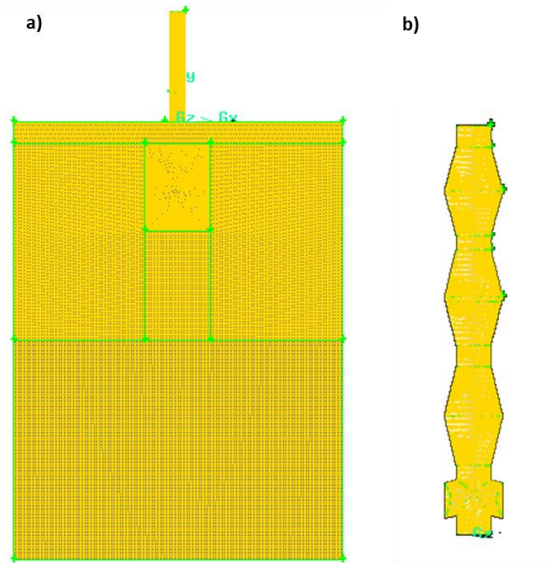


Fig. 3.9. Geometrías malladas. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde.

Las condiciones frontera se asignaron tomando en cuenta las condiciones de operación a nivel industrial. De esta forma se tiene que, al ser un sistema abierto, en la parte superior del molde se tiene la presión atmosférica, temperatura y densidad del aire. Mientras que, a las condiciones de salida, se aplicó la velocidad de colada. La velocidad de entrada se calculó en base al diámetro de entrada en la parte superior de la buza y la velocidad de colada para mantener la continuidad en el sistema (ecuación “3.3”). Por otro lado, en las paredes sólidas, se empleó una condición de no deslizamiento. Dichas condiciones se muestran en la Fig. 3.10.

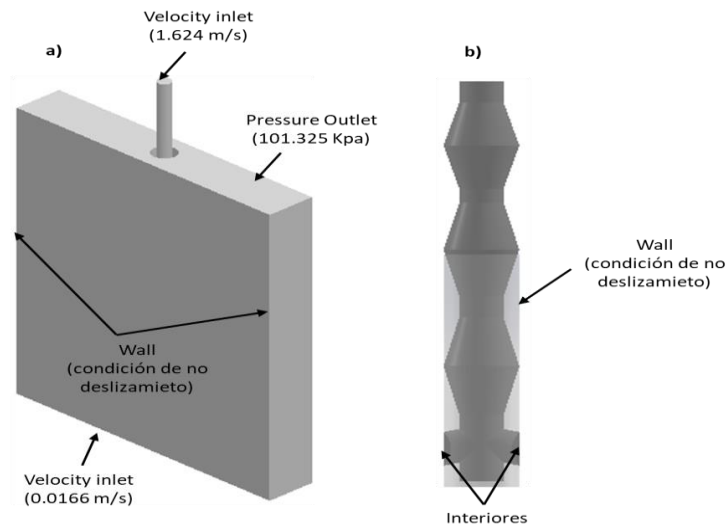


Fig. 3.10. Condiciones de frontera aplicadas al modelo. a) Molde y Buza, b) Buza desacoplada del molde.

Se realizaron todas las simulaciones en estado transitorio con una profundidad de inmersión de 0.150 m y una velocidad de colada de 1 m/min. Se empleó el modelo multifásico conocido como VOF para poder modelar las oscilaciones de la superficie libre. El tamaño del paso temporal fue variando hasta quedar fijo en un tiempo de 0.02 s. Se simularon un total de 8 minutos de tiempo real, en los primeros 4 se empleó el modelo de turbulencia k-w SST, después de este tiempo se consideró que se alcanza un estado “estable” y se optó por cambiar el modelo de turbulencia al modelo LES, el cual es utilizado frecuentemente cuando se realiza PIV en la investigación en el molde. En relación con el acoplamiento presión-velocidad, se decidió usar primero el PISO y cuando se utilizó el modelo de turbulencia LES se cambió dicho acoplamiento al Simple para agilizar la obtención de los resultados. Se usaron esquemas de primer y segundo orden para los gradientes. Finalmente, la convergencia de las simulaciones se alcanzó cuando los valores de los residuales llegaban hasta $1 \cdot 10^{-5}$.

Con relación al procesamiento y al post-procesamiento, este se realizó en el software Ansys Fluent, del cual una vez obtenidos los resultados se extrajo información en forma de campos vectoriales y gráficas de diversas variables resultas por el programa.

Por último, en la Tabla 3.1 se muestran los casos realizados en la presente investigación.

Tabla 3.1 Casos realizados

No.	Nombre	Descripción
1	Buza Convencional	Simulación física y matemática
2	Buza 3C CP (disipativa 1)	Simulación física y matemática
3	Buza 3C Cp cruceta (disipativa 2)	Simulación física y matemática

Capítulo IV

Resultados y Discusión de Resultados.

Después del arduo trabajo realizado, se analizan a continuación los resultados obtenidos de la presente investigación. Los resultados serán presentados de la siguiente forma.

Primero, se caracterizó la fluido dinámica en el interior del molde utilizando la Buza Convencional (de aquí en adelante se referirá como “Bc Cp”). Dicha caracterización consistió en identificar a grosso modo el patrón de flujo utilizando la técnica de colorimetría, después se utilizó la Velocimetría de Partícula por Imagen (PIV). Con el PIV, fue posible obtener el campo vectorial de velocidad en el interior del molde, además, gráficas de velocidad y otras variables de interés en zonas específicas del molde. Finalmente, para acabar de caracterizar la fluido dinámica con la Bc Cp, se midieron las oscilaciones en la superficie libre con la metodología antes descrita.

Segunda parte, se analizaron los resultados obtenidos de la simulación matemática, donde se modelaron el molde y la buza convencional como un sistema en conjunto. Se realizó la validación del modelo matemático y los algoritmos de solución empleados para poder utilizarlos más adelante, cuando se esté diseñando la buza disipadora de energía cinética. De este modelo fue posible obtener información de otros planos distintos al plano de medición utilizado en el PIV y así comprender de mejor forma la fluido dinámica en el molde bajo las actuales condiciones de operación.

Como tercera parte, se presentan los resultados para las diversas buzas disipativas modeladas. Se modelaron cerca de 25 buzas, en las cuales se variaron tanto el número de cámaras, así como el espaciamiento entre ellas. En las simulaciones realizadas, solo se utilizó la buza como volumen de control, esto se realizó de esta manera para ahorrar tiempo de cálculo. Se utilizaron mallas de alrededor de 500 000 elementos en la buza y con esta malla tan grande se dio por sentado la dependencia de resultados con la malla. Del total de buzas modeladas se eligieron 2 buzas que presentaron los mejores resultados en la reducción de velocidad de entrada-salida de la buza.

Como cuarta parte, se presentarán los resultados de la experimentación física (colorimetría, PIV y medición de oscilaciones) obtenidos después de fabricar los modelos de las buzas disipativas de energía cinética. Para lograr lo anterior, se utilizó exactamente la misma metodología empleada cuando se caracterizó la fluido dinámica en el molde con la Bc Cp. Finalmente, la quinta parte de la investigación consistió en realizar las simulaciones completas molde-buzas disipadoras para obtener información adicional en la caracterización del sistema de flujo al interior del molde y ayudar a correlacionar los presentes resultados con la aparición de posibles defectos de calidad que están estrechamente relacionados con la fluido dinámica en el molde de colada continua de planchón convencional.

4.1 Caracterización de la Fluido dinámica en el Molde utilizando la Buza Convencional

4.1.1 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal

La Fig. 4.1 muestra el desarrollo de la cinética de mezclado en el interior del molde, para una velocidad de colada de 1 m/min y una profundidad de inmersión de 0.150 m. En la Fig. 4.1a se observa que el trazador comienza a ingresar al molde, este tiempo para fines de análisis se considera como el inicial (0 s). Después de aproximadamente 0.375 s, el trazador vegetal comienza a salir de los puertos de la buza para difundirse en el interior del molde (Fig. 4.1b). Como se puede notar, el trazador vegetal avanza más por el puerto izquierdo, que por el derecho e incluso tiene un mayor ángulo de inclinación (21° del lado izquierdo contra aproximadamente 18.5° del derecho). Por su parte, la Fig. 4.1c, muestra la difusión del colorante a un tiempo de 1.54 segundos desde su inicio. En esta figura se observa que los chorros provenientes de la buza han llegado hasta las paredes angostas del molde, donde impactan a estas y se divide el chorro en dos partes principalmente, una ascendente y una descendente. En lo que respecta al chorro izquierdo se puede ver claramente que sigue presentando una mayor inclinación (ver número "1"), mientras que el derecho, apenas si rebasa la solera de refuerzo, ubicada a 0.4 m por debajo de la superficie libre (ver "2"). En la zona por encima de los chorros de descarga, se puede notar que del lado derecho existe una menor área que está sin colorearse y del lado izquierdo pasa al revés, notándose una falta de simetría en la distribución del colorante. Después que han transcurrido 4 segundos, se comienza a observar la tendencia general del flujo dentro del molde, es decir, se presenta un "clásico patrón de flujo de cuatro grandes recirculaciones". A este tiempo la mayoría del área del molde se observa coloreada, solo unas pequeñas zonas (ver "1" y "2") por encima de los chorros no tienen aún colorante, en estas, se puede deducir que son "zonas de baja velocidad" y están localizadas justo a los costados de las paredes de la buza. La zona "1" es ligeramente más grande que la zona "2". A un tiempo de 9 s aproximadamente, el colorante ya abarco prácticamente toda la zona por encima de los chorros, obviamente se siguió desarrollándose el patrón de flujo "clásico", sin embargo, en la zona inferior del molde aún faltan áreas por colorear y están marcadas con los números "1" y "2". La zona marcada con el número "1" se ubica justo por debajo de la buza, lo cual indica que es de baja velocidad y se puede deducir, que el metal líquido se mueve lentamente, esto puede ayudar a evitar el desgaste del material refractario de la buza y en la medida de lo posible, ayudar a alargar su vida útil. Por otro lado, en la zona inferior del molde (ubicada a 1 m por debajo de la superficie libre) el colorante vegetal aún no cubre bien dicha zona, por ende, también se trata de una zona de "baja velocidad", pero esto no tiene implicaciones en la calidad del planchón a producir, debido a que dicha zona

solidificaría hasta el final del proceso, pues representa el “corazón líquido” del planchón. La Fig. 4.1f muestra la difusión del colorante en el interior del molde a un tiempo de 13.5 s, a este tiempo se observó que el colorante ya había cubierto prácticamente toda el área de estudio del molde.

En resumen, a los párrafos anteriores, se pudo deducir que el patrón de flujo en el interior del molde, es el patrón clásico de cuatro grandes recirculaciones. Sin embargo, dicho patrón no es simétrico, el chorro del lado izquierdo sale del molde con una mayor inclinación que el derecho, generando a su vez la asimetría notada anteriormente. También, se observaron zonas de baja velocidad a los costados de la buza, dichas zonas han sido reportadas en la literatura y sí en estas zonas se encuentran grandes gradientes de velocidad y presión pueden provocar arrastre de escoria hacia el interior del molde, lo que traería problemas de inclusiones no metálicas solidificadas en el producto final, que al momento de una laminación o algún otro proceso pueden provocar un rechazo del material por propiedades mecánicas no adecuadas, según sea el uso que se le asigne al material recién fabricado.

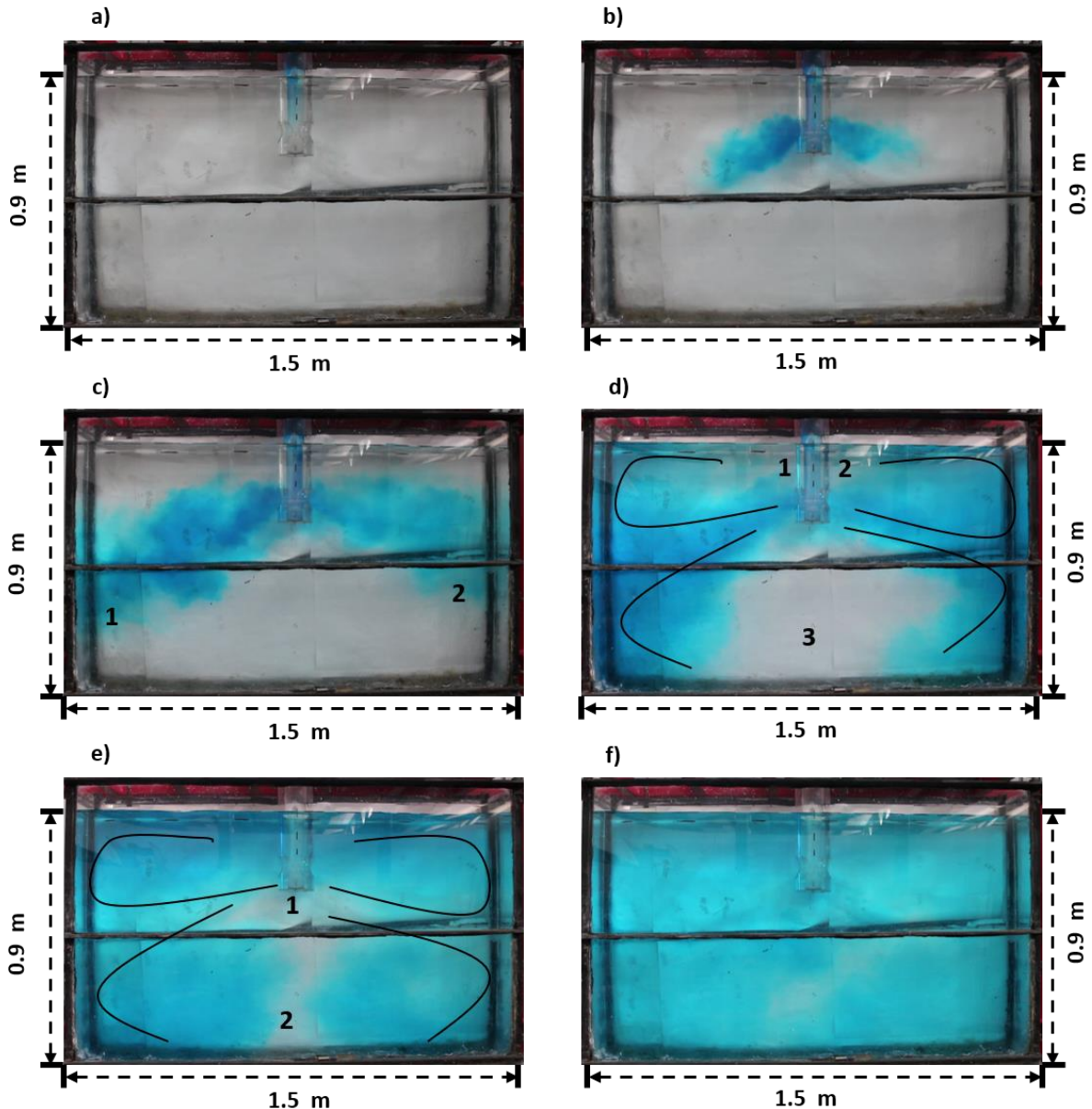


Fig. 4.1. Cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza Convencional Cp. a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s.

4.1.2 Campo de vectores de velocidad obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula

En la Fig. 4.2 se muestra el campo de vectores de velocidad obtenido mediante la técnica de Velocimetría de Partícula por Imagen (PIV). Las velocidades están coloreadas por magnitud. Se puede notar que el campo fluido dinámico en el interior del molde resultó ser el intuido anteriormente con el trazador vegetal, es decir, un campo “clásico de 4 grandes recirculaciones”. Sin embargo, como puede notarse, la

recirculación del lado derecho se encuentra dividida en tres. Se describirá brevemente el campo obtenido. El flujo sale por los puertos de la buza con una inclinación similar, alrededor de 15° , la velocidad máxima que alcanzan ronda el 1 m/s. Los chorros avanzan hacia las paredes angostas e impactan a estas, después, se parte en dos, una parte del flujo recircula por encima del chorro y la otra por debajo. Se puede notar claramente la falta de simetría en el campo de velocidad obtenido, por ejemplo, la recirculación superior izquierda (ver "1") es más pequeña que la correspondiente del lado contrario (ver "2"), mientras que, en la zona inferior, la recirculación del lado derecho (ver "4") es mucho más grande que la izquierda (ver "3"). Algunas particularidades se mencionarán a continuación: cuando el chorro impacta las paredes angostas, se observan velocidades de hasta 0.4 m/s cercanas a la zona de impacto, dichas velocidades son relativamente altas y podrían causar desgaste de la costra que recién comienza a solidificar de acero en el proceso real. También se puede notar, que en las zonas adyacentes a la buza y la superficie libre, los vectores comienzan a acelerarse al acercarse a los chorros, es decir, son succionados, esto puede llegar a ser perjudicial si se llegase a producir un arrastre de escoria hacia el interior del molde. Las zonas de baja velocidad están ubicadas a los extremos del molde (ver "5" y "6"), si dichas zonas se mantienen a lo largo de toda la colada pueden ser zonas donde pudiera existir un gradiente de temperatura adverso y una posible segregación del material. Por último, como puede verse en la zona marcada con el número 7, los vectores llevan velocidades elevadas y al acercarse a la parte baja de la carcasa tienden a cambiar abruptamente de dirección, orientándose hacia los chorros provocando que estos aumenten de espesor justo al salir de la buza.

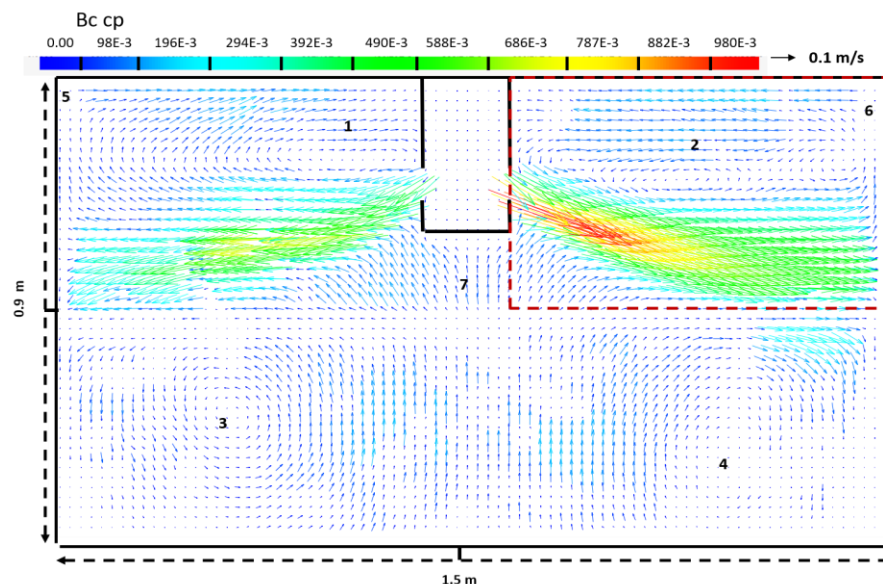


Fig. 4.2. Campo de vectores de velocidad obtenido mediante PIV para la Buza Convencional Cp.

Si bien las mediciones realizadas con el PIV en toda el área del molde fueron bastante buenas, se optó por realizar una toma con una porción del área de estudio de aproximadamente $\frac{1}{4}$ del área total (marcada en con líneas punteadas en rojo en la figura anterior), con la finalidad de obtener una mayor precisión en los campos vectoriales obtenidos y poder obtener gráficas más exactas en puntos de interés específicos, como, por ejemplo, sobre la superficie libre y las velocidades sobre la pared angosta derecha. El $\frac{1}{4}$ de área que se decidió grabar bajo estas condiciones fue el cuadrante del campo de flujo por encima del chorro derecho. La Fig. 4.3 muestra los resultados obtenidos. Como se puede ver, el chorro sale bastante inclinado y conforme avanza hacia la pared, esta inclinación cambia hasta hacerse completamente horizontal e incluso el chorro tiende a aumentar su espesor desde que sale del puerto de la buza. En esta figura se puede apreciar claramente que cuando el chorro impacta, la parte del fluido que avanza hacia arriba lleva velocidades altas (0.1 a 0.2 m/s) y comienzan a descender al llegar a la superficie libre. Puede verse también que ahora existe solo una recirculación de flujo por encima del chorro (ver "1") en vez de las tres observadas en la figura anterior, esto se da así, porque, como se observó en los experimentos realizados, el chorro está continuamente oscilando hacia arriba y abajo, por lo tanto, cambia el patrón de flujo cada cierto tiempo. Sin embargo, como puede comprobarse, dicho cambio no afecta grandemente las variaciones promedio de la velocidad en la zona por encima de los chorros.

En lo que respecta a las zonas de baja velocidad (ver "2"), estas se ubican en las esquinas del molde y se hablara de su magnitud más adelante.

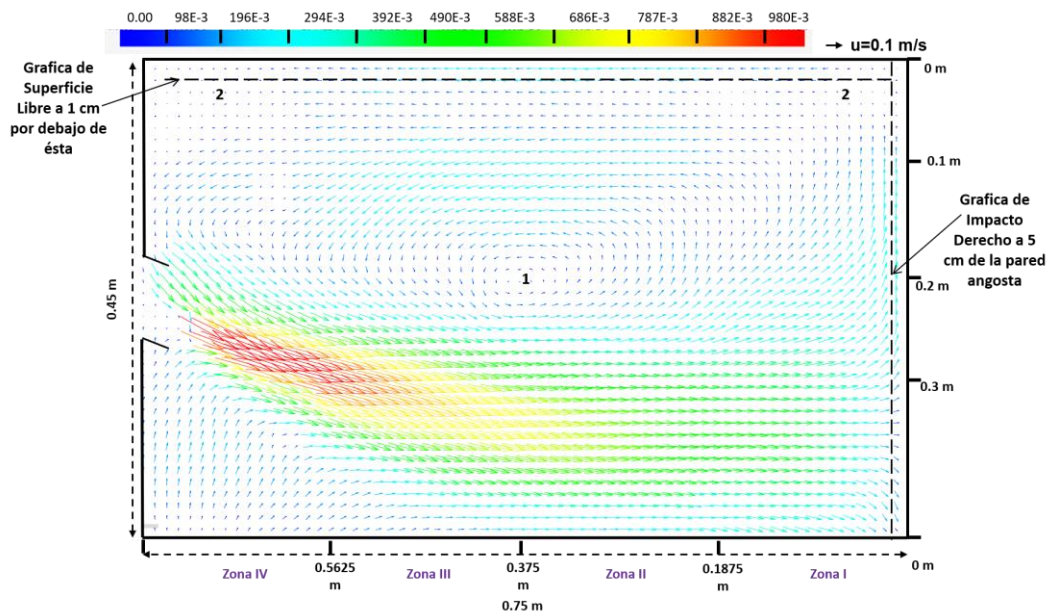


Fig. 4.3. Campo de vectores de velocidad obtenido mediante PIV en la zona por encima del chorro derecho para la Buza Convencional Cp.

La Fig. 4.4 muestra la gráfica de velocidad sobre la pared derecha obtenida del campo de velocidad anterior. Esta gráfica se obtuvo a una distancia de 5 cm de la pared angosta derecha. En relación al punto de impacto del chorro, se da aproximadamente a -300 mm de la superficie libre y alcanza magnitudes en velocidad que van desde los 0.10 a 0.15 m/s. También es de notarse, que parte del flujo que se dirige hacia la superficie libre alcanza velocidades de hasta 0.3 m/s en las zonas comprendidas entre los -100 y -200 mm por debajo de la superficie libre.

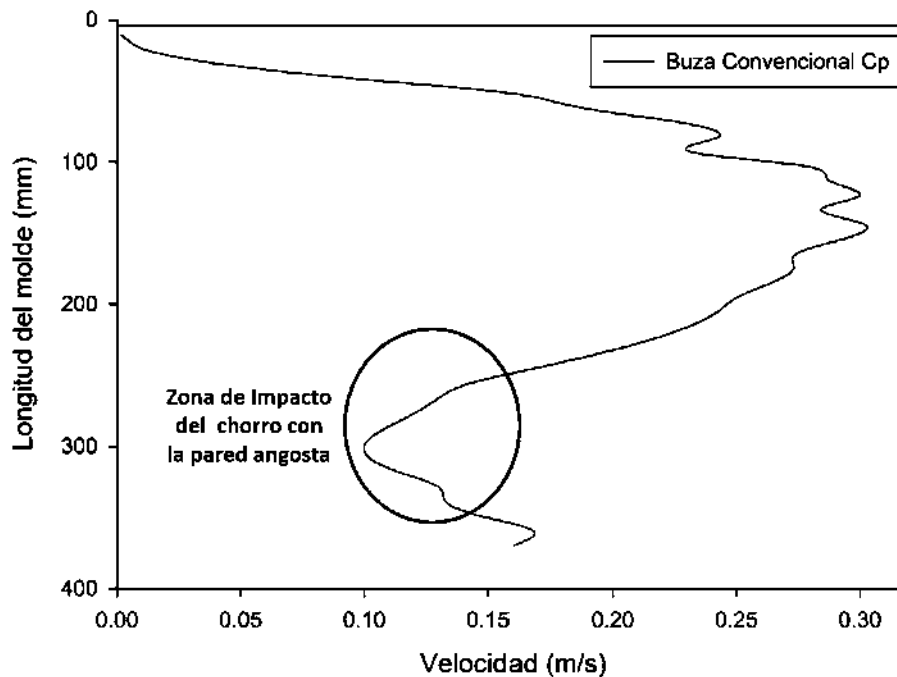


Fig. 4.4. Gráfica de velocidad obtenida del modelo físico a 5 cm de la pared derecha para la Buza Convencional CP.

Por su parte, la Fig. 4.5 presenta una gráfica sobre la superficie libre a 1 cm por debajo de esta. Se puede ver que la máxima velocidad se alcanza en la Zona II entre la pared angosta y las paredes de la buza. Dicha velocidad toma valores de 0.20 m/s. Por otro lado, en relación a las zonas de baja velocidad detectadas anteriormente (a un lado de la buza y en la esquina superior derecha) estas tienen magnitudes que están por debajo de 0.05 m/s, de dichas zonas, la que se ubica en los costados de la buza es la más grande.

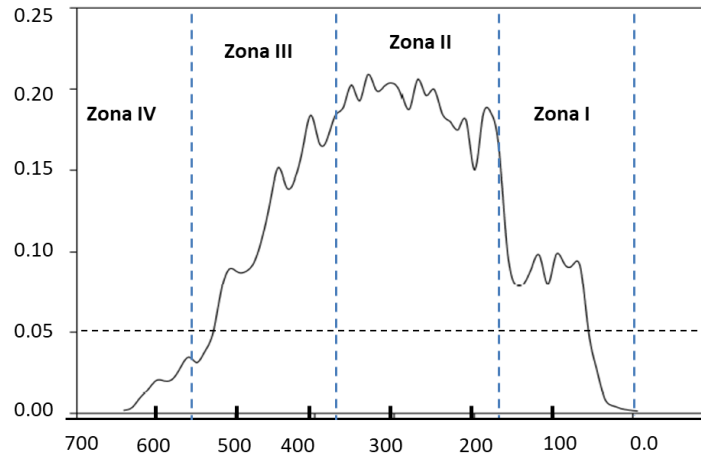


Fig. 4.5. Gráfica de velocidad obtenida del modelo físico a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza Convencional Cp.

4.1.3 Oscilaciones de nivel para la Buza Convencional Cp

Como se dijo en la sección de la metodología, las oscilaciones de nivel se obtuvieron de tomas de video realizadas sobre la cara ancha frontal del molde. Para simplificar el trabajo se optó, por solo realizar grabaciones de video enfocándose únicamente en la cara derecha. Aun sabiendo que el patrón no es simétrico y, por lo tanto, las oscilaciones de nivel en el lado derecho e izquierdo no son similares comparten entre sí los rangos máximos de oscilación del nivel [49], esto se ha determinado experimentalmente en anteriores investigaciones similares. La única forma de que los rangos varíen mucho es cuando se presenta un taponamiento del puerto de la buza debido a inclusiones no metálicas [24] y al uso de una válvula reguladora de flujo agua arriba de la buza, de estas dos situaciones, ninguna ocurre en el presente caso de investigación.

Por otro lado, se analizaron 3 minutos de video convencional (a 30 cuadros por segundo), resultando un total de $180 \times 30 = 5400$ imágenes. Estas imágenes, se analizaron una a una hasta encontrar los valores máximos de oscilación. Se consideró, que es un valor máximo cuando se cruza una línea de referencia ubicada a 10 mm por encima o debajo del nivel estático del líquido. Se ubicaron 4 zonas en el molde equidistantes entre sí. En cada una de dichas zonas, se trazaron líneas auxiliares para medir las oscilaciones de nivel, en la Zona I y la Zona III se ubicaron líneas a ± 10 mm del nivel, mientras que en las Zonas II y IV dichas líneas auxiliares tuvieron valores máximos de ± 5 mm. Esto se justificó, porque en las zonas cercanas a la pared angosta y en la zona central del molde, se han reportado que es donde más varía el nivel [21-22] mientras en las zonas cercanas a la buza, el nivel no tiende a fluctuar tanto.

Se presenta la Fig. 4.6 que muestra el comportamiento de la superficie libre en el molde para la Buza Convencional Cp. En la Fig. 4.6a se puede ver que el nivel está por encima de la línea de referencia en las inmediaciones de la pared angosta derecha (Zona I) y alcanza un valor aproximadamente de +7 mm, después tiende a bajar y se ubica sobre la línea de referencia. En la Zona II, el nivel tiende a fluctuar de manera regular a -5 mm por debajo de la línea de nivel. Para la Zona III, el nivel tiende a mantenerse constante (-5 mm) pero gradualmente sube hasta los 0 mm y da un gran descenso hasta los -10 mm para posteriormente volver a la línea de referencia (0 mm). En el caso de la Fig. 4.6b, el nivel cercas de la pared derecha tiene valores próximos a los +9 mm y comienza a bajar gradualmente hasta llegar a los 0 mm en la parte cercana a la Zona II, en esta última, el nivel se mantiene relativamente estable, para comenzar a descender y alcanzar un valor máximo de -10 mm en la Zona III y subir gradualmente hasta mantenerse relativamente constante a -5 mm en la Zona IV. Para la Fig. 4.6c, se puede observar que en la Zona I y II, el nivel esta aproximadamente sobre la línea de referencia, mientras que en la Zona III desciende abruptamente hasta los -10 mm para después mantenerse relativamente por debajo de los -5 mm. Por otro lado, en la Fig. 4.6d muestra que las oscilaciones de nivel alcanzan valores de aproximadamente +6 mm en la Zona I cercana a la pared y se mantiene en esos valores a lo largo de toda la zona, sin embargo, en la Zona II, las oscilaciones tienen valores de 0 mm y bajan gradualmente hasta llegar a los -10 mm en la Zona III para después volver a subir hasta -1 mm aproximadamente en la Zona IV. En el caso de la Fig. 4.6e, muestra un comportamiento muy similar a la anterior, salvo que en la Zona III, el nivel rebasa los -10 mm para posteriormente subir y alcanzar la línea de referencia estándar (0 mm). Como puede notarse, en la Fig. 4.6f se presenta la máxima variación de nivel observada durante la experimentación, el nivel alcanza valores de -15 mm aproximadamente en la Zona III mientras que, en el resto de las zonas, las oscilaciones se observan cercanas a la línea de referencia. En el Caso de las Figs. 4.6f-g el nivel sigue fluctuando, alcanzando valores máximos de -6 mm y +9 mm respectivamente.

Otro fenómeno que se observó durante la experimentación, fue la aparición de vórtices. Dichos vórtices dependiendo de su tamaño, velocidad y ubicación en el molde, pueden arrastrar escoria hacia el interior del molde, dicha escoria puede llegar a solidificar con el metal líquido y generar defectos de calidad [50-51] ampliamente reportados en la literatura.

Para el presente caso, se observaron un total de 13 vórtices en un tiempo de análisis de 3 min. En la Fig. 4.7 se muestran algunas fotografías de dichos vórtices. En la Fig. 4.7a se observa un vórtice en las inmediaciones de la buza. Por su parte, en la Fig. 4.7b se observan dos vórtices, uno en la Zona IV y el otro en la Zona III (casi a la mitad

de dicha zona). También, en la Fig. 4.7c se observan dos vórtices, uno al final de la Zona IV y el otro, muy próximo al límite de la Zona III, resultando ser este el vórtice más alejado de las paredes de la buza. Por su parte, en la Fig. 4.7d se observa un vórtice en la Zona IV, ubicado muy próximo a las paredes de la carcasa de la buza, en esta zona es muy reportado la aparición de dichos vórtices y en este caso en particular, dicho vórtice fue el más profundo que se encontró en la experimentación realizada.

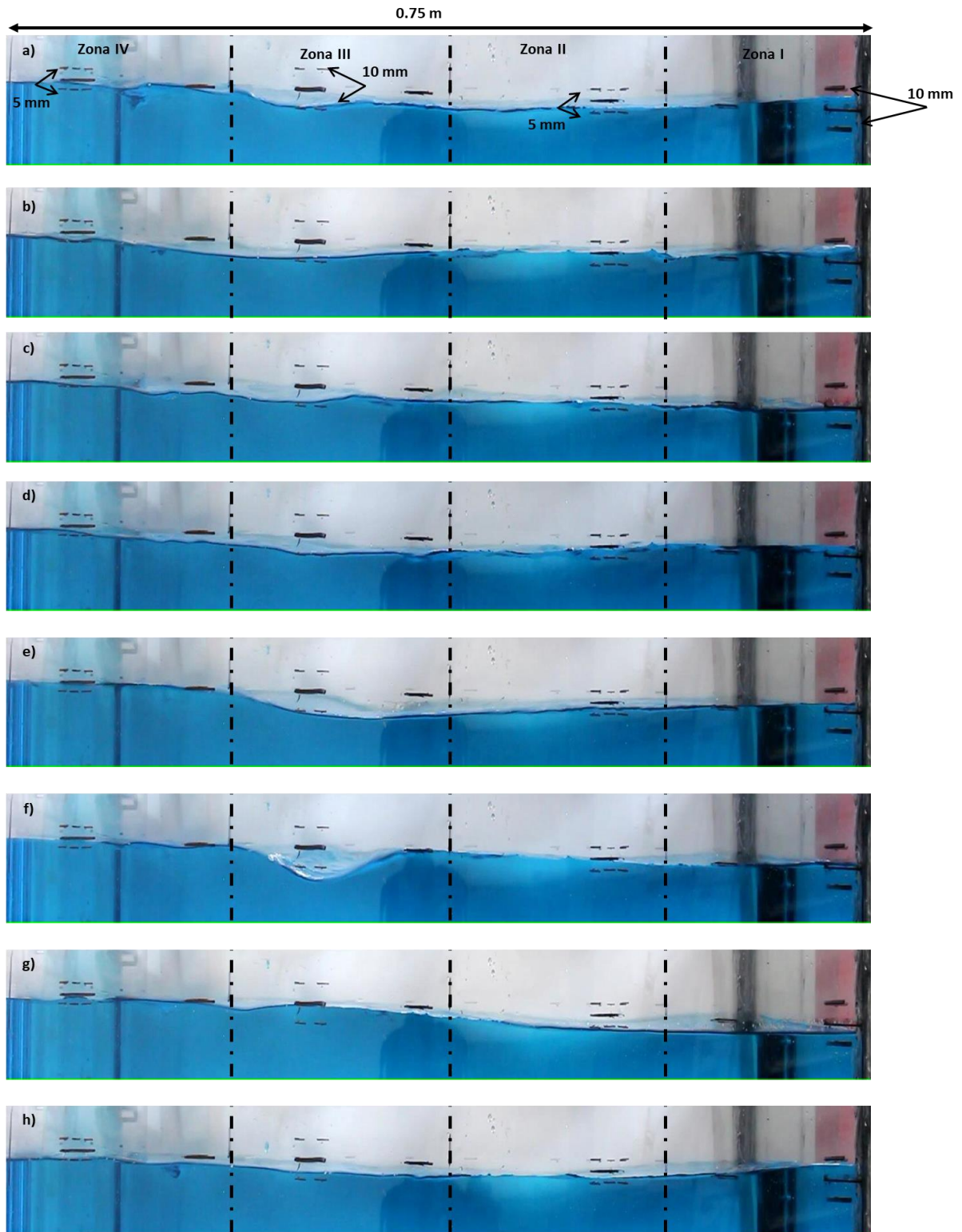


Fig. 4.6. Oscilaciones de nivel del modelo físico sobre la superficie libre para la Buza Convencional Cp.

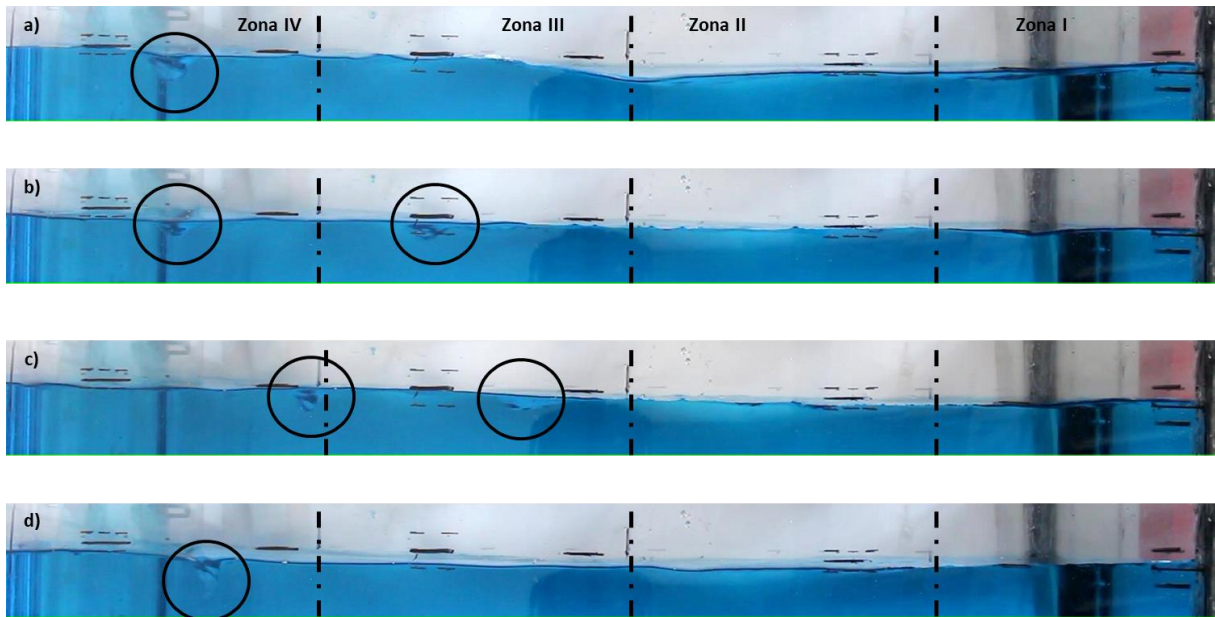


Fig. 4.7. Aparición de Vórtices obtenidas del modelo físico sobre la superficie libre para la Buza Convencional Cp.

4.1.4 Validación del modelo matemático

La Fig. 4.8 muestra la comparativa del campo fluido dinámico obtenido mediante la experimentación física (PIV), el campo vectorial obtenido mediante simulación matemática (CFD) y el campo fluido dinámico obtenido con ayuda del trazador vegetal. En las tres figuras se observa a grandes rasgos una gran similitud, es decir se observó un patrón de flujo de doble rollo con cuatro grandes recirculaciones. Por ejemplo, se ve que el chorro izquierdo sale ligeramente más inclinado que el derecho (ver números "1 y 3"). Por otro lado, en lo que respecta a las recirculaciones de flujo por encima de los chorros, puede notarse que, en ambas, tanto la izquierda como la derecha (ver "2 y 4") están en la misma ubicación y tienen aproximadamente la misma magnitud, aunque la derecha en el modelo físico (Fig. 4.8a) resultó estar dividida en tres partes, fenómeno que no se alcanzó a percibir con la simulación matemática. También se encontraron similitudes en el flujo cercano a la superficie libre, tanto en magnitud como en la dirección de este, por ejemplo, en ambas partes izquierda y derecha del molde el flujo con mayor velocidad se localizó justo en medio entre las paredes angostas del molde y las paredes de la carcasa de la buza (ver "5"). Sin embargo, a pesar del gran parecido del flujo en la zona superior del molde, en la zona por debajo de los chorros, no se aprecian las recirculaciones bien definidas en el modelo matemático, ver Fig. 4.8b (ver "6 y 7") como aparecen en la experimentación física, en el cual, el ojo de

recirculación apareció bien definido mientras que en la simulación con el modelo LES se observaron varias pequeñas recirculaciones en vez de solo una grande, pero estas pequeñas recirculaciones, tienden a girar en el sentido de la gran recirculación presente en el modelo físico. Por último, en lo que respecta al flujo que sube por en medio de las grandes recirculaciones en la zona inferior del molde (ver “8”) se observa que tiene la misma dirección y aproximadamente la misma velocidad. La figura 4.8 c (repetida) muestra una tendencia similar en el movimiento del trazador vegetal al interior del molde al movimiento del fluido previamente descrito, es decir un flujo de doble rollo de cuatro grandes recirculaciones.

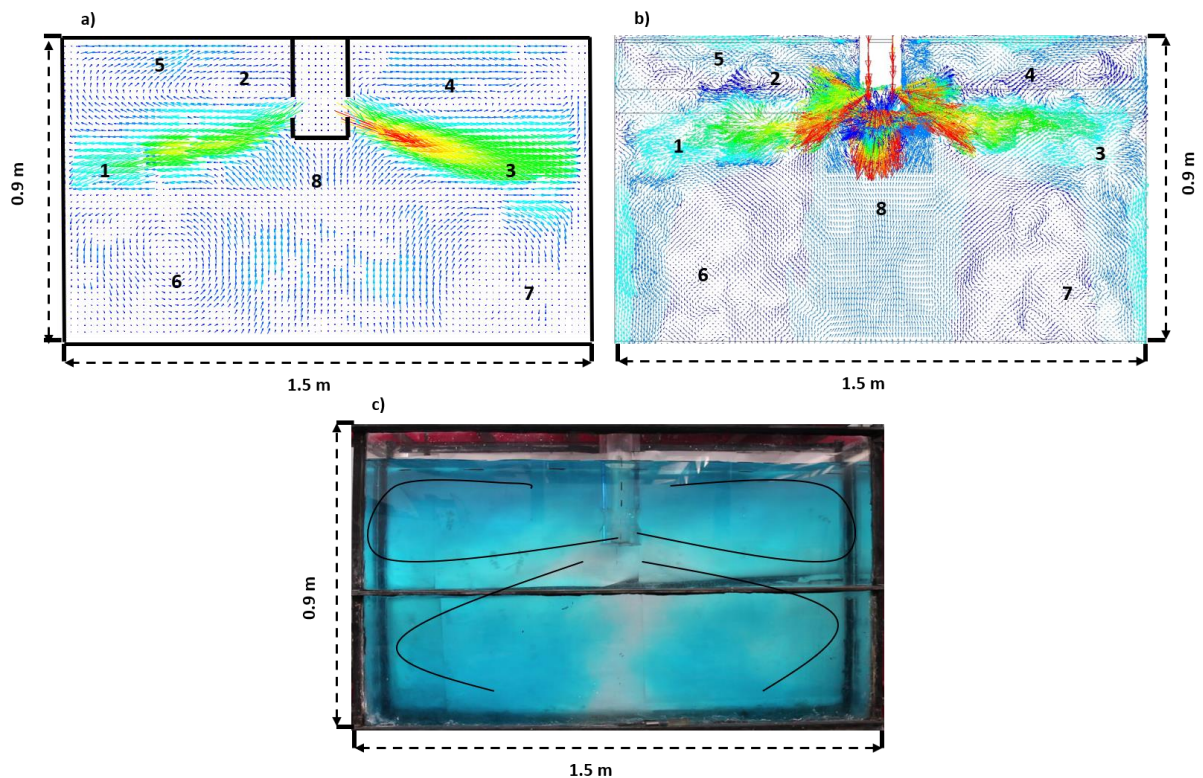


Fig. 4.8. Validación del modelo matemático. a) Modelo físico, b) Simulación matemática, c) Trazador vegetal.

4.2 Modelo Matemático del Sistema Acoplado Molde-Buza

Después de la obtención de los resultados de la simulación física, se decidió simular el sistema molde-buza acoplado con la finalidad de obtener un algoritmo capaz de predecir de manera confiable la fluido dinámica al interior del molde para que en un futuro sea más sencillo y barato optimizar las buzas diseñadas en la presente investigación. Una vez que se obtuvo el “estado estable” con el modelo k-w SST se simularon 240 s con el modelo LES, luego se activó la opción de obtener campos

estadísticos, se simularon otros 240 s adicionales en los cuales se obtuvieron dichos campos, permitiendo así obtener los campos vectoriales promediados que da el modelo LES en vez de utilizar los campos instantáneos de velocidad.

Como se pudo deducir del texto anterior, ambos campos de velocidad, el obtenido mediante el PIV y el de la simulación matemática resultaron ser bastante similares respecto a la fluido dinámica al interior del molde, por ejemplo, forma, tamaño y posiciones de las principales recirculaciones de fluido, así como a las velocidades presentes en el todo el campo vectorial, por lo que se estableció que el modelo LES es capaz de reproducir de manera confiable la fluido dinámica en él molde de colada continua.

4.2.1 Campo de Velocidad en el Interior del Molde

La Fig. 4.9 muestra los resultados obtenidos de la simulación matemática realizada en Ansys Fluent. Se puede apreciar un campo de flujo consistente en cuatro grandes recirculaciones, sin embargo, como puede verse, en el lado derecho, la recirculación grande está dividida en dos pequeñas recirculaciones, una se encuentra próxima a la superficie libre (ver "1") y la otra está muy cercana al chorro derecho (ver "2"). También, en el lado izquierdo pueden verse dos pequeñas recirculaciones, la marcada con el número "3" se ubica cercana a la pared izquierda y la otra (ver "4") está al centro del lado izquierdo. En lo que respecta a las recirculaciones inferiores, estas se ubican por debajo de los 0.5 m por debajo de la superficie libre. Con relación al comportamiento del fluido dentro del molde puede observarse lo siguiente: no existe simetría en el campo fluido dinámico obtenido. También, el chorro sale de los puertos a velocidades por encima de 1 m/s, el chorro derecho impacta la pared angosta a una mayor profundidad que el chorro izquierdo, el cual está ligeramente menos inclinado (ver "5 y 6"). En la zona por encima de los chorros, se observan dos zonas cercanas a la superficie libre donde la velocidad alcanza valores de entre 0.2 y 0.3 m/s. De dichas zonas, la que se ubica en el lado izquierdo son más grandes que las del lado contrario, mientras que las zonas de baja velocidad se ubican, como se apreció en las figuras anteriores, en las esquinas de las paredes del molde. Es sencillo notar que los vectores que se encuentran cercanos a los chorros son arrastrados hacia estos y tienden a incrementar el espesor del chorro conforme avanza hacia las paredes angostas. Cuando se produce el impacto de los chorros, parte del fluido que se dirige hacia abajo del molde avanza muy pegado hacia las paredes angostas y lleva velocidades de entre 0.4 y 0.6 m/s aproximadamente. Finalmente, en la zona inferior del molde, el flujo que impacta la carcasa de la buza (ver "7") lleva una dirección vertical, justo como se había determinado en el estudio realizado a través de la velocimetría de partícula por imagen.

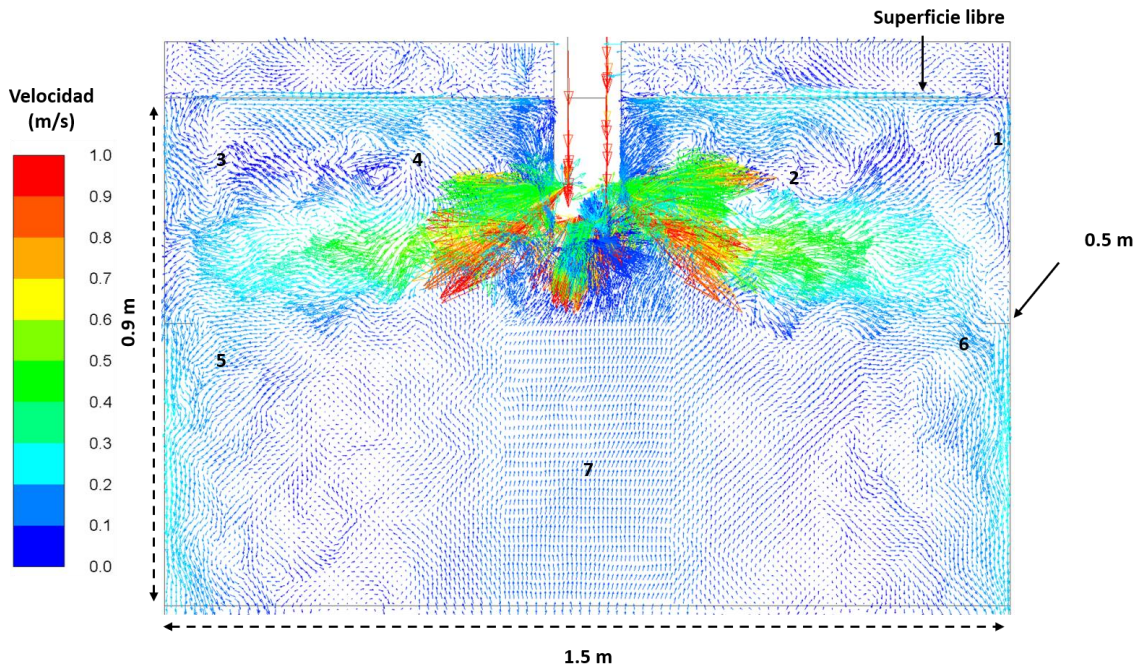


Fig. 4.9. Campo de velocidad en un plano de simetría longitudinal ($Z=0$) del molde obtenido mediante simulación matemática utilizando el modelo LES a un tiempo de 330 s para la Buza Convencional.

4.2.2 Campo de Velocidad sobre la superficie libre

Hasta el momento se ha caracterizado el campo fluido dinámico en el plano de simetría longitudinal del molde ($Z=0$), se han detectado zonas de alta velocidad, zonas de baja velocidad y se han obtenido gráficas de velocidad en la superficie libre, así como en las inmediaciones de las paredes angostas. De dichos resultados mostrados con anterioridad, también se hizo notar que en la superficie libre aparecieron vorticidades, conocidos comúnmente como “Vórtices de Von Karman”. Dichos vórtices se han venido reportando que aparecen en el lado “débil” del molde [52]. Se presenta a continuación el campo de velocidad en un plano paralelo a la superficie libre ubicado a 2 cm por debajo de esta ($Y=-0.02$). Dichas imágenes fueron obtenidas a los tiempos de 30 s, 40 s, 70 s y 90 s estadísticos. En la Fig. 4.10a se observa que la zona derecha del molde presenta mayores velocidades que la izquierda, incluso en esta última (ver “1”), se aprecia que el flujo circula con menor velocidad cerca de la pared frontal. En la zona que circunda las paredes de la carcasa de la buza, se observan dos pequeñas recirculaciones, producidas por el flujo derecho (ver “2 y 3”) el cual como se dijo anteriormente presentó mayores velocidades, de estas, la marcada con el número 2 es bastante más intensa y pudiera llegar a formar vorticidades que arrastren escoria hacia el interior del baño metálico. También, se encontraron las zonas de baja velocidad localizadas en los extremos de las paredes angostas a ambos lados del

molde que se habían venido reportando en párrafos anteriores. A un tiempo posterior de 40 s estadísticos (ver Fig. 4.10b), se observa un gran cambio en el comportamiento del fluido, en el lado izquierdo el flujo tiende a avanzar preferentemente por la pared posterior dejando así la pared frontal con velocidades considerablemente menores (ver “1”). Este comportamiento continúa hasta que se encuentra con un flujo proveniente del lado derecho que atraviesa la zona de la buza e impactan justo a un costado de la buza (ver “2”). Del lado derecho el flujo avanza de manera uniforme a ambos lados de las paredes angostas e incluso la zona de baja velocidad observada en el tiempo anterior casi desapareció por completo y para el presente tiempo no se observan recirculaciones de flujo que comprometan la aparición de vorticidades.

La Fig. 4.10c corresponde a un tiempo de 70 s (estadístico) y se puede notar de nueva cuenta, un gran desbalance en las velocidades sobre el plano de análisis. El lado derecho ahora presentó menores velocidades que el lado izquierdo, sin embargo, se siguió observando que del lado izquierdo en la pared frontal el flujo tiene menor velocidad que del lado contrario (ver “1 y 2”), por el contrario, se puede ver que tanto el flujo del lado derecho e izquierdo cruzan la zona de la buza generando dos pequeñas zonas de baja velocidad justo por delante y detrás de la buza en las paredes frontales y posteriores, de estas, la de la pared posterior formo una pequeña zona de recirculación (ver “3 y 4”). También se puede ver que las zonas de baja velocidad ubicadas en las paredes angostas son aproximadamente del mismo tamaño. Finalmente, a un tiempo de 90 s después de haber comenzado a obtener estadísticas en el campo de flujo, se obtuvo la imagen 4.10d. En esta figura se puede ver que las velocidades de ambos lados tienden a estabilizarse, es decir no cambian significativamente respecto al tiempo anterior, aunque del lado izquierdo se aprecia una leve reducción de la velocidad. Se nota también que las zonas de baja velocidad en las esquinas de las paredes angostas se mantuvieron sin grandes cambios y el flujo a los costados de la buza presento tres pequeñas recirculaciones, dos de estas ubicadas en la pared frontal.

En los párrafos anteriores se pudo notar que el flujo en la superficie libre está cambiando bastante a pesar del gran tiempo de simulación del que se ha obtenido y se puede deducir que el chorro está oscilando, tanto en su inclinación como en el plano en el que impacta, debido a que en ocasiones, se observa mayor velocidad sobre alguna de las paredes frontal o posterior y esto sin duda mueve las zonas de baja velocidad en las paredes angostas y es en gran medida responsable de la formación de vorticidades observada anteriormente, teniendo como consecuencias un posible arrastre de escoria en el centro del molde y en última instancia un gradiente térmico desfavorable en las esquinas del molde.

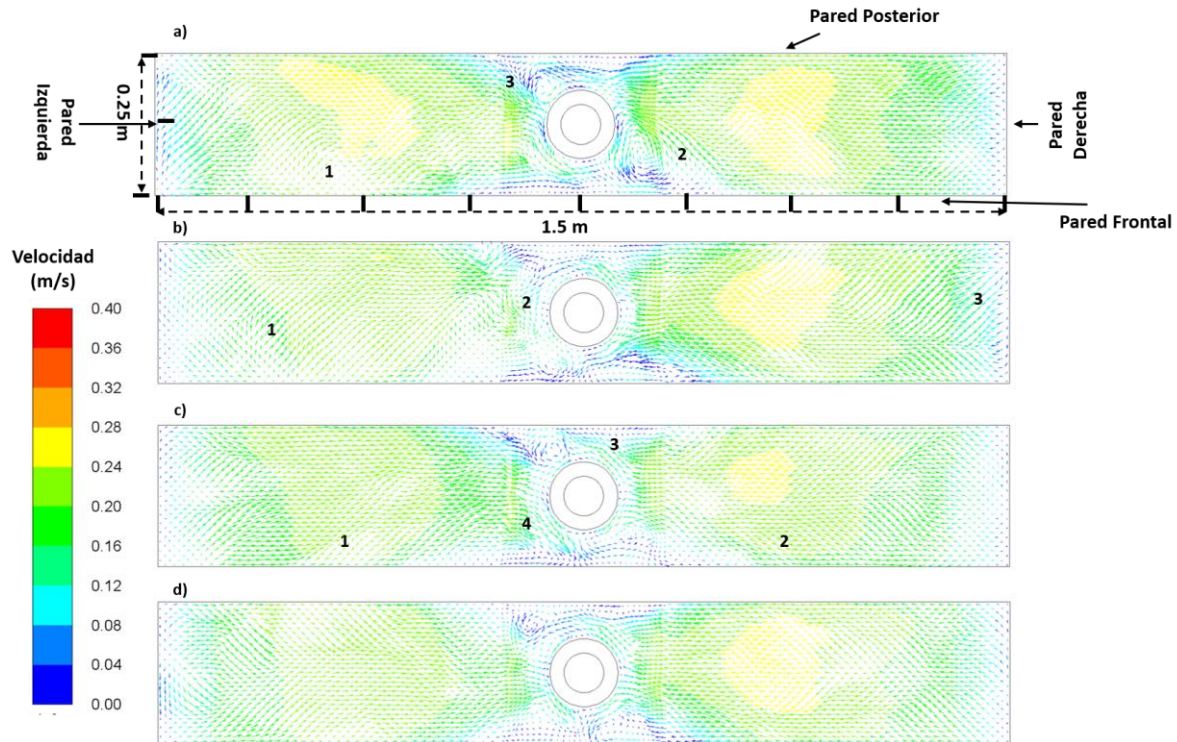


Fig. 4.10. Campo de velocidad obtenido mediante simulación matemática en un plano ubicado a 2 cm por debajo de la superficie libre para la Buza Convencional C_p .

4.2.3 Oscilaciones de nivel en la superficie libre obtenidos mediante simulación matemática

La Fig. 4.11 muestra los resultados obtenidos de las oscilaciones de nivel sobre la superficie libre en la pared frontal ($Z=0.25$ m) obtenidas a los tiempos de 30 s, 40 s, 70 s y 90 s estadísticos. La serie de figuras de 4.11a-d corresponden a la zona derecha del molde, mientras que la serie 4.11e-h corresponden a la zona izquierda. La Fig. 4.11a corresponde a 30 s, se aprecia de manera general que el nivel siempre oscila por debajo de la línea de referencia, además, en la Zona I justo a la mitad de dicha zona se ve que se alcanza el mínimo valor de oscilación (alrededor de -5 mm), posteriormente, el nivel asciende ligeramente y se mantiene relativamente constante en la Zona II, para después volver a descender en la Zona III y alcanzar un valor cercano a los -8 mm, volviendo a oscilar rápidamente hasta el valor de -4 mm aproximadamente y descender hasta por debajo de los -10 mm en la Zona IV, justo donde se localiza la buza. A un tiempo de 40 s (Fig. 4.11b) ahora el nivel se mantiene relativamente constante en la Zona I y la mitad de la Zona II el valor de la oscilación ronda los -4 mm. Después tiende a fluctuar y vuelve a mantenerse en el mismo valor para casi toda la Zona III. Al final de dicha zona tiende a descender y llega a un valor

por debajo de los -10 mm para la Zona IV. Para el caso de la Fig. 4.11c que corresponde a un tiempo 70 s estadísticos, se puede observar claramente que el nivel oscila en forma de ondas, la mayor cresta se ubica en la Zona IV y alcanza un valor de +2 mm por encima de la línea de referencia mientras que el máximo valle se ubica en la Zona III y alcanza un valor de -5 mm. A un tiempo de 90 s estadísticos (Fig. 4.11d) se sigue observando la misma tendencia descrita en el tiempo anterior, pero en este caso, las oscilaciones del nivel por debajo de los -10 mm están presentes en casi la mitad del molde.

Para la Zona izquierda del molde, se repetirá el mismo análisis anterior. La Fig. 4.11e (30 s) muestra que el nivel tiene a oscilar de forma descendente desde la Zona VIII hasta la Zona V, en esta última, los valores se ubican por debajo de los -10 mm. Se puede notar una clara tendencia del nivel a oscilar en forma de ondas irregulares, tal como se observó del lado derecho al mismo tiempo. A un tiempo de 40 s (Fig. 4.11f) el nivel tiende a oscilar de forma más homogénea, es decir, cercas a la pared angosta izquierda, el nivel se mantiene relativamente constante en las Zonas VIII y VII, después se mantiene sobre los -10 mm en la Zona VI y vuelve a bajar ligeramente hacia el centro del molde. A un tiempo de 70 s (Fig. 4.11g) el nivel vuelve a oscilar ligeramente en las zonas VIII y VII, mientras que en la Zona VI ocurre una cresta justo a la mitad, y finalmente, en la zona cercana a la buza se sigue observando prácticamente lo mismo que en el tiempo anterior. En lo que respecta a la Fig. 4.11h que corresponde al tiempo de 90 s se puede notar que el nivel se mantiene relativamente estable, oscilando alrededor de los -5 mm para las Zonas VIII y VII, después, tiende a mantenerse cercano a los -10 mm en el resto del lado izquierdo del molde.

En los párrafos anteriores se pudo notar que las oscilaciones en el molde no son simétricas a ambos lados. También se observó, que mientras en un lado las oscilaciones alcanzan valores máximos, del lado contrario ocurre que el nivel casi no fluctúa, lo que da pie a pensar que las oscilaciones del chorro aumentan el flujo ascendente de un lado hacia la superficie libre provocando que este fluctúe con mayor intensidad y del lado contrario no se da el fenómeno. Para comprobar lo anterior, se obtuvieron gráficas de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para cada uno de los tiempos mostrados anteriormente.

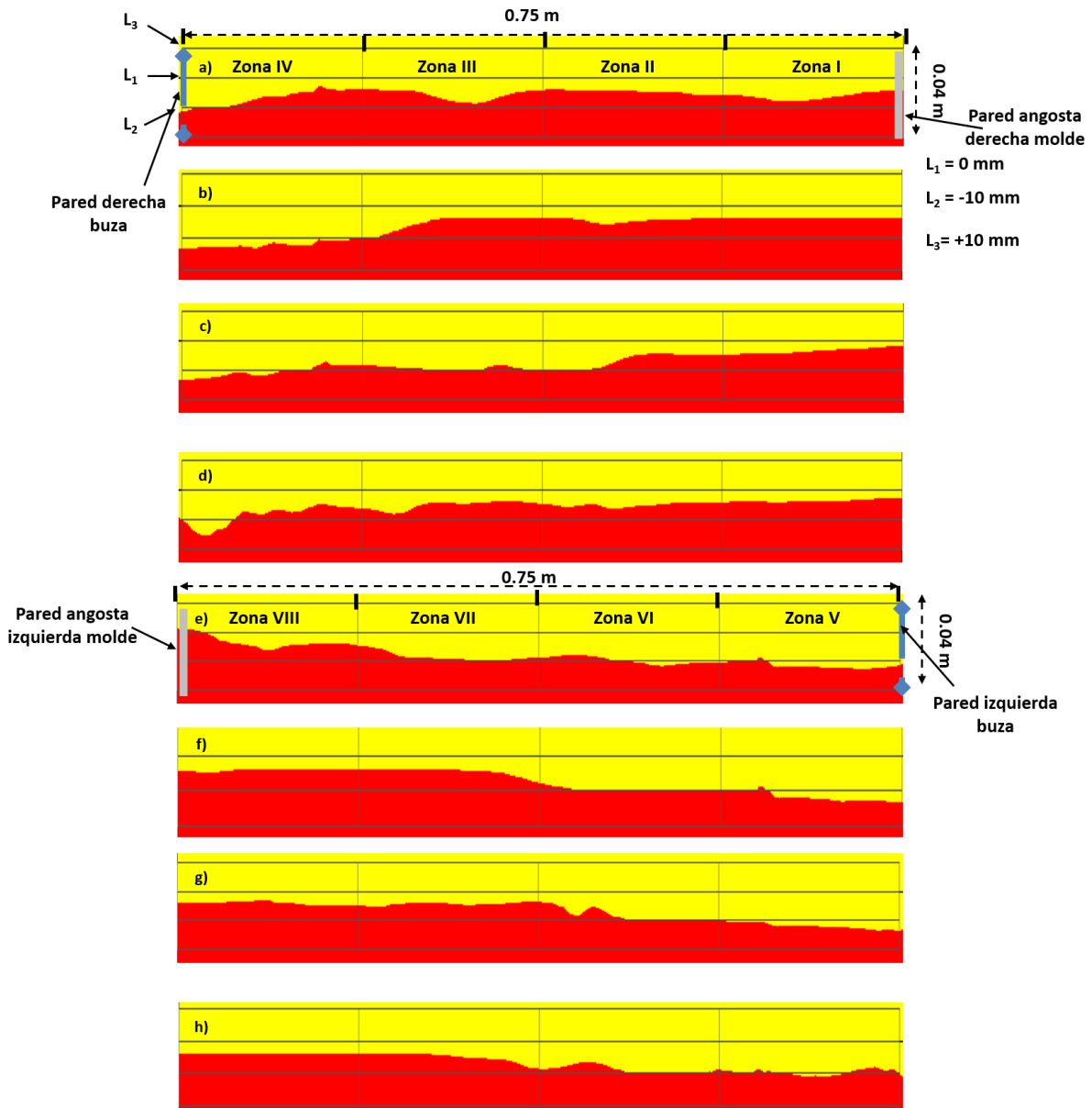


Fig. 4.11. Contornos de Fases, oscilaciones de nivel en la superficie libre en la pared frontal del molde a diferentes tiempos obtenidas mediante simulación matemática. Zona Derecha e Izquierda del molde para la Buza Convencional Cp.

La Fig. 4.12 muestra las gráficas de velocidad obtenidas a 10 mm por debajo de la superficie libre en el plano de simetría longitudinal ($Z=0$). Se puede notar en primera instancia que, con el paso del tiempo de la simulación, el flujo tiende a estabilizarse y cuando pasan los 90 s, la variación de los picos de velocidad en la zona central del molde disminuye notablemente. También se puede ver que las máximas velocidades tienden a cargarse del lado derecho, siendo en todos los tiempos analizados, el lado

izquierdo con menores velocidades, se aprecia así mismo que la distribución de velocidades es más homogénea en el lado izquierdo, ya que el derecho sube abruptamente e igualmente baja su velocidad en las Zonas I y IV. Por otro lado, correlacionando los resultados con las oscilaciones de nivel presentadas en el apartado anterior se pudo comprobar que dichas oscilaciones son mayores en el lado con mayor velocidad y también, que un cambio demasiado rápido en la pendiente de la gráfica se refleja en una oscilación grande (usualmente inferior a los -10 mm en las zonas cercanas a la buza).

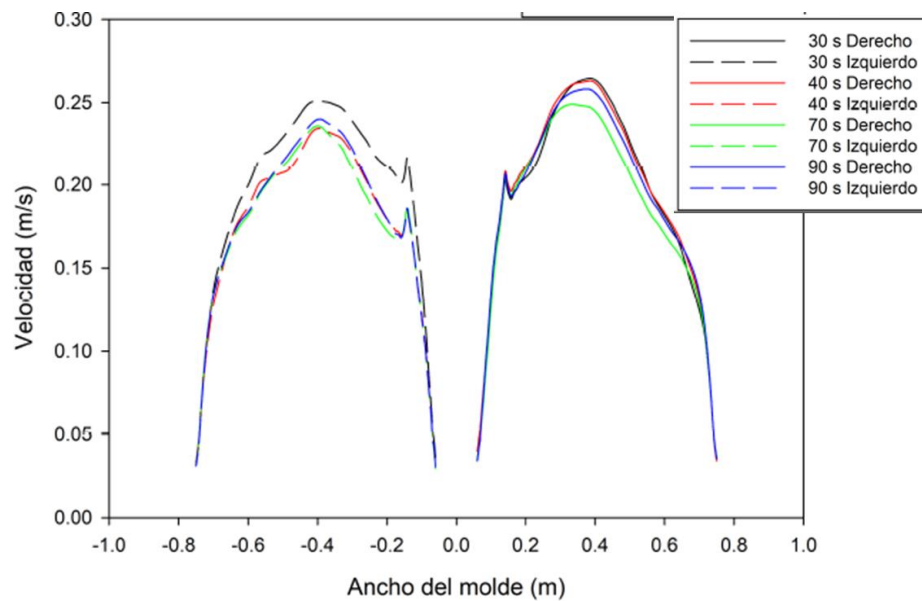


Fig. 4.12. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre en el plano longitudinal ($Z=0$) obtenida mediante simulación matemática para la Buza Convencional Cp.

4.2.4. Correlación de la Fluido Dinámica en el interior del molde con la aparición de defectos superficiales en el producto final

En los párrafos anteriores se caracterizó la fluido dinámica en el interior del molde de colada continua bajo las condiciones de operación fijadas previamente. De dicha fluido dinámica se puede decir lo siguiente: El patrón de flujo obtenido fue el clásico patrón de flujo de cuatro grandes recirculaciones, conocido comúnmente como de “doble rollo” (double roll). Se observó experimentalmente que el patrón de flujo es asimétrico, los chorros que salen de la buza se están moviendo constantemente a lo largo del tiempo, provocando que el tamaño y posición de las principales recirculaciones de flujo cambien también, afectando así el comportamiento del flujo en la superficie libre,

generando a su vez oscilaciones del nivel y en última instancia vorticidades de flujo cercanas a las paredes de la buza.

Se observó también que los chorros salen de la buza bastante inclinados (alrededor de 15°) y conforme avanzan en su camino hacia las paredes angostas pierden su inclinación hasta hacerse completamente rectos y mucho más gruesos que al inicio. Cuando estos impactan sobre las paredes angostas lo hacen a una distancia de -300 mm aproximadamente por debajo de la superficie libre. Se determinó que la velocidad de impacto de los chorros sobre las paredes rondaba entre 0.10 a 0.15 m/s. Se ha reportado que justo en la zona de impacto, la cascarilla recién solidificada de acero tiene un máximo de 10 mm de espesor [11], por lo que el desgaste de la cascarilla por los efectos de la fricción del fluido es crítico y debería en la medida de lo posible mantenerse velocidades de impacto del chorro relativamente bajas.

Por otro lado, en la superficie libre se encontraron oscilaciones de nivel que van desde los +10 mm a -10 mm, ósea, un total de ± 20 mm de amplitud. Dichas oscilaciones de nivel se han venido reportando, que si se excede el valor de ± 5 mm [53] es posible que se generen defectos de calidad [33], entre ellos, arrastre de inclusiones no metálicas hacia el interior del molde, marcas de oscilación profundas, grietas longitudinales, hendiduras (“gaps”), entre otros. También, se ha reportado que las zonas de baja velocidad que se ubican en las esquinas del molde pueden generar gradientes de temperatura adversos e incluso pudiera darse un sobre enfriamiento conocido en la literatura especializada como “meniscus freezing” [34] que haría posible la incursión de escoria líquida u sólida hacia el interior del metal líquido y su posible solidificación con el producto final.

4.3 Obtención de una Buza Disipadora de Energía Cinética

4.3.1 Caracterización de la Buza Convencional con y sin piscina

Para obtener los siguientes resultados, se simuló solo la buza (sin el molde) con la finalidad de ahorrar el gran tiempo de cálculo que se requería la simulación acoplada (molde-buza) que tomaba hasta 3 meses de tiempo de cómputo. Como se dijo en la parte de la metodología, para estas simulaciones se utilizó el modelo de turbulencia conocido como Esfuerzos de Tensiones de Reynolds “RSM”, el cual ha sido ampliamente empleado en anteriores investigaciones y ha demostrado una gran capacidad en predecir el comportamiento del flujo al interior del molde y buza [36]. Se eligió utilizar el mismo algoritmo de solución que las simulaciones anteriores, con la diferencia de que por la misma simplicidad del modelo actual (solo la buza) se optó

por realizar la simulación en estado estable, agilizando de esta manera el tiempo requerido por simulación.

Como primera parte, se caracterizó mediante simulación matemática la buza convencional con piscina ("Bc Cp") y buza convencional sin piscina ("Bc Sp"), en la Fig. 4.13a y b se muestran dichas buzas.

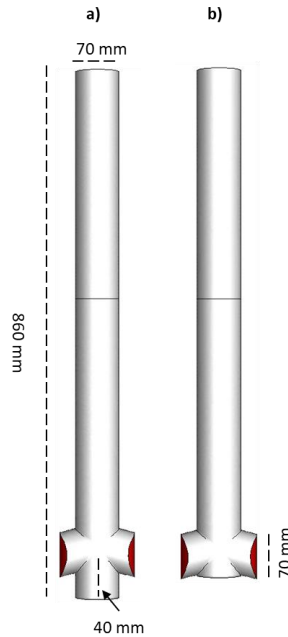


Fig. 4.13. Modelos en 3D de la Buza, a) Buza Convencional Con Piscina (Bc Cp), b) Buza Convencional Sin Piscina (BC Sp).

Enseguida, se muestran los contornos de velocidades obtenidos en el plano de simetría $Z=0$ y en ambas buzas el fluido entra a una velocidad de 1.62 m/s. La Fig. 4.14a muestra que la máxima velocidad se localiza siempre a la salida de los puertos y esta tiende a alcanzar valores de hasta 2 m/s para la buza convencional Sp, mientras que en la buza convencional Cp la máxima velocidad ronda los 1.8 m/s. También se puede apreciar claramente el efecto de la piscina sobre las velocidades máximas de los chorros que salen de la buza, es decir, la piscina de la buza actúa como un dispositivo que disipa la energía cinética de los chorros provocando que estos salgan con menores velocidades en los puertos de descarga.

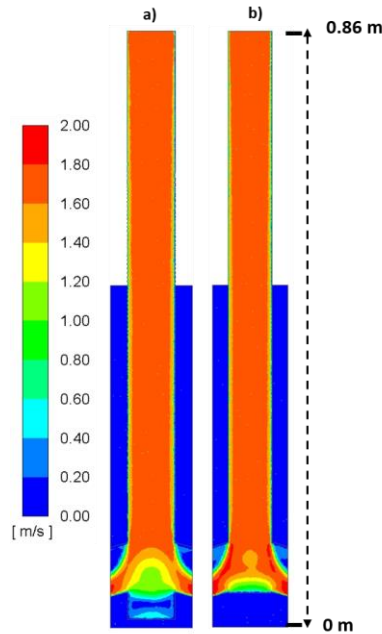


Fig. 4.14. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza Convencional Cp, b) Buza Convencional Sp.

La Fig. 4.15 muestra los vectores de velocidad para la buza convencional Cp y Sp. En ambas figuras se observa claramente que todos los vectores se dirigen hacia abajo en toda la longitud de la buza salvo en la parte de los puertos, en esta última ocurre un cambio de dirección, los vectores se redirigen hacia las salidas de los puertos, se puede ver claramente que para el caso de la Bc Sp la inclinación de dichos vectores es mucho mayor que en el caso de la Bc Cp. En el caso de la Buza Cp, en la piscina exactamente, se observaron dos zonas de baja velocidad, una gira en sentido anti horario y la otra en sentido horario (ver números "1" y "2"). También se pueden ver dos zonas de baja velocidad en la parte superior de los puertos de descarga de las buzas, en estas, los vectores apuntan hacia la buza y producen un retro flujo, impidiendo así que se aproveche toda el área de salida de los puertos. Como se puede notar, la buza convencional Cp tiene una mayor longitud de retro flujo que la buza convencional Sp, esto ocurre así, debido a que se aprecia que las recirculaciones generadas en la piscina tienden a levantar ligeramente los chorros, amortiguándolos y obviamente cambiando su inclinación, lo que sin duda generara chorros con una menor inclinación dentro del molde.

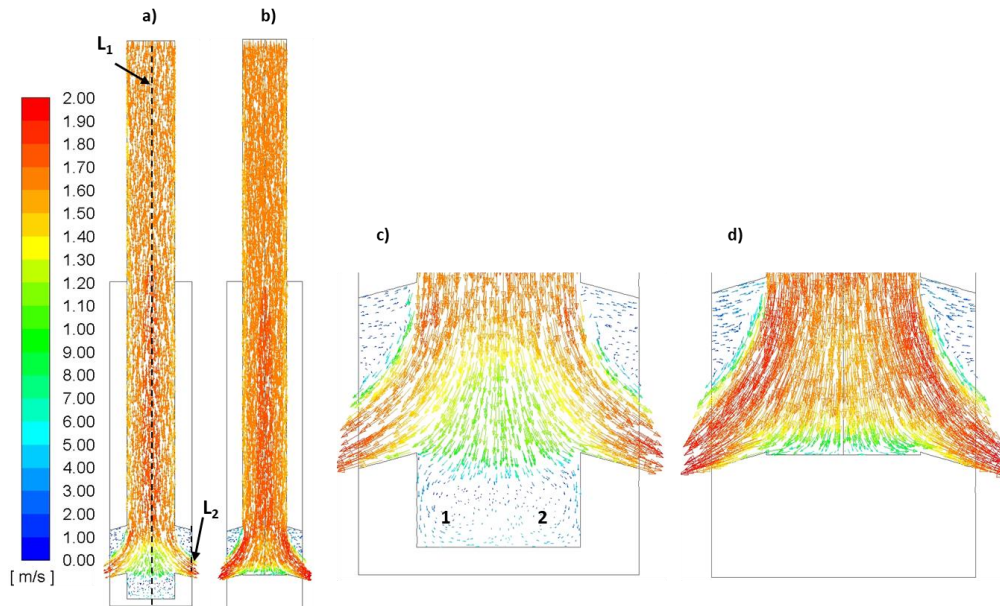


Fig. 4.15. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza Convencional Cp, b) Buza Convencional Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos Bc Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos Bc Sp.

Se dibujaron dos líneas en la figura anterior L_1 y L_2 , en estas líneas se trazaron gráficas de velocidad y, además, se obtuvieron en los puertos de descarga las velocidades máximas y promedio que se dan en ambas buzas. Los resultados se muestran a continuación.

Para el Caso de la línea L_1 que corresponde al perfil de velocidades en el eje de simetría $X=0$ (ver Fig. 4.16) se puede observar que en ambas buzas la velocidad tiende a incrementarse conforme desciende el fluido en el interior de la buza, además, los valores en la velocidad son prácticamente iguales y se alcanzan velocidades máximas de 1.72 m/s justo antes de que el chorro se divida en dos para salir de la buza.

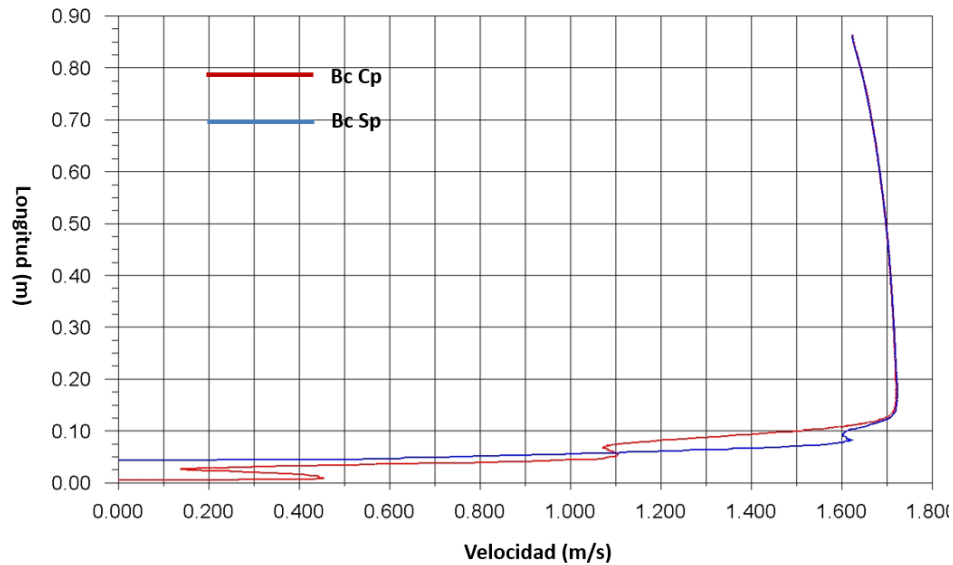


Fig. 4.16. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal (X=0) en la Buza Convencional.

Con relación a la línea L_2 ubicada en los puertos de descarga derecho e izquierdo (ver Fig. 4.17) se puede observar claramente que las máximas velocidades se alcanzan en la zona baja de los puertos. Para la Buza convencional Cp, la máxima velocidad en el puerto derecho e izquierdo resultó ser de aproximadamente 1.98 m/s mientras, que la Buza convencional Sp tiene velocidades mayores que rondan los 2 m/s. Como se dijo en párrafos anteriores, la piscina en este diseño de buza está funcionando como un dispositivo disipador de energía cinética por lo que, de aquí en adelante, el futuro diseño de la buza disipadora se basará en esta hipótesis, es decir, se usará una buza con una piscina.

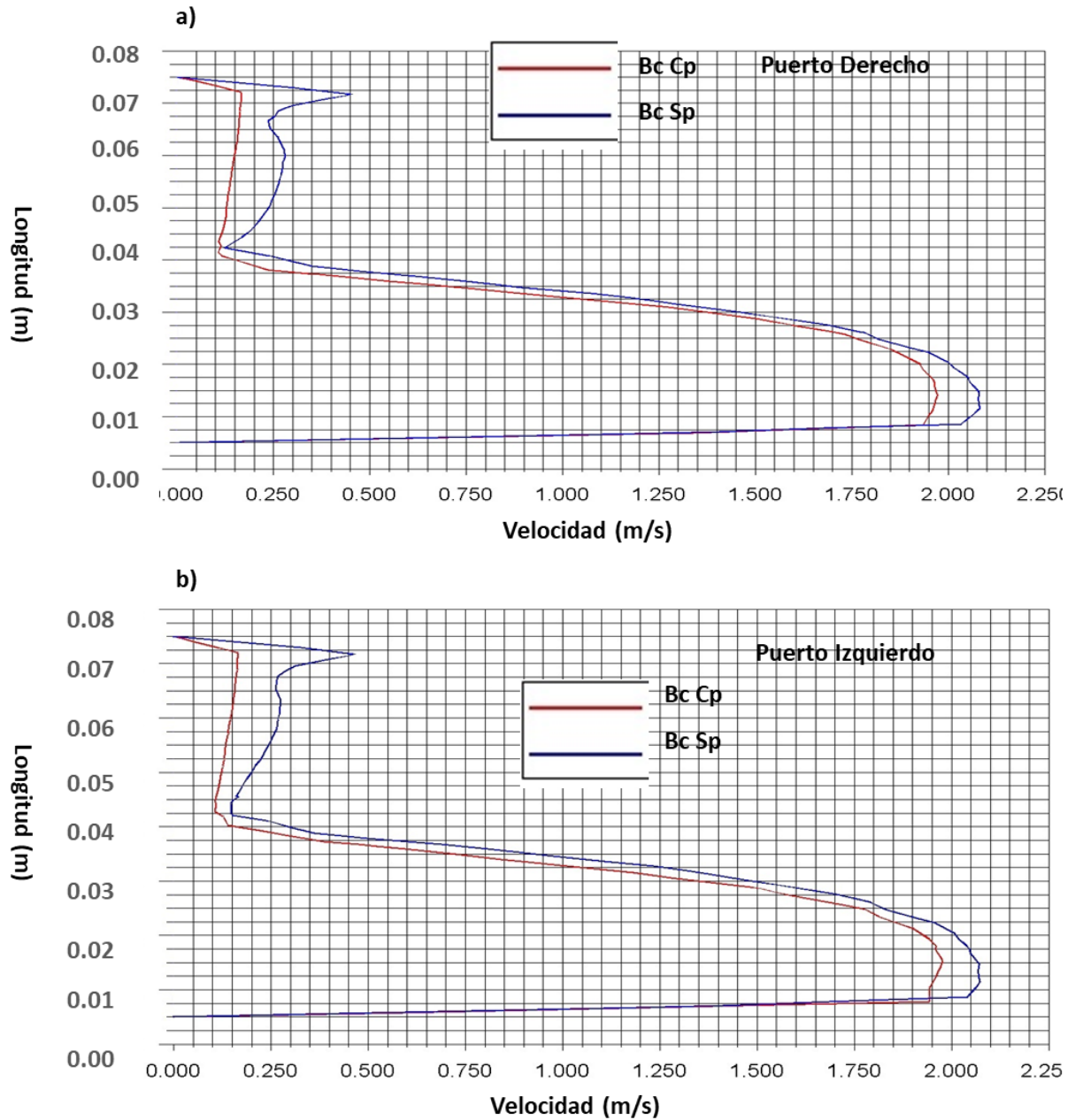


Fig. 4.17. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=0.07$) en la Buza Convencional.

En los párrafos anteriores se obtuvieron gráficas de los perfiles de velocidad en los ejes $X=0$ y $X=0.07$ en la buza, sin embargo, existen posibilidades que la máxima velocidad en los puertos de descarga no se encuentren en dichas zonas debido a que el flujo es completamente turbulento y no existe simetría en los campos vectoriales, razón por la cual se obtendrán los máximos valores de velocidad dentro del puerto

utilizando integrales de superficie del área de los puertos (“Surface Integral Area”) y los resultados encontrados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.

Velocidades Máximas		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
Bc Cp	2.064759	2.0525489
Bc Sp	2.1962984	2.1899734
Velocidades Promedio		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
Bc Cp	0.97076413	0.9769052
Bc Sp	1.0691687	1.073669

Como se pudo ver en la Tabla 4.1 la buza Sp siempre genera mayores velocidades a la salida de los puertos y por el otro lado, la buza Cp tiende a generar menores velocidades.

4.3.2 Modelos de Buzas Disipadoras de energía cinética

La idea principal para obtener una buza disipadora de energía cinética se basó en el modelo del investigador Solorio y cols [10]. Dicha idea se adaptó para su empleo en el molde, con las respectivas limitaciones que esto conlleva. De estas, las principales restricciones de diseño se basaban en conservar una longitud total de 0.86 cm, también, un diámetro de salida de los puertos igual al diámetro de entrada de la buza y en utilizar la misma piscina que el caso base en este estudio (Bc Cp).

La Fig. 4.18 muestra algunos de los modelos realizados en el proceso de diseño de la buza disipativa de energía cinética, por su simplicidad en la simulación se modelaron las buzas sin piscina y después de comprobar que funcionaron se modelaron con piscina para poder comparar los resultados obtenidos.

La primera alternativa de diseño (Fig. 4.18a) fue añadir dos cámaras convergente-divergente de igual longitud. Después, se optó por añadir una tercera cámara (todas de igual longitud) y se mantuvo la longitud de separación entre las cámaras iguales (ver Fig. 4.18b). Se encontró que añadir más cámaras a la buza se reflejaba en una mejor relación de las velocidades de entrada/salida, pero no aumento mucho, por lo que se decidió realizar un redondeo a las cámaras para aumentar el área superficial de contacto del fluido y ayudar a obtener una mejor relación de velocidades (Fig. 4.18c). Con este redondeo efectivamente se alcanzó una mayor relación de las velocidades de entrada/salida, sin embargo, construir dicha buza no resulta tan viable, por lo que se descartó este diseño. Siguiendo la premisa de que aumentar el número

de cámaras funcionada, se añadió una cámara más (Fig. 4.18d), pero al momento de analizar los resultados se encontró que el diseño no funcionaba y después de un análisis más detallado de las geometrías propuestas, se concluyó que aumentar la longitud de las cámaras funcionaba mejor que aumentar el número de estas en la buza y se propusieron dos diseños que si funcionaban (Fig. 4.18e y 18f). Estos diseños son de tres y dos cámaras respectivamente, y en los dos, las cámaras aumentan de longitud mientras se acercan a los puertos de la buza. Estos mismos diseños se modelaron con piscinas para evaluar su efecto (Fig. 4.18g y 18h). Finalmente, se decidió aumentar en 10° el valor del ángulo de inclinación para un total de 25° y se usaron como base los modelos de buza de dos y tres cámaras antes mencionados (Figs. 4.18i-l)

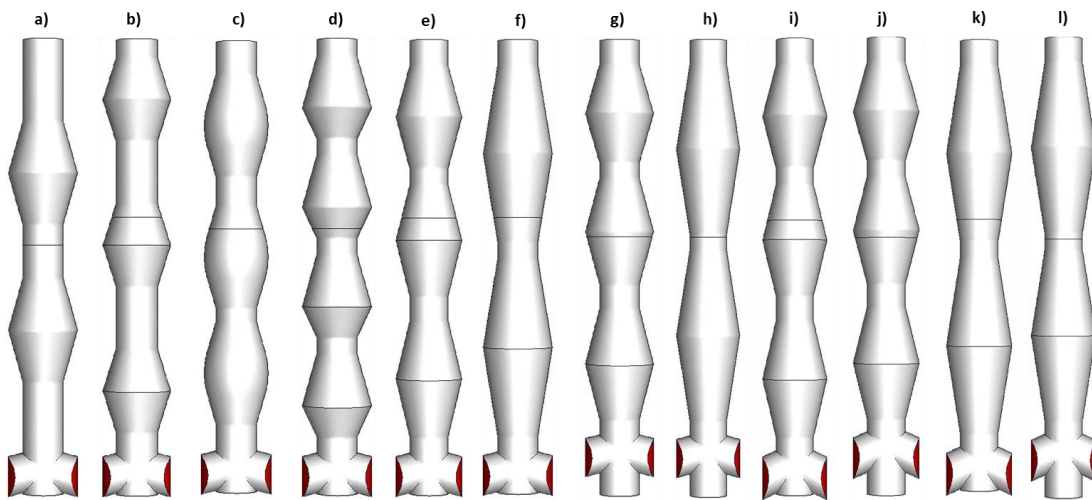


Fig. 4.18. Modelos en 3D de las buzas disipativas modeladas mediante CFD.

A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran los resultados de las máximas velocidades encontradas en las buzas disipativas modeladas en la Fig. 4.18. El caso base de esta investigación como se dijo anteriormente es la Bc Cp, la cual tuvo una máxima velocidad de salida en los puertos de descarga de 2.064759 m/s. Contra esta velocidad se tomará el porcentaje de reducción de velocidad en base a la siguiente formula:

$$\text{Eficiencia de Reducion de Velocidad} = \left(\frac{V_{\text{caso base}} - V_{\text{Buza propuesta}}}{V_{\text{caso base}}} \right) * 100 \quad 4.1)$$

Para el modelo a) se tiene

$$\text{Eficiencia de Reducion de Velocidad} = \left(\frac{2.064759 - 2.1143515}{2.064759} \right) * 100 = -2.4018$$

El signo negativo en el resultado significa que en vez de una reducción de velocidad (en base al caso base) se tuvo un aumento, por lo tanto, dicha buza no funciona.

Se evaluó la formula en cada uno de los modelos mencionados en la Tabla 4.2 y se encontraron varios casos que funcionaban. De entre estos se eligieron dos casos para su posterior análisis. La buza con tres cámaras y la buza con dos cámaras, estos fueron los modelos i) y j) y los modelos f) y h).

Tabla 4.2. Porcentaje de reducción de velocidades.

	V_{entrada}	V_{salida}	%Reducción de Velocidad
Buza Cp	1.62377 m/s	2.064759	N.A.
Buza Sp	1.62377 m/s	2.1962984	N.A.
Modelo a)	1.62377 m/s	2.1143515	-2.4018
Modelo b)	1.62377 m/s	2.1422925	-3.7550
Modelo c)	1.62377 m/s	2.004262	2.9299
Modelo d)	1.62377 m/s	2.1498528	-4.1212
Modelo e)	1.62377 m/s	1.91408	7.2976
Modelo f)	1.62377 m/s	1.8720458	9.3334
Modelo g)	1.62377 m/s	2.147799	-4.0217
Modelo h)	1.62377 m/s	2.0018358	3.0474
Modelo i)	1.62377 m/s	1.9033197	7.8187
Modelo j)	1.62377 m/s	1.944182	5.8397
Modelo k)	1.62377 m/s	1.8299361	11.3728
Modelo l)	1.62377 m/s	1.9003636	7.9619

4.3.2.1 Buza Disipativa de Tres Cámaras

La Fig. 4.19 muestra los contornos de velocidad en el plano $Z=0$. Se puede notar como primera instancia que la máxima velocidad no sobrepasa el valor de 1.91 m/s. También, ambas buzas tienen las mismas velocidades salvo en la parte de los puertos de descarga. Para el caso de la buza de tres cámaras con piscina (se le nombrará como “B3c Cp”) se puede notar que el área de máximas velocidades en los puertos de descarga (ver “1”) es muchísimo menor y está en una posición vertical más arriba que la correspondiente (ver número “2”) de la buza de 3 cámaras sin piscina (“B3c Sp”). Por otro lado, en lo que respecta a las zonas de baja velocidad localizadas en la parte superior de los puertos de descarga, se aprecia que la buza sin piscina tiene mayores áreas mientras, que la buza con piscina menores, esto a razón de que el chorro se levantó ligeramente debido al flujo que está recirculando en la parte baja de la piscina.

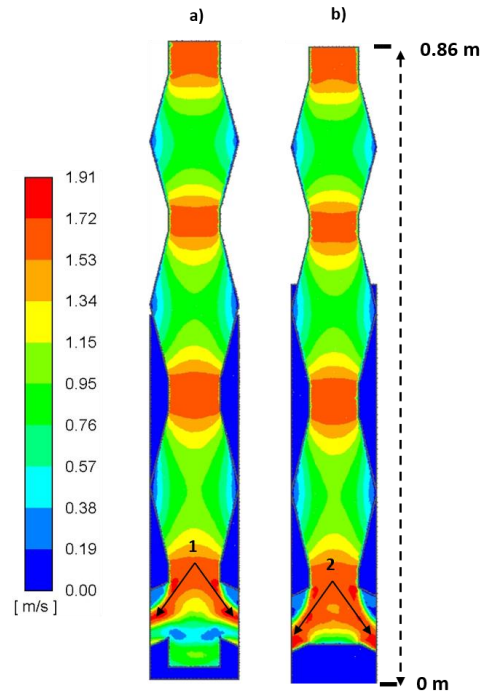


Fig. 4.19. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 3 Cámaras Cp, b) Buza 3 Cámaras Sp.

La Fig. 4.20 muestra en el plano $Z=0$ los vectores de velocidad para la B3c Cp y Sp. El flujo es muy similar en toda la buza y de nueva cuenta, cambia radicalmente en la parte de los puertos de descarga. Se describirá brevemente el fluido en su camino desde la entrada de la buza hasta justo antes de entrar a los puertos. Al inicio, el fluido lleva dirección completamente vertical, pero al entrar a la primera cámara en forma de rombo, en la parte divergente, el fluido se expande y tiende a adherirse a las paredes ocupando todo el volumen de la cámara. Al cambiar de dirección hace que las velocidades ya no se concentren solo en el eje vertical, sino que se distribuyan en los tres ejes, provocando una disminución en la magnitud de la velocidad. Justo cuando va a ingresar a la parte convergente ocurre lo contrario, es decir, ocurre un ligero aumento de velocidad, para después continuar avanzando hasta la zona recta que une las cámaras en forma de rombo. Este comportamiento se repite en cada cámara en la buza, provocando que el fluido en el interior de la buza disipe su energía cinética distribuyéndola en los tres ejes en vez de uno solo como lo hacía la buza convencional. Para el caso en específico de la B3c Cp (ver Fig. 4.20c) se pueden notar claramente las dos recirculaciones de flujo (ver “1 y 2”) en la zona superior de la piscina, estas recirculaciones tienden a levantar el chorro provocando que la inclinación de este disminuya notablemente y también aumente el área de salida aprovechada por el

fluido en comparación con la buza B3c Sp, la cual tiene mayores velocidades en toda las zonas de los puertos de descarga (ver Fig. 4.20d).

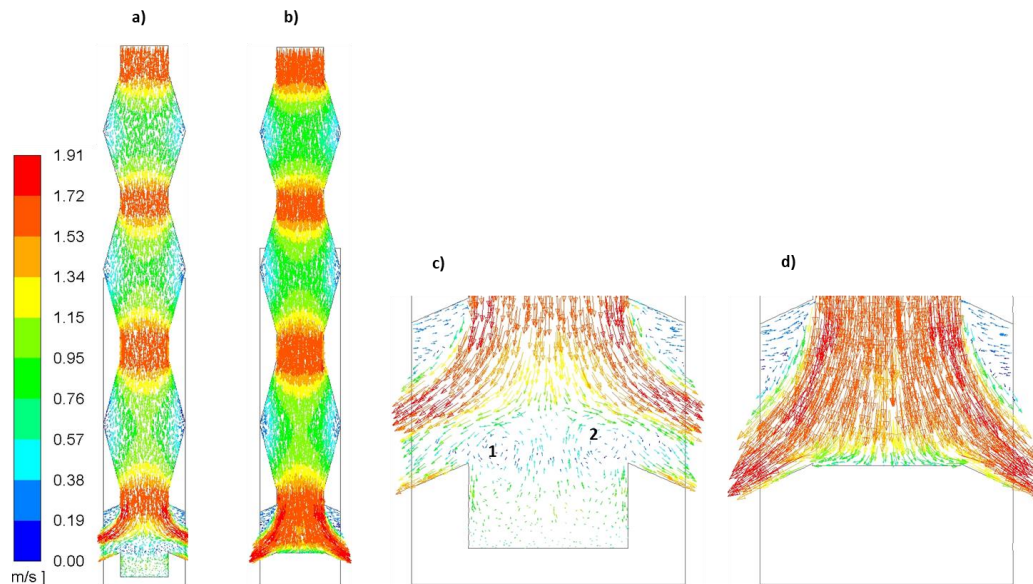


Fig. 4.20. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 3 Cámaras Cp, b) Buza 3 Cámaras Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos B3c Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos B3c Sp.

De forma similar a la Fig. 4.15, se trazaron gráficas en los ejes $X=0$ y $x=0.07$ localizados en el eje de simetría de la buza y en los puertos de descarga. Los resultados se muestran a continuación. La Fig. 4.21 muestra las gráficas en los ejes $X=0$ para las buzas con tres cámaras con y sin piscina. Se puede observar, tal como se dijo en las figuras anteriores, que el comportamiento es prácticamente el mismo salvo en los puertos de descarga. También se aprecia que la primera cámara (en la parte divergente) es la que provoca un mayor descenso en la velocidad, se llega a una velocidad de 0.8 m/s y en la parte convergente se llega nuevamente a su valor original (1.62 m/s), después, en la segunda cámara en la zona divergente se llega a una velocidad máxima de 0.9 m/s y en la zona convergente la velocidad sobrepasa el valor original y llega aproximadamente a un valor de 1.7 m/s. Finalmente, en la cámara número tres, en la zona divergente la velocidad nuevamente desciende hasta un valor de 0.95 m/s para alcanzar un valor máximo en la zona convergente de 1.65 y 1.68 m/s para la buza con piscina y sin piscina respectivamente. Mientras que en la piscina, la buza sin este dispositivo, la velocidad obviamente comienza a descender hasta alcanzar el valor de 0 en la pared posterior de este, y en la B3c Cp se aprecian velocidades de hasta 1 m/s, lo que da indicios de que dichas recirculaciones observadas anteriormente son bastante fuertes, por lo cual ya se había adelantado en

imágenes anteriores, provocaron que el chorro se levantara ligeramente y cambiara su inclinación al salir de la buza.

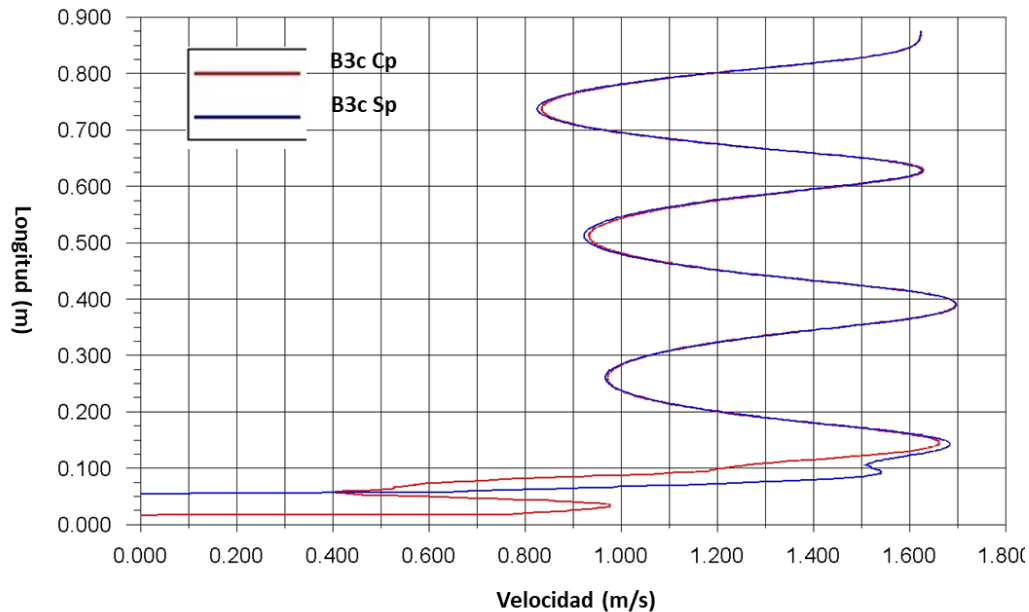


Fig. 4.21. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal ($X=0$) en la Buza de tres cámaras.

En la Fig. 4.22 se muestran las gráficas obtenidas en los ejes $X=\pm 0.07$ para la buza con tres cámaras con y sin piscina. Se puede observar tanto en el puerto izquierdo como el derecho que la B3c Sp siempre genera mayores velocidades que la buza B3c Cp. La primera alcanza valores de aproximadamente 1.85 m/s mientras que la buza con piscina solo llega a valores de 1.75 a 1.78 m/s. También, se puede apreciar que la máxima velocidad para la B3c Cp se localiza siempre más arriba que la correspondiente B3c Sp. Por otro lado, en relación al retro flujo observado en el campo vectorial, se confirma que efectivamente la buza sin piscina tiene una mayor longitud e incluso intensidad (mayor diferencia de velocidad) que la buza con piscina, esto se encuentra ilustrado en la imagen con los números 1 y 2. En lo que respecta a la parte baja de los puertos, el comportamiento del fluido en la buza con piscina difiere bastante de la buza sin ella, por ejemplo, en el primer caso se observan dos máximos de velocidad, por lo que dicho chorro que salga por esta buza impactara con menor velocidad la pared angosta en el molde, debido a que la velocidad de este chorro se encuentra fraccionada en dos partes en vez de ser uniforme como en la buza B3c Sp.

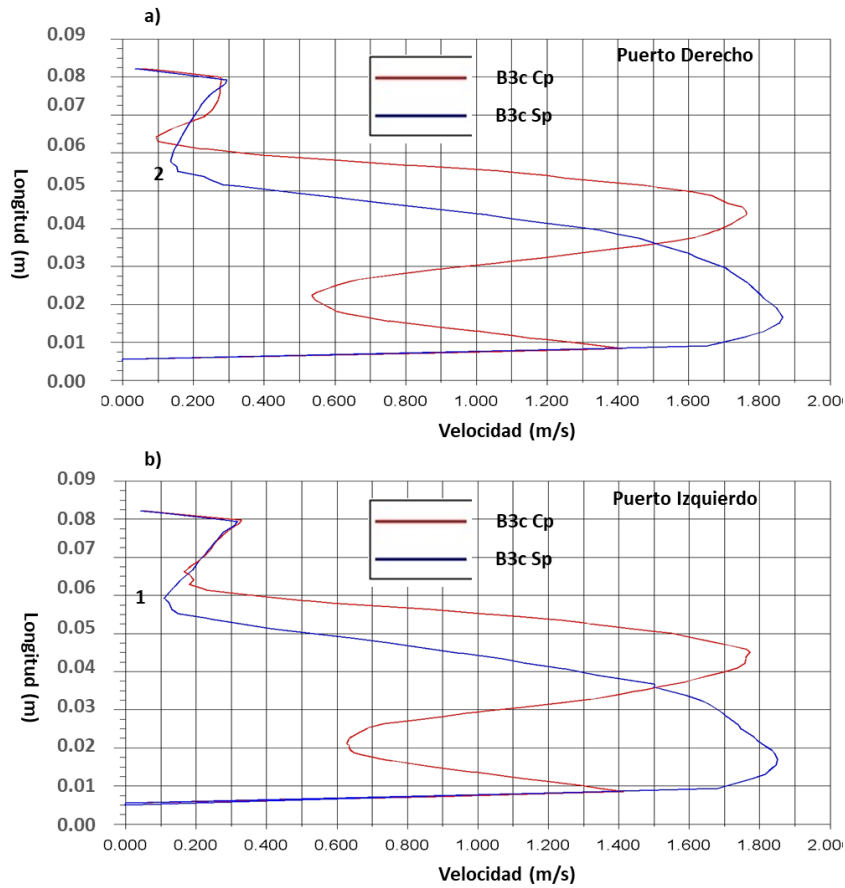


Fig. 4.22. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=\pm 0.07$) en la Buza B3c Cp y Sp.

La Tabla 4.3 muestra las máximas velocidades y velocidades promedio obtenidas de los puertos de descarga. Como se puede ver, la máxima velocidad se presenta en la buza con piscina, sin embargo, en los promedios esto no se cumple, la buza con piscina tiene ligeramente menores velocidades promedio que la buza sin piscina tal y como se apreciaba en las figuras 4.20 a 4.22.

Tabla 4.3. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.

Velocidades Máximas (m/s)		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
B3c Cp	1.9443551	1.944182
B3c Sp	1.9033197	1.9032459
Velocidades Promedio (m/s)		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
B3c Cp	1.0051938	1.0049639
B3c Sp	1.0108973	1.001534

4.3.2.2 Buza Disipativa de Dos Cámaras

La Fig. 4.23 muestra los contornos de velocidad en el plano $Z=0$ para la buza con dos cámaras con y sin piscina. Se puede notar de nueva cuenta que los contornos son prácticamente los mismos en toda la longitud de la buza, salvo en los puertos de descarga. Las zonas con velocidad superior a los 1.91 m/s se encuentran confinadas a la parte central del puerto de la buza con dos cámaras con piscina (“B2c Cp”) y por su parte, a la B2c Sp en la parte inferior de los puertos (ver números “1 y 2”). En lo que respecta a la buza con piscina, se observan dos zonas de baja velocidad muy próximas a la zona inferior de los puertos y, por otro lado, la buza sin piscina presenta velocidades de hasta 1.15 m/s en dicho lugar.

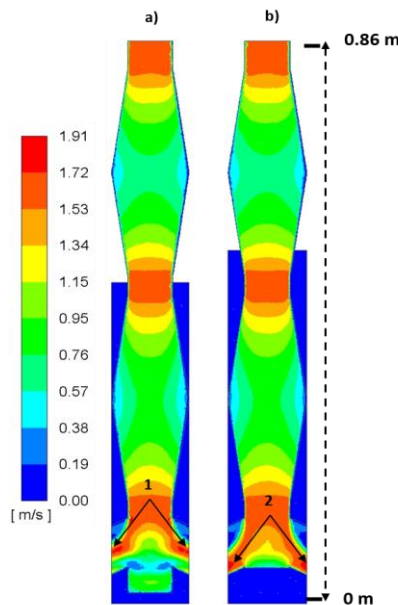


Fig. 4.23. Contornos de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 2 Cámaras Cp, b) Buza 2 Cámaras Sp.

Por su parte, la Fig. 4.24 presenta los campos vectoriales en el plano $Z=0$ para la buza dos cámaras con y sin piscina. Como en el caso de la buza con tres cámaras, se aprecia que el comportamiento del fluido es prácticamente el mismo, salvo en los puertos. Cuando entra el fluido a la buza, avanza con dirección completamente vertical y justo después de entrar a la primera cámara (en la zona divergente), el fluido tiende a expandirse a través de esta, disminuyendo así su velocidad para posteriormente llegar a la zona convergente de la primera cámara y compactarse (aumentando su velocidad). Dicho fenómeno se repite en la segunda cámara hasta llegar a los puertos de salida. Sin embargo, al ser las cámaras de una mayor longitud se promueve un mayor descenso en la velocidad al llegar a la salida de la buza. Con respecto al comportamiento del fluido en la parte baja de la buza, para la buza B2c Cp (Fig. 4.24c) se puede observar que existen dos grandes recirculaciones de flujo (ver “1 y 2”), estas,

tiende a levantar ligeramente los chorros que salen de la buza y también provocan un cambio de inclinación del chorro. Dichas recirculaciones no se presentan en la buza sin piscina, en esta, el flujo impacta la zona baja a una velocidad de 1 m/s, por lo que muy posiblemente se llegara a desgastar esta zona por erosión, dando consecuentemente un tiempo de vida muy corto en comparación con la buza con piscina. Finalmente, también se puede ver de forma bastante clara que las zonas de baja velocidad en la parte superior de los puertos son bastante más grandes para la buza sin piscina.

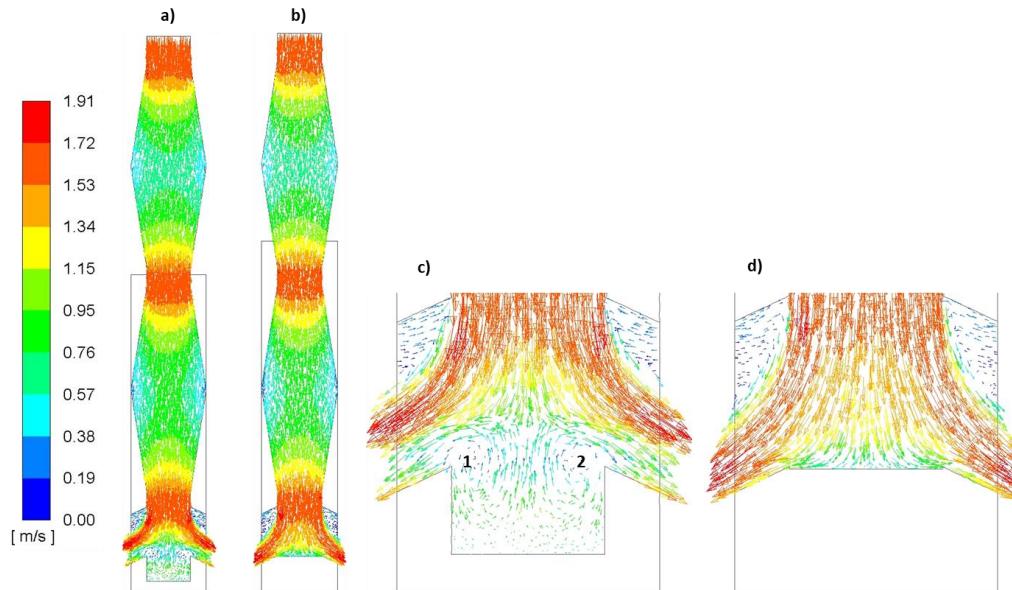


Fig. 4.24. Vectores de Velocidad en el Plano $Z=0$ obtenidos mediante simulación matemática, a) Buza 2 Cámaras Cp, b) Buza 2 Cámaras Sp, c) Acercamiento a la parte de los puertos B2c Cp, d) Acercamiento a la parte de los puertos B2c Sp.

Como se ha venido realizando en imágenes anteriores, se dibujaron líneas sobre las cuales se trazaron ciertas gráficas. En la Fig. 4.25 se muestran las gráficas de velocidad trazadas sobre el eje $X=0$ para las buzas con dos cámaras. Como se puede observar en dicha figura, las velocidades en el eje de simetría para ambas buzas son prácticamente las mismas y alcanzan un valor máximo de 1.63 m/s. Por otro lado, en la primera cámara se observa un descenso en la velocidad cercano a 0.72 m/s (en la parte divergente) mientras que cuando entra a la zona convergente la velocidad nuevamente aumenta hasta el valor de inicio. Cuando el flujo entra a la segunda cámara, en la zona divergente la velocidad del fluido desciende hasta el valor de 0.8 m/s y en la zona convergente el fluido vuelve a su velocidad inicial (1.62 m/s) no acelerándose más!

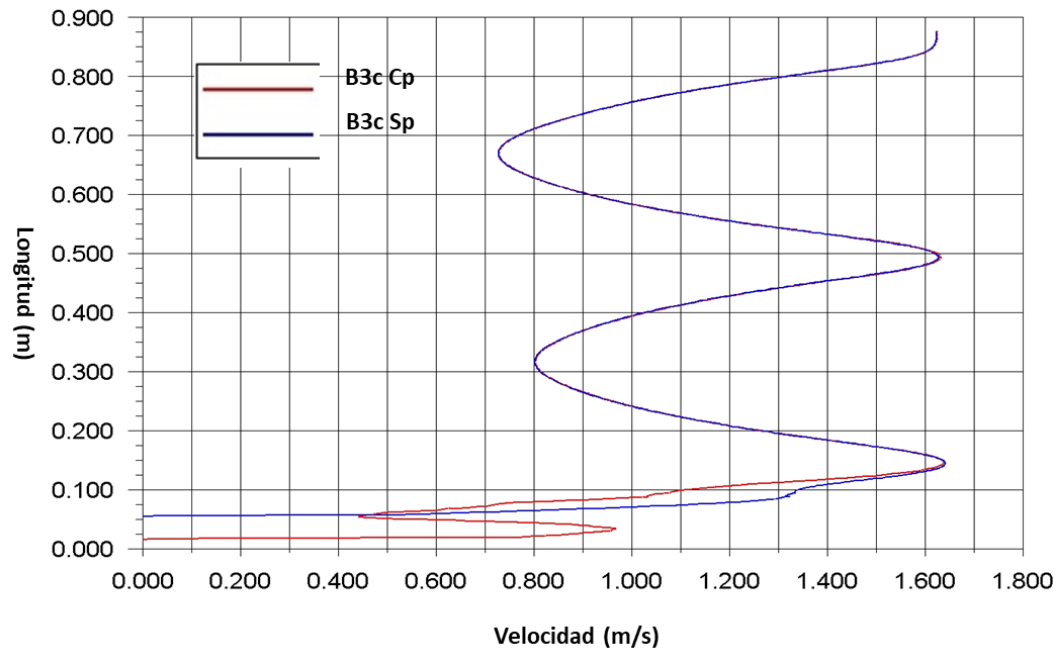


Fig. 4.25. Perfil de velocidad en la línea de simetría longitudinal ($X=0$) en la Buza de dos cámaras.

Las gráficas obtenidas en los ejes $x=\pm 0.07$ se presentan en la Fig. 4.26. En el caso del puerto derecho (Fig. 4.26a) se puede apreciar de forma clara que la buza sin piscina tiende a generar mayores velocidades que la buza con piscina, de 1.8 m/s a 1.72 m/s respectivamente. Al igual que la buza B3c Cp, la buza B2c Cp presenta dos máximos de velocidad en los puertos, el segundo de estos alcanza velocidades de 1.35 m/s. Por otro lado, en el puerto izquierdo se aprecia un comportamiento del fluido bastante similar al puerto derecho, el flujo es bastante simétrico con esta buza de dos cámaras. En lo que se refiere al retro flujo observado en la parte superior de los puertos de descarga, tanto el izquierdo como el derecho, la buza sin piscina tiene mayores descensos en la velocidad (desde 0.3 a 0.1 m/s) e incluso, dicho retro flujo ocupa una mayor longitud.

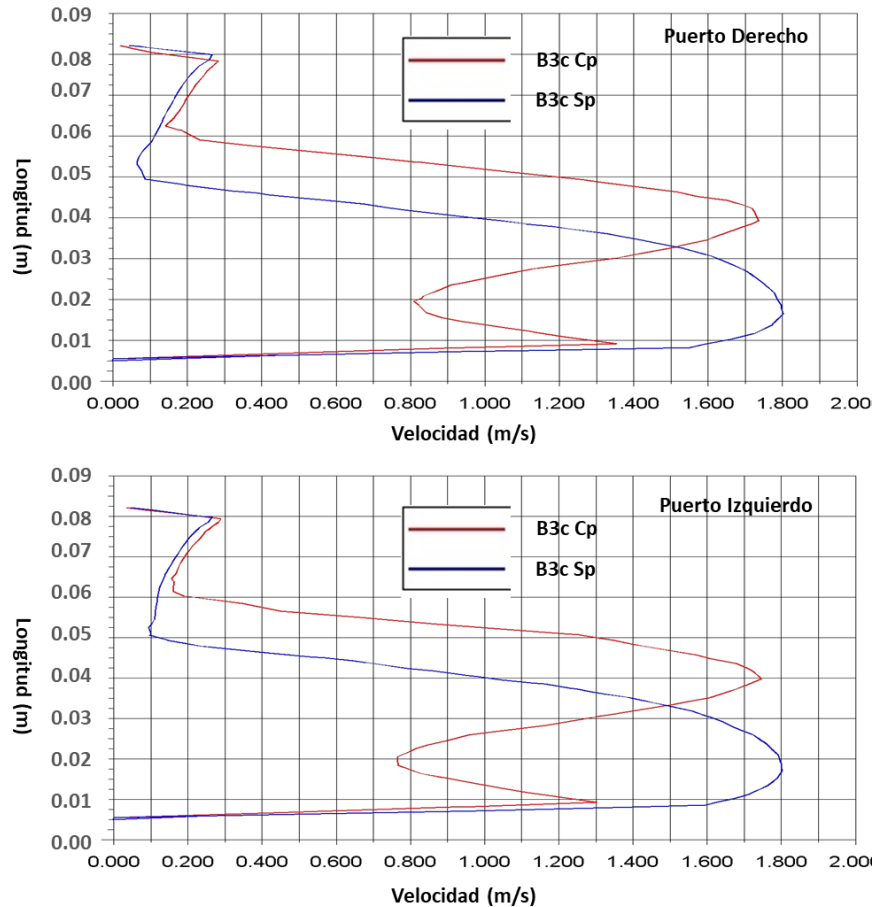


Fig. 4.26. Perfil de velocidad a la salida de los puertos de descarga ($X=\pm 0.07$) en la Buza B2c Cp y Sp

La Tabla 4.4 muestra las máximas velocidades y velocidades promedio obtenidas de los puertos de descarga para la buza de dos cámaras con y sin piscina. Al igual que en el caso de la buza con tres cámaras se observa que la buza B2c Sp tiende a generar mucho menores velocidades máximas en los puertos en comparación con la buza con piscina de dos cámaras (1.829 m/s contra 1.90 m/s), sin embargo al observar la velocidad promedio en el puerto, esta se reduce considerablemente y solo se observa un descenso de 0.01 m/s para el caso sin piscina, pero tal como se vio en las imágenes mostradas anteriormente, este descenso se realiza a costa de un mayor retro flujo, lo cual es un fenómeno que se debe evitar en la medida de lo posible.

Tabla 4.4. Velocidades máximas y promedio en los puertos de la buza.

Velocidades Máximas		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
B2c Cp	1.9003636	1.8990563
B2c Sp	1.8296597	1.8299361
Velocidades Promedio		
	Puerto Izquierdo	Puerto Derecho
B2c Cp	0.99394772	0.98231745
B2c Sp	0.9762604	0.96268645

4.3.3 Comparación entre la Buza convencional y las Buzas Disipativas.

De los párrafos anteriores se mostró que la buza con piscina representa una mejor opción para los fines de esta investigación, entonces de aquí en adelante se presentaran solo los resultados con dicha buza y sus posibles variaciones. La Fig. 4.27 muestra los contornos de velocidad, los vectores de velocidad y el acercamiento realizado con anterioridad a los puertos de descarga. En esta figura se puede notar de forma clara como la buza con tres cámaras y la buza con dos cámaras tienden a generar menores velocidades en los puertos de descarga en comparación con la buza convencional, además, se ve como el flujo en la piscina afecta bastante a los chorros. Por ejemplo, se ve que los vectores que salen de la buza para la buza B2c están más grandes que los de la buza B3c y también, el flujo que asciende desde la piscina (ver “1”) es más intenso en la B2c que la B3c, provocando que dicho chorro se tienda a levantar más, desaprovechando así el ángulo de salida del puerto de descarga.

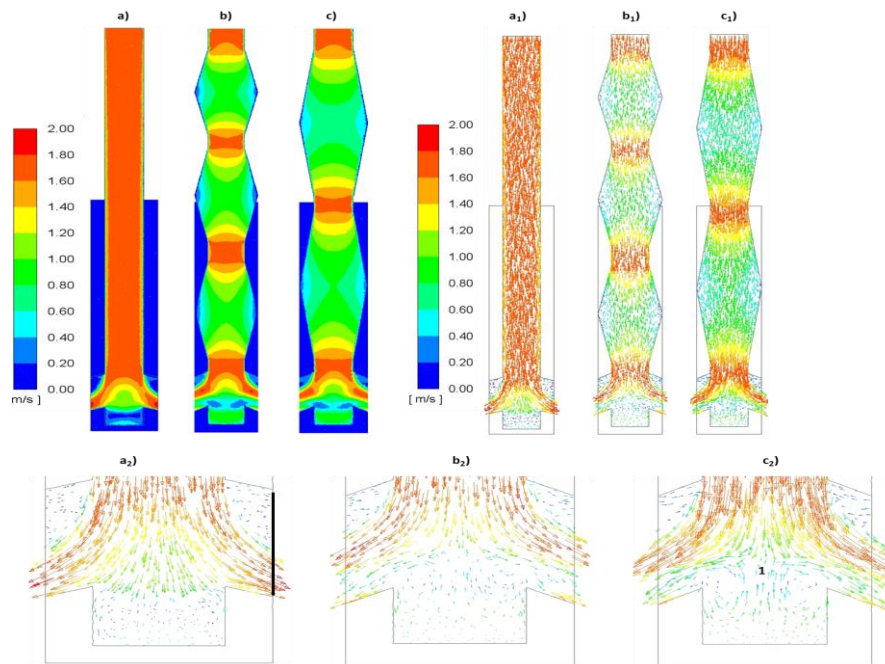


Fig. 4.27. Comparación de la buza convencional vs la buza con tres cámaras y buza dos cámaras.

La Fig. 4.28 muestra las gráficas de velocidad en una sola figura evaluadas sobre los ejes $X=0$ y el eje $X=0.07$. Se observa en la Fig. 4.28 (correspondiente al eje $X=0$) que tanto como la B3c y la B2c no alcanzan jamás la velocidad que tiene la Bc a lo largo de toda su longitud. También, se aprecia que, al momento de llegar a los puertos de descarga, el fluido de las buzas de dos y tres cámaras prácticamente tienen la misma velocidad, por lo tanto, se pudiera elegir una u otra buza en función a la velocidad, pero falta evaluar que tan turbulento es el flujo en cada buza, esto se realizara en los siguientes párrafos. Por otro lado, la Fig. 4.28b se ve que la B2c es la que presenta la velocidad más baja en el puerto derecho, por su parte, la Bc convencional es la que presenta los mayores valores, donde si difiere bastante este comportamiento es la parte de la piscina. En esta, la buza de tres cámaras tiene un mayor descenso de velocidad y esta se recupera hasta coincidir con la velocidad de la buza de dos cámaras en la parte baja del puerto.

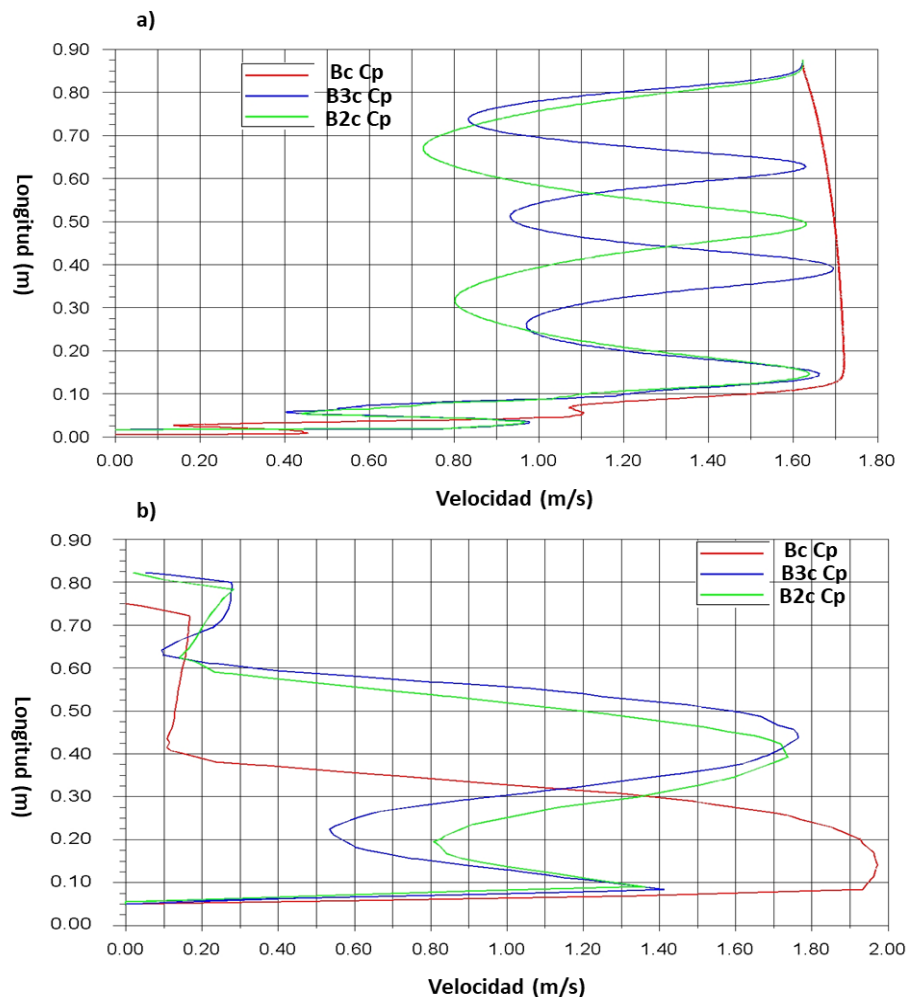


Fig. 4.28. Comparación de las gráficas en los ejes $X=0$ y $X=0.07$ para la buza convencional vs la buza con tres cámaras y buza dos cámaras.

En relación a la turbulencia que generan tanto la buza de dos y tres cámaras se abordará desde el punto de vista de los esfuerzos de Reynolds, estos están representados por la siguiente formula:

$$\tau_{ij} = \rho \overline{v_i v_j} \quad 4.2)$$

Y en forma matricial, el tensor de Reynolds es:

$$\tau'_{ij} = - \begin{matrix} \overline{u_x u_x} & \overline{u_x u_y} & \overline{u_x u_z} \\ \overline{u_y u_x} & \overline{u_y u_y} & \overline{u_y u_z} \\ \overline{u_z u_x} & \overline{u_z u_y} & \overline{u_z u_z} \end{matrix} \quad 4.3)$$

Donde los esfuerzos de la diagonal principal ($\tau_x = \overline{u_x u_x}$, $\tau_y = \overline{u_y u_y}$, $\tau_z = \overline{u_z u_z}$) se conocen como esfuerzos normales y los restantes ($\tau_{xy} = \overline{u_x u_y}$, $\tau_{xz} = \overline{u_x u_z}$, $\tau_{yz} = \overline{u_y u_z}$) son los esfuerzos cortantes. Los esfuerzos normales están relacionados con la energía cinética turbulenta del fluido y se define con la siguiente formula:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad 4.4)$$

Se puede deducir de la ecuación 4.4 que si la velocidad del fluido se concentra en una sola dirección la energía cinética turbulenta se incrementa, entonces, si se distribuye entre todo el tensor y principalmente en los esfuerzos cortantes, se lograra disipar dicha energía [10]. En base a esta hipótesis se presenta el siguiente análisis. La Fig. 4.29 muestra los esfuerzos de Reynolds en el plano Z=0 para las tres buzas. En la Fig. 4.29a se observa que el esfuerzo normal τ_y se mantiene relativamente constante a la largo de la longitud de la buza y aumenta en la parte final de esta, en la zona de la piscina, también se aprecia, que los esfuerzos cortantes τ_{xy} y τ_{yz} se mantienen prácticamente constantes a lo largo de toda la longitud. Por su parte, para la buza de tres cámaras, el esfuerzo normal τ_y tiende a incrementarse al entrar a la primera cámara, en la zona divergente, después se mantiene relativamente constante hasta que entra a la tercera cámara, donde igualmente se vuelve a incrementar en la zona divergente, para finalmente, volverse más grande en la zona de la piscina. Por su parte, el esfuerzo cortante τ_{xy} se mantiene relativamente constante, salvo en las zonas divergentes de las tres cámaras, en estas zonas el valor se incrementa ligeramente en relación a la buza convencional y como se observa el esfuerzo cortante τ_{yz} tiende a mantenerse prácticamente constante a lo largo de toda la buza. Para el caso de la buza de dos cámaras se aprecia un comportamiento similar a la buza de tres cámaras, con la diferencia de que el esfuerzo normal τ_y y el esfuerzo cortante τ_{xy} se están incrementando ligeramente menos en las zonas divergentes de las cámaras. De estas figuras se deduce que las velocidades para las buzas de dos y tres cámaras

ya no están concentradas en una sola dirección, ahora dicha velocidad se reparte entre las direcciones “x” y “z” en las cámaras, provocando que el fluido al finalizar su recorrido por el interior de la buza salga con una menor velocidad en la zona de los puertos de descarga, es decir disipa parte de su energía cinética turbulenta.

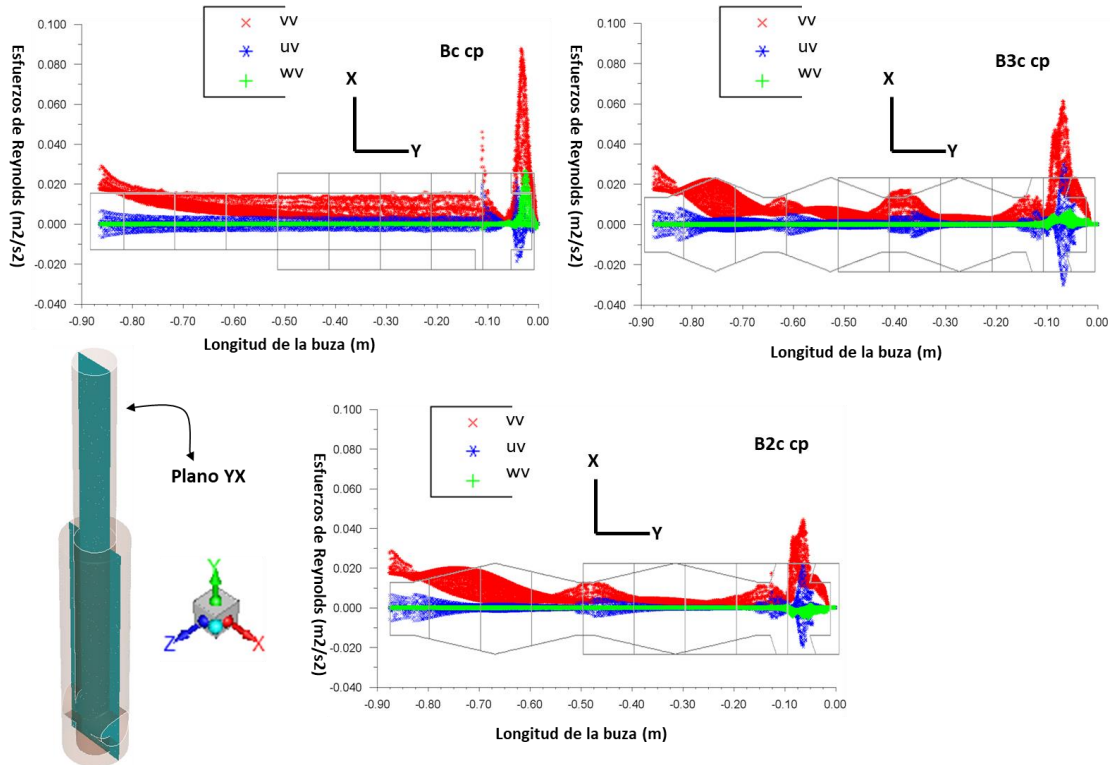


Fig. 4.29. Esfuerzos de Reynolds en el plano Z=0 obtenidos mediante simulación matemática para las buzas analizadas. a) Buzas Convencional Cp, b) Buzas 3 cámaras Cp, c) Buzas 2 cámaras Cp

Del análisis de la turbulencia se puede esperar que el fluido en el interior de las buzas este girando, debido a que los esfuerzos cortantes tomaron relevancia en comparación con la buza convencional. La Fig. 4.30 muestra la tasa de deformación en el plano Z=0. Se puede ver que en el caso de la buza convencional la tasa de deformación se mantiene constante a lo largo de toda la longitud de la buza mientras que para la buza de tres cámaras se observa que cuando el fluido entra en la parte divergente, la tasa de deformación desciende abruptamente mientras que en la parte convergente la tasa de deformación se incrementa notablemente, provocando que el fluido interactúe, es decir, se mezcle, este comportamiento se repite en cada una de las cámaras y justo en la cámara dos alcanza su máximo valor. Por otro lado, en la buza B2c se aprecia un comportamiento similar a la buza con tres cámaras, sin embargo, debido a que esta buza solo tiene dos cámaras y aparte su longitud de incrementa al acercarse a los puertos se puede ver que la tasa de deformación jamás

alcanza los valores de la B3c, por lo que el mezclado de esta es menor aun cuando presentó un menor descenso en la velocidad como se mostró en las tablas anteriores.

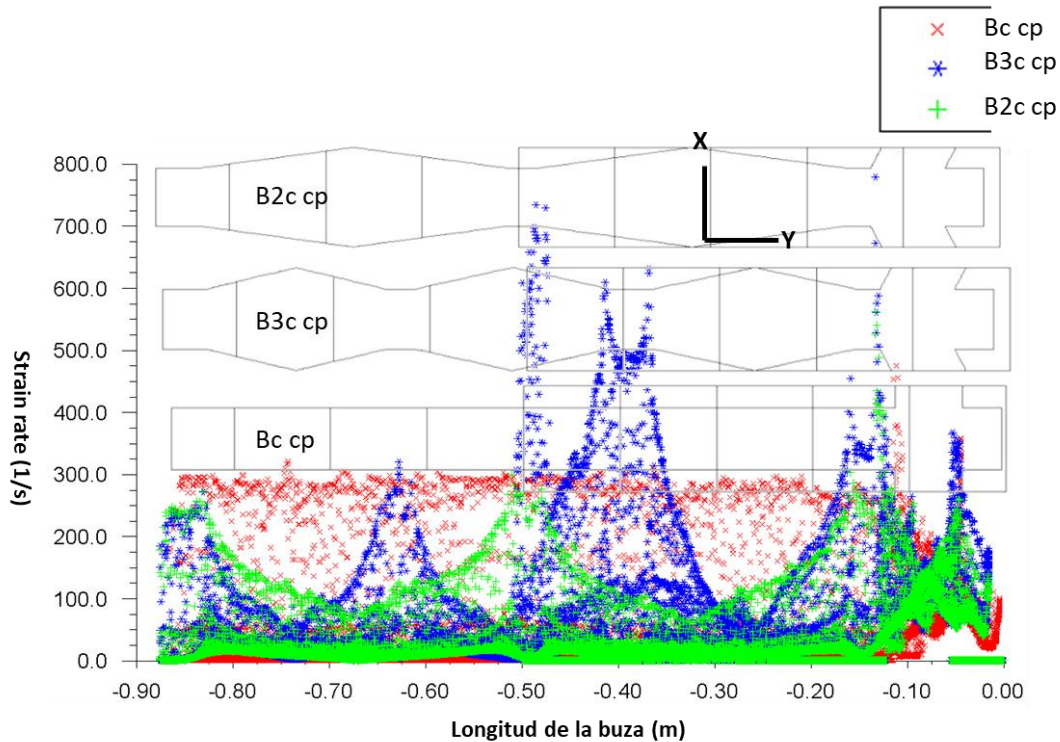


Fig. 4.30. Tasa de deformación en el plano $z=0$ para las buzas analizadas. a) Buzza Convencional Cp, b) Buzza 3 cámaras Cp, c) Buzza 2 cámaras Cp

Por otro lado, es conocido que la velocidad de colada en el molde tiende a cambiarse durante el proceso de colada continua sin previo aviso, por lo cual resulta conveniente analizar estas buzas a diferentes velocidades de colada para verificar que efectivamente siga disipando su energía en relación a la buza convencional. Se eligieron velocidades de colada por encima y debajo de la actual. Estas velocidades fueron 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 y 2.1 m/s, las cuales representan la mayoría de los estudios realizados en el molde convencional. En la Fig. 4.31 se muestran los resultados obtenidos, en dicha gráfica, se observa como al aumentar la velocidad de colada, la máxima velocidad en los puertos aumenta también, sin embargo, para la buza de tres cámaras, al ir aumentando la velocidad de colada, la máxima velocidad en los puertos tiende a ser menor que la buza convencional e incluso que la buza de dos cámaras, la cual a la velocidad de colada de análisis (1 m/min) presentó una ligera menor velocidad máxima en los puertos de descarga tal como mostro en el análisis anterior.

Al observar esta tendencia y aparte, tal como se mostró en imágenes anteriores, la buza con tres cámaras representa la mejor opción para construirse y hacer la experimentación física, lo cual se abordará en la siguiente sección.

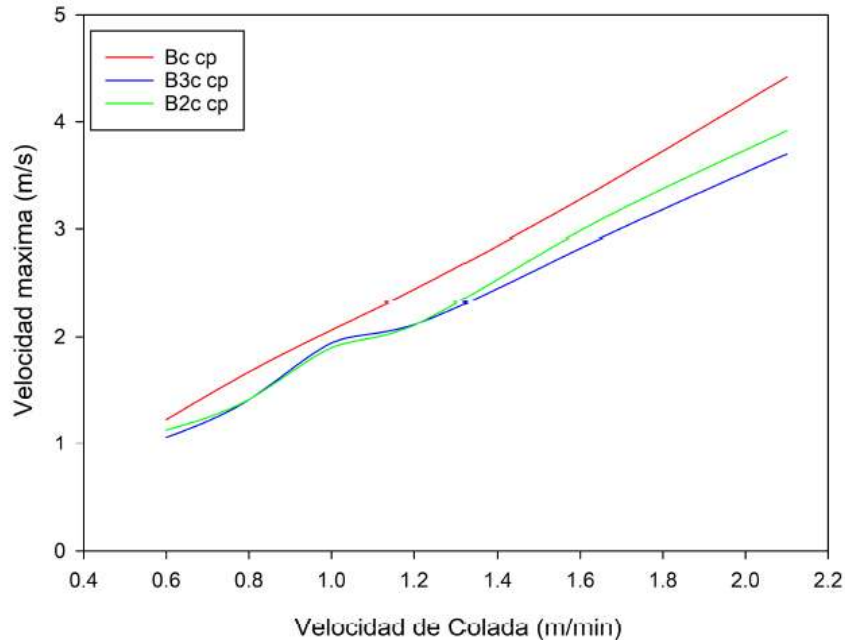


Fig. 4.31. Efecto del aumento de la velocidad de colada en las buzas.

4.4 Caracterización de la Fluido dinámica en el Molde utilizando la Buza de tres cámaras

4.4.1 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal para la Buza B3c Cp

La Fig. 4.32 muestra la difusión del trazador vegetal en el interior del molde para el caso de la buza de tres cámaras (izquierda) y a su vez se compara contra el caso base. A un tiempo de 0 s el colorante en ambos casos apenas comienza a llegar a los puertos de descarga. Una vez transcurridos 0.375 s (Fig. 4.32b) el colorante ha salido de los puertos y comienza a avanzar dentro del molde, se ve que en el caso de la buza B3c Cp se observa que los chorros son más simétricos, debido a que los chorros de la buza convencional tienden a cargarse hacia la izquierda. Por su parte, la Fig. 4.32c corresponde al tiempo de 1.54 s desde el inicio de la difusión del colorante y se observa que ambos chorros han llegado a impactar las paredes angostas, sin embargo, el chorro derecho de la buza B3c Cp cambio de dirección justo antes de impactar, mientras que la buza Bc Cp siguió generando chorros más asimétricos e inclinados, incluso se observan más dispersos que los de la buza B3c Cp, teniendo obvias consecuencias en el patrón de flujo y el punto de impacto de estos, así como también en el posible desgaste de la costra recién solidificada de acero. Los ángulos promedio de los chorros fueron los siguientes, para la buza de tres cámaras (izquierda) fueron de 22° y 20°, mientras que para la buza convencional resultaron de 21° y 18.5°

respectivamente para el lado izquierdo y derecho. En la Fig. 4.32d correspondiente al tiempo de 4 s se puede notar que el colorante siguió la tendencia de un flujo de doble rollo con cuatro grandes recirculaciones, en la zona superior del molde el colorante ya cubrió por completo dichas zonas con ambas buzas, mientras que en la zona ubicada por debajo de los chorros, aún falta por colorearse bastante área y se aprecia que es aproximadamente la misma para las dos buzas, sin embargo, para la buza convencional dicha área no es simétrica mientras que para la buza de tres cámaras si lo es, por lo que se puede deducir que el flujo que produce la buza de tres cámaras tendería a ser más simétrico y uniforme que la buza convencional. A un tiempo de 9 s desde la inyección del colorante (Fig. 4.32e) el colorante ya cubrió prácticamente casi toda el área del molde salvo una pequeña zona ubicada por debajo de la solera en el caso de la buza de tres cámaras (ver "1") y para la buza convencional esta área es mucho más grande (ver "2"). Finalmente, a un tiempo de 13.5 el colorante se ha dispersado en todo el molde y no se distingue nada más.

En comparación con el flujo de colorante observado para la buza convencional a primera instancia se vio que los chorros que salen de la buza de tres cámaras salen con una mayor inclinación y esta tiende a mantenerse más a lo largo del molde, debido a que se observa una mayor coloración del colorante al avanzar en el molde, además, las zonas de baja velocidad son relativamente similares en la zona superior del molde y difieren bastante en la parte inferior, esto puede ayudar a evitar el posible desgaste del material refractario de la parte baja de la buza para el caso de la buza de tres cámaras.

4.4.2 Campo de vectores de velocidad obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula para la Buza B3c Cp

Para obtener los campos de velocidad se siguió exactamente la misma metodología antes descrita, sin embargo, debido a que la geometría de la buza tenía cámaras con formas rómbicas, éstas tendían a dispersar la luz del láser cuando incidía en ellas, provocando que el campo vectorial en toda el área del molde se viera afectada y como era de esperarse, las áreas más afectadas resultaron ser las que se encontraron en la parte izquierda del molde (la zona más alejada del láser), para compensar esto, se presentara además del campo vectorial una imagen de las líneas de corriente, así se puede tener una mejor perspectiva del flujo en todo el molde.

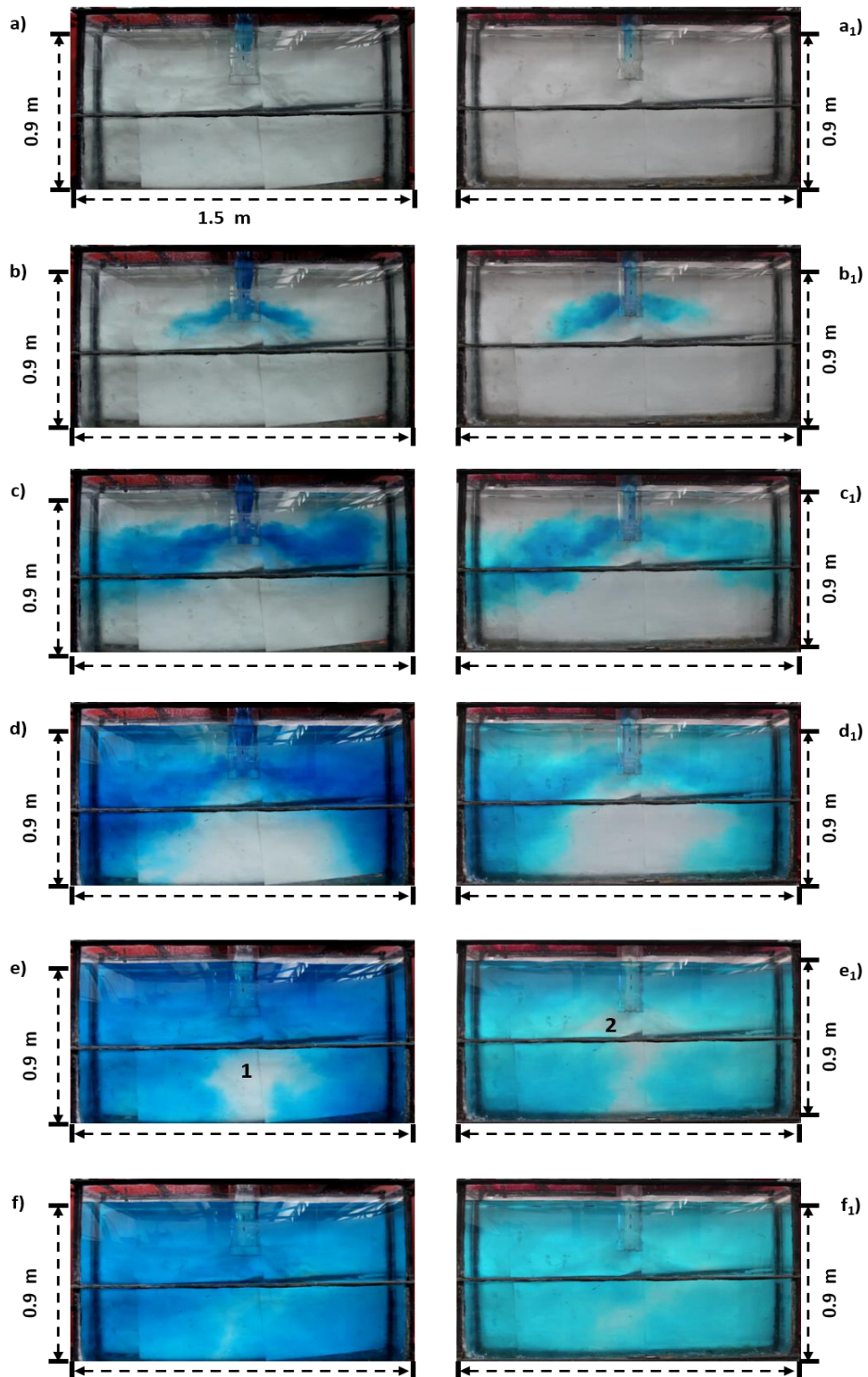


Fig. 4.32. Comparación de la Cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza B3c Cp y la buza convencional Bc Cp. a) -- f) para la B3c Cp y a₁) -- f₁) para la Bc Cp a diferentes tiempos: a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s.

La Fig. 4.33a muestra la comparación del campo de velocidad en el plano $Z=0$ para la buza B3c Cp y la buza convencional Bc Cp. En ambas buzas se aprecia en general un campo fluido dinámico de cuatro grandes recirculaciones, sin embargo, existen bastantes diferencias (ver Fig. 4.33 b y b₁). En la zona superior del molde, la buza de tres cámaras (izquierda) presenta un flujo más simétrico, con recirculaciones del mismo tamaño, mientras que para la buza convencional dichas recirculaciones son diferentes, la derecha es más grande y está dividida en dos partes y además la izquierda se encuentra muy cercana a las paredes de la buza. En la parte inferior del molde el comportamiento del fluido se invirtió, es decir, la buza de tres cámaras produjo más asimetría en el campo de flujo que la buza convencional.

En lo que respecta a las velocidades al interior del molde (ver Fig. 4.33 a y a₁) se ve que, en el puerto derecho, en general presenta mayores velocidades y la buza convencional tiene una mayor área en rojo y amarillo que la buza de tres cámaras. También se aprecia que la buza de tres cámaras tiene una mayor estratificación en las velocidades en las inmediaciones de la superficie libre y las zonas de baja velocidad son mucho menores que en la buza convencional. Por otro lado, en lo que respecta a los chorros de descarga se muestra que los chorros que genera la buza de tres cámaras son más uniformes y simétricos, mientras que los de la buza convencional tienden a impactar más profundo en el molde (ver "1"). En lo que se alcanza a apreciar, el flujo por debajo de la buza impacta más inclinado para la B3c Cp (ver "2") mientras que la Bc Cp tiende a ser más simétrico (ver "3"), tal como se dijo en el párrafo anterior. En la zona inferior del molde los vectores de velocidad casi no se distinguen debido al fenómeno inevitable que sucedió al cambiar la geometría de la buza, pero se puede observar a grandes rasgos que las recirculaciones inferiores no son simétricas para la buza de tres cámaras, la izquierda es más grande que la derecha y esta última, tiende a alimentar al chorro derecho haciéndolo más grueso.

Con la finalidad de obtener una mejor visión del campo fluido dinámico en el molde con la B3c Cp se decidió realizar la misma toma que la Fig. 4.3 y los resultados se muestran a continuación.

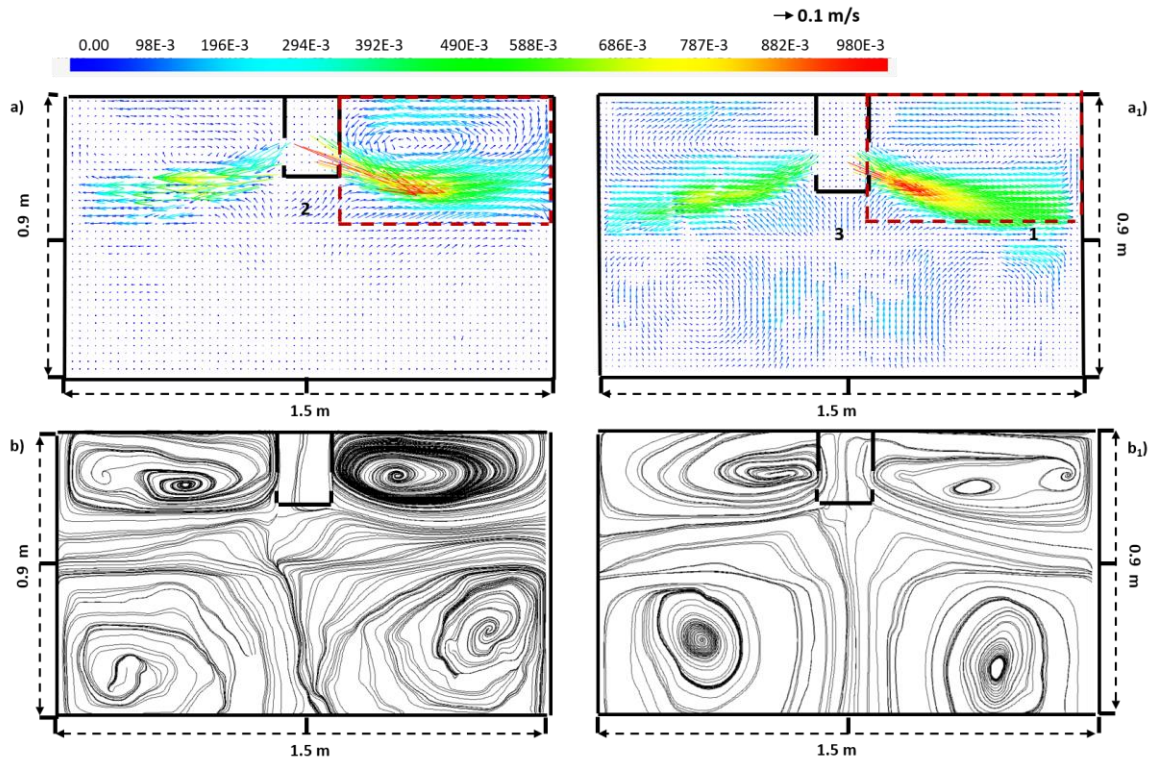


Fig. 4.33. Comparación del campo de vectores de velocidad y líneas de corriente para la Buza B3 Cp y la Buza convencional obtenidos mediante PIV. a) y b) Buza B3c Cp, a1) y b1) Buza Bc Cp.

En el acercamiento al campo de flujo del cuadrante I, se puede distinguir con mejor calidad el campo vectorial, en este se observa que el chorro que sale de la buza B3c Cp tiende a expandirse más rápidamente (hay una mayor parte roja y amarilla) y conforme avanza hacia la pared derecha se expande de forma constante el chorro y avanza muy recto, caso contrario, la buza convencional (Bc Cp), el chorro sale más inclinado y el área en rojo es menor, sin embargo, el área en amarillo es mayor y conforme avanza hacia la pared va perdiendo su inclinación y justo al llegar a esta (ver "1") tiende a cambiar de dirección hacia la superficie libre. Por otro lado, se puede notar que la recirculación de flujo de la buza de tres cámaras tiende a transportar más vectores hacia el chorro (ver "2") mientras que el efecto que produce la buza convencional es llevar a los vectores hacia la pared de la buza, teniendo como principal efecto, un aumento en la velocidad en la superficie libre (ver "4") caso que no ocurrió con la buza de tres cámaras, la cual muestra más bajas velocidades en la mayoría de la superficie del molde. Por otro lado, en la zona ubicada por debajo del chorro se observa una gran diferencia, primero para la buza de tres cámaras, la dirección de los vectores no es completamente vertical, sino que tienden a estar ligeramente inclinados hacia la derecha y probablemente estén recirculando (ver "6")

a diferencia de los vectores que se presentaron para la buza convencional, los cuales tienen una dirección completamente vertical y poseen mayor velocidad (ver “7”).

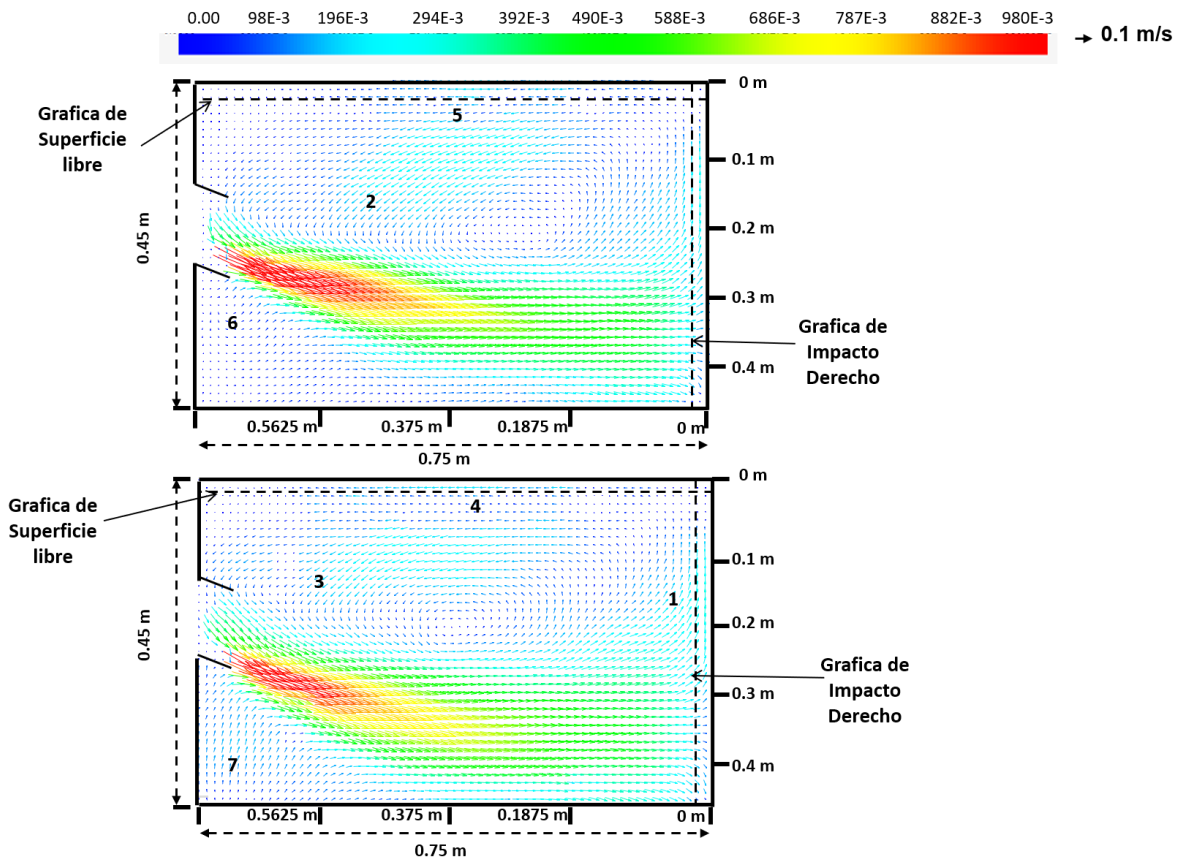


Fig. 4.34. Comparación del campo de vectores de velocidad obtenidos mediante PIV en la zona por encima del chorro derecho para la Buza B3c Cp (a) y la buza Bc Cp (b).

La Fig. 4.35 muestra la comparación de las gráficas de velocidad sobre la pared derecha obtenidas de los campos de velocidad 4.34 y 4.3. Esta gráfica se obtuvo a una distancia de 5 cm de la pared angosta derecha. El punto de impacto del chorro que produjo la buza de tres cámaras alcanzó una profundidad de impacto de aproximadamente -270 a -300 mm y una velocidad promedio que ronda los valores de 0.12 a 0.15 m/s, por su parte, la buza convencional alcanzó un punto de impacto de alrededor de -300 mm con una velocidad promedio de 0.10 a 0.14 m/s. Como pudo notarse dichos puntos de impacto se encuentran bastante cercanos en relación uno con el otro, pero la buza Bc Cp tiene un punto ligeramente mayor y con menores velocidades, por lo que su efecto en el desgaste de la costra recién solidificada se espera sea ligeramente menor. Sin embargo, también puede notarse el fenómeno descrito en la imagen anterior, es decir, que las velocidades ascendentes hacia la superficie libre difieren bastante. Por ejemplo, la buza B3c Cp tiene una velocidad máxima ascendente de 0.25 m/s mientras que la convencional alcanzó a llegar hasta

los 0.30 m/s, fenómeno que se vio reflejado en un flujo más energético en la superficie libre. Otro detalle a resaltar, es que el flujo ascendente pegado a la pared derecha en la buza convencional al acercarse a la superficie libre tiende a caer abruptamente en su velocidad, mientras que la buza de tres cámaras se mantiene siempre por encima de esta, afectando así en el tamaño y localización de las zonas de baja velocidad presentes generalmente en las esquinas del molde. Por lo que se podría decir que dichas zonas de baja velocidad, son más pequeñas que las que produce la buza convencional (ver también Fig. 4.34)

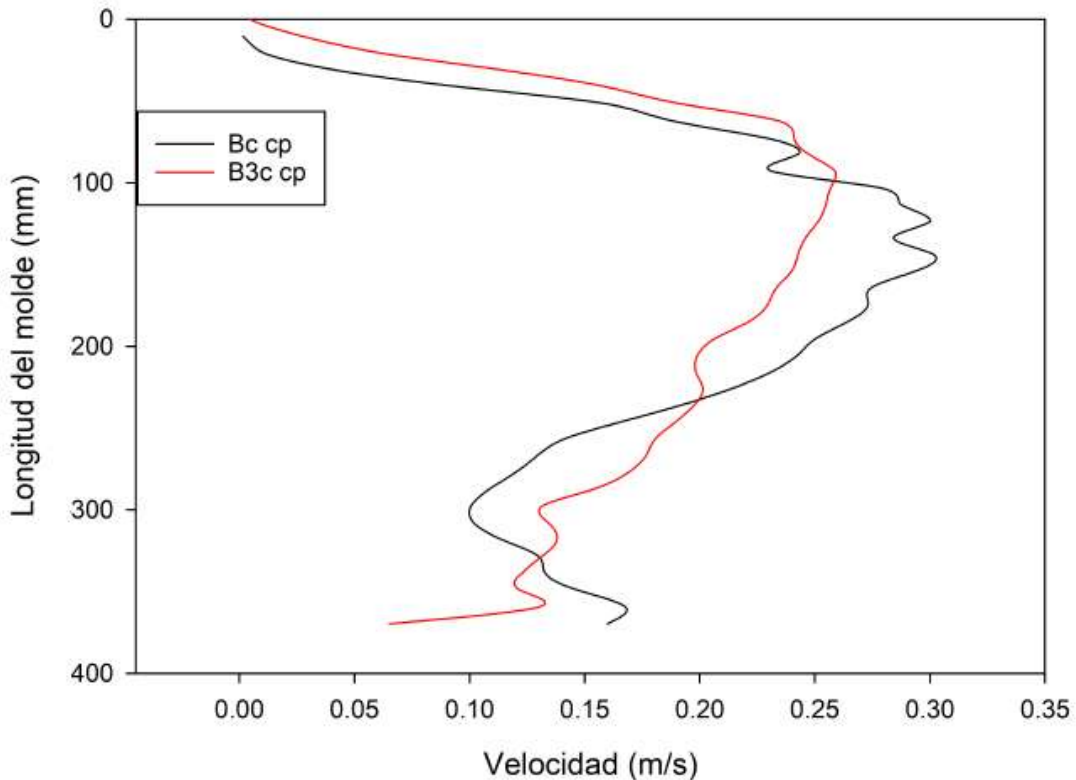


Fig. 4.35. Comparación de las gráficas de velocidad a 5 cm de la pared derecha para la Buza B3c Cp y Bc Cp.

Por su parte, la Fig. 4.36 muestra la comparación de las gráficas de velocidad obtenidas a 1 cm por debajo de la superficie libre para los casos B3c Cp y Bc Cp. En dicha figura se observa que la máxima velocidad se localiza a 300 mm de la pared angosta derecha (Zona II) para ambas buzas y como puede verse, la buza convencional presenta una mayor velocidad que la buza de tres cámaras, esta última alcanza el valor de 0.18 m/s. En lo relativo a las demás zonas, se puede notar que en la Zona I y la Zona III, la buza B3c Cp tuvo la misma velocidad e incluso en unas partes mayor velocidad de flujo que la convencional, pero en las Zonas II y III (justo al centro del molde) la velocidad de flujo siempre fue siempre menor que la que produjo la buza

convencional y es de esperarse que en dicha zona del molde se llegue a presentar mayores variaciones del nivel en la superficie libre. Por otro lado, las zonas de baja velocidad advertidas en imágenes anteriores se pueden ver que alcanzan una longitud similar de aproximadamente 70 mm en la Zona I (pared angosta derecha) para ambas buzas y en la Zona IV la velocidad de ambas buzas es muy similar y aparte estas tienen una mayor longitud que las del lado derecho.

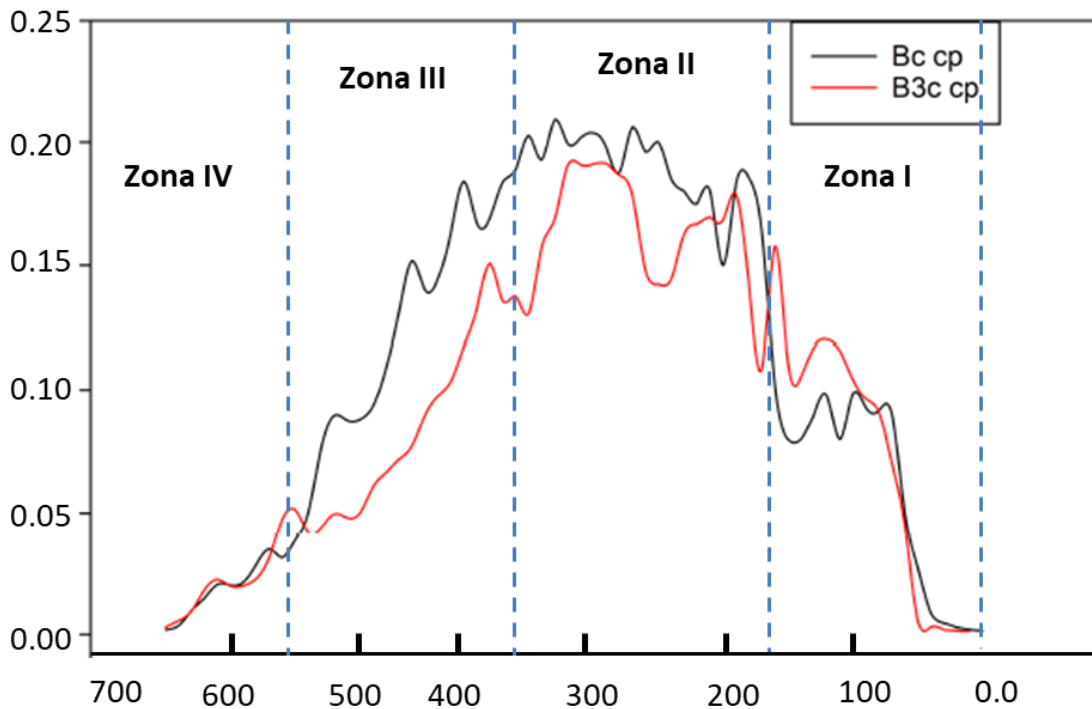


Fig. 4.36. Comparación de las gráficas de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp y la Buza Cp.

4.4.3 Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp

En la Fig. 4.37 se presentan las comparaciones de las oscilaciones de nivel en el lado derecho del molde para el caso de la Buza B3c Cp vs la Buza Bc Cp.

En la Fig. 4.37 a y a₁ se observa que en la Zona I el nivel en ambas buzas se encuentra por encima de la línea de referencia en las inmediaciones de la pared y luego baja rápidamente y se ubica sobre dicha línea. Se ve de forma clara que el nivel de la buza de tres cámaras se encuentra más arriba (casi +9 mm) que el de la buza convencional (+7 mm aproximadamente). En la Zona II el nivel se encuentra ligeramente por debajo de la línea de referencia (- 2 mm) en ambas buzas, sin embargo, para la Zona III se observa una gran diferencia, el flujo de la buza convencional tiende a oscilar más y en

la Zona IV el nivel vuelve a alcanzar el valor de referencia para ambas buzas. En otro instante de tiempo (Fig. 4.37 b y b₁) se ve que el nivel para la buza de tres cámaras en las Zonas I y II casi no oscila, tiende a mantenerse cercano a la línea de referencia, mientras que para la buza convencional en la Zona I, se alcanza un valor cercano a los +10 mm y en lo que respecta a la Zona IV también la buza convencional tiende a oscilar más (-9 mm) contra -4.5 mm para la buza B3c Cp. Para la Fig. 4.37 c y c₁ de nueva cuenta se ve que en la Zona II el nivel es muy similar en ambas buzas, sin embargo, en la Zona I la buza de tres cámaras alcanzo un valor de + 10 mm cercas de la pared mientras que la convencional se mantuvo en la línea de referencia. En la Zona III este comportamiento se invirtió, el flujo de la buza convencional está oscilando ligeramente más y de forma similar a otros instantes de tiempo en la Zona IV el nivel es muy similar para ambas buzas. Finalmente, en la Fig. 4.37 d y d₁ se aprecia que el nivel para la buza de tres cámaras se mantiene relativamente estable en la Zona I, luego baja hasta alcanzar el valor de -5 mm en la Zona II y sube progresivamente para mantenerse estable en las Zonas III y IV, por su parte, la buza convencional, en la Zona I el nivel se encuentra a +4 mm luego desciende hasta la línea de referencia en la Zona II y vuelve a bajar hasta los -10 mm en la Zona III para subir progresivamente hasta alcanzar el valor de referencia en la Zona IV.

En la Fig. 4.38 se presentan las cuatro comparaciones restantes de las oscilaciones de nivel en el lado derecho del molde para el caso de la Buza B3c Cp vs la Buza Bc Cp. En la Fig. 4.38a se ve que el nivel en la Zona I tiene un valor de + 6 mm por encima de la línea de referencia y tiende a bajar para que en la Zona II se alcance un valor de - 5 mm, en la Zona III se observa que el nivel se vuelve a ubicar por encima de la línea de referencia (+3 mm) y en la Zona IV se mantiene sobre la línea de nivel, por su parte, el nivel para la buza convencional se mantiene estable en la Zona I y en la II tiende a descender cercas de los -8 mm para finalmente alcanzar su valor cumbre de -11 mm en la Zona III y subir rápidamente a la línea de referencia en la Zona IV. En otro instante (ver Figs. 4.38b y b₁) en la Zona I el nivel de la buza de tres cámaras alcanza el valor de + 10 mm. Para la Zona II y III se aprecia una tendencia similar del nivel en la superficie libre, sin embargo, la buza convencional alcanza valores más grandes (-13 mm) contra los -10 mm de la buza de tres cámaras y de nueva cuenta en la Zona IV la oscilación del nivel es muy similar. Para la Fig. 4.38 c y c₁ el nivel de ambas buzas es muy similar salvo en la Zona I, la buza de tres cámaras tiende a subir el nivel en las inmediaciones de la pared angosta en un valor de +2 mm mientras que la convencional tiende a bajarlo casi hasta los -4 mm aproximadamente. El valor máximo de oscilación lo volvió a alcanzar la buza convencional en la Zona II (- 6 mm).

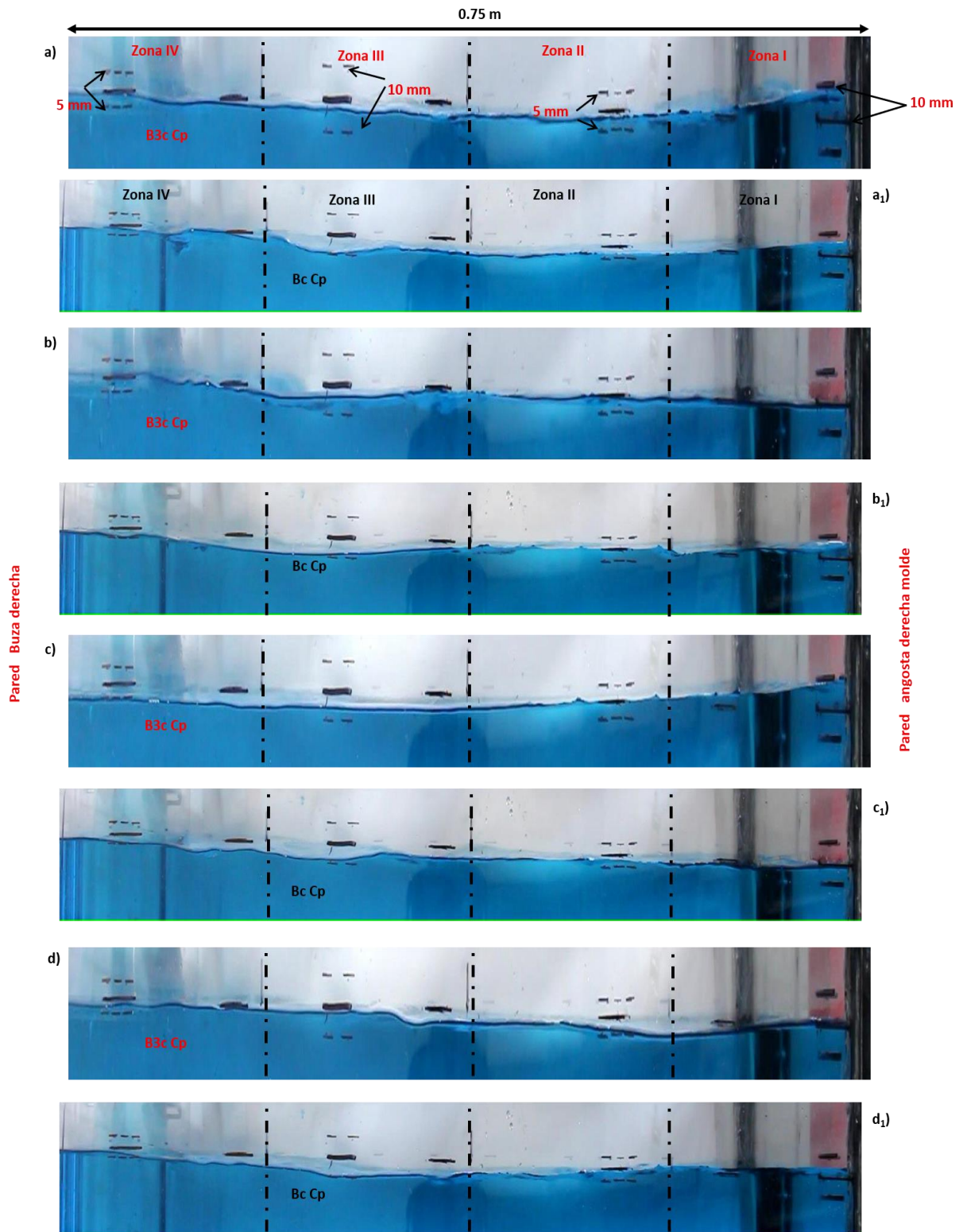


Fig. 4.37. Comparación de las oscilaciones de nivel en el lado derecho para la Buza B3c Cp y la Buza Bc Cp sobre la superficie libre.

Finalmente, la Fig. 4.38 d y d₁ muestra de nueva cuenta la irregularidad de las oscilaciones de nivel, para el caso de la buza de tres cámaras, en la Zona I se alcanzó un valor de + 5 mm en la pared angosta, después el nivel tiende a bajar y alcanza el valor de -3 en la Zona II y sigue bajando hasta alcanzar los -5 mm para después subir abruptamente hasta por encima de la línea de referencia y tomar un valor de +2 mm en la Zona III y mantenerse estable sobre la línea de referencia en la Zona IV, por su parte, la buza convencional alcanzo un valor de + 9 mm en la Zona I justo en la pared angosta, después comenzó a descender en forma gradual hasta alcanzar el valor de -7 mm en la Zona III y mantenerse a -5 mm en promedio en la Zona IV.

Se pudo notar en las 16 imágenes mostradas anteriormente (Fig. 4.37 y 4.38) que el nivel sobre la superficie libre tiende a ser completamente irregular y caótico y por lo general no se aprecia ninguna repetitividad en las formas de las ondas y valores de estas sobre el molde, sin embargo, también se pudo notar que la buza convencional por lo general tiende a oscilar en rangos más amplios que la buza de tres cámaras. Para la Zona I, la buza de tres cámaras produjo un flujo que por lo general oscila en valores positivos (+7 mm en promedio) por encima de la línea de referencia, mientras que la buza convencional también tiende a estar sobre la línea de referencia, pero usualmente desciende hasta alcanzar dicha línea (+4 mm en promedio). Por su parte, en la Zona II el nivel que presentaron ambas buzas fue muy similar, aunque ligeramente la buza convencional tiende a oscilar más, el mismo fenómeno se evidencio en la Zona III, en donde se aprecia de forma clara que la buza convencional produce un flujo con más oscilaciones de nivel en dicha zona. También se pudo notar que prácticamente el flujo en las cercanías de la buza es el mismo en ambos casos, por lo que se podría despreciar la influencia del diseño de la buza en esta zona del molde.

Al igual que el caso anterior, se contaron el número de vórtices que apareció durante el periodo de 3 minutos de grabación de video y los resultados se muestran a continuación. Se encontraron 27 vórtices para el caso de la buza de tres cámaras y 13 para la buza convencional (Fig. 4.7). En la Fig. 4.39 se muestran algunos de estos. La que corresponde al 4.39a, se aprecia que el vórtice se ubica en la Zona IV ligeramente alejado de la pared de la buza y el vórtice de flujo de la Bc Cp se ubica más cercano a las paredes de la buza. En la Fig. 4.39b y 4.39b₁ se observan dos vórtices (Zona III y Zona IV), siendo los de la B3c Cp lo más alejados de los costados de la buza. Para la Fig. 4.39c y 4.39c₁ se muestran dos vórtices de flujo para la buza convencional y solo uno para la B3c Cp. Finalmente, para la Fig. 4.39d y d₁ se volvieron a observar dos vorticidades de flujo nuevamente en la Zona IV.

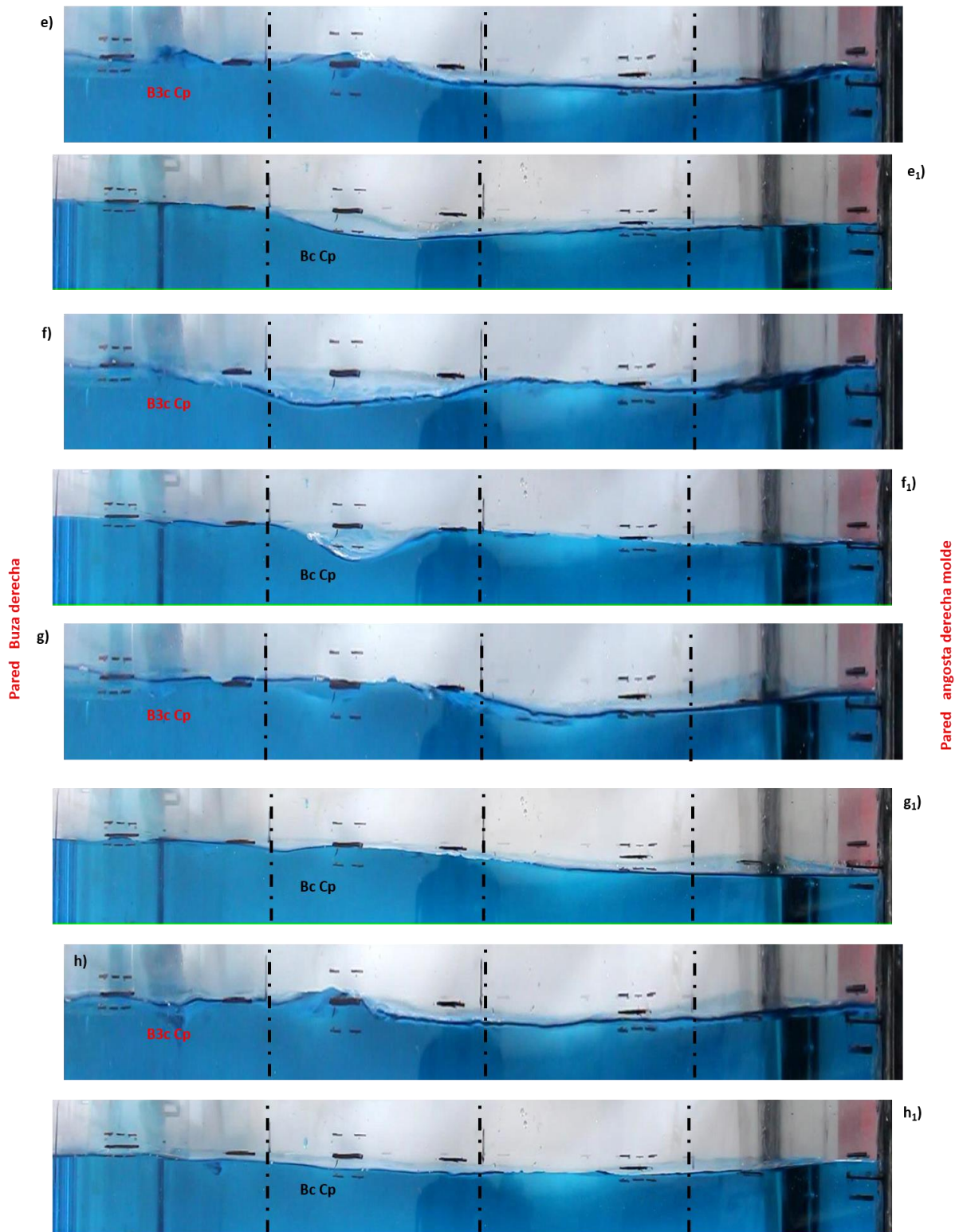


Fig. 4.38. Comparación de las oscilaciones de nivel en el lado derecho para la Buza B3c Cp y la Buza Bc Cp sobre la superficie libre.

De estas imágenes y de las estadísticas previamente analizadas (omitidas para no saturar de información) se pudo notar que la buza de tres cámaras tiende a generar un mayor número de vorticidades y algunas de estas incluso de mayor tamaño que las que llegó a producir la buza convencional, lo cual habla de las fuertes inestabilidades de flujo en periodos puntuales de tiempo, debido a que cuando se presentan estas vorticidades, el flujo en la superficie libre se perturba demasiado fenómeno que no se presentó en la buza convencional.

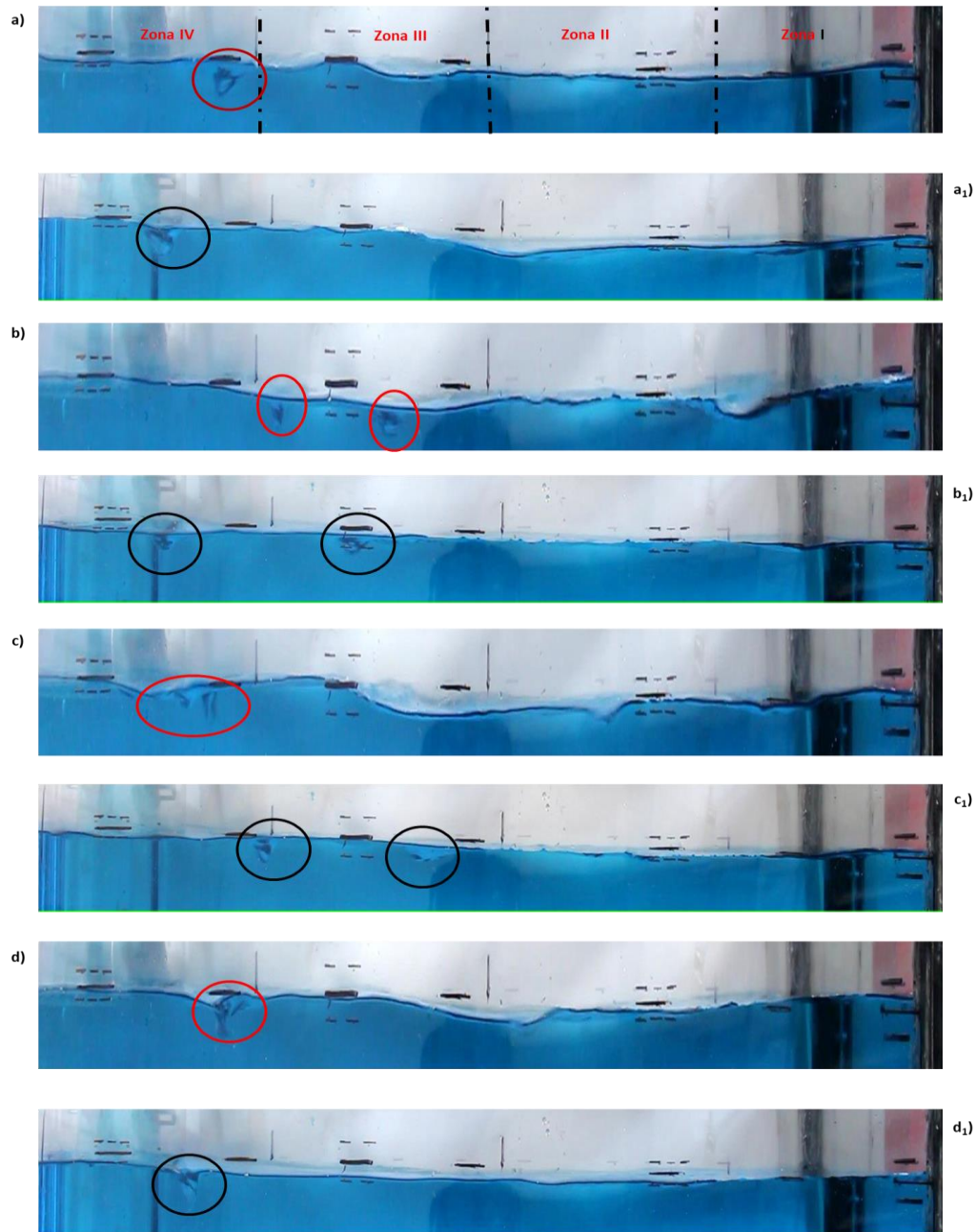


Fig. 4.39. Comparación de la aparición de Vórtices sobre la superficie libre para la Buza B3c Cp.

En el transcurso de la experimentación con la Buza B3c Cp se observó como el flujo que sale por los puertos de la buza está girando y cada cierto tiempo se invierte su giro, esto se reflejó como se vio en las imágenes anteriores, en periodos muy cortos de fuerte movimiento en la superficie libre, lo que provocó que las oscilaciones en promedio llegaron a ser menores que la buza convencional pero en ciertas instantes se intensifican (cuando aparecen las vorticidades) y sus conocidas consecuencias. Teniendo en mente esto, se decidió dividir los chorros que salen de los puertos de la buza de tres cámaras en cuatro partes. Para realizar esto se utilizó un dispositivo en forma de cruceta que se ubicó en los puertos de salida, la Fig. 4.40 muestra el dispositivo de la cruceta en el molde y sus resultados se discuten en la siguiente sección.

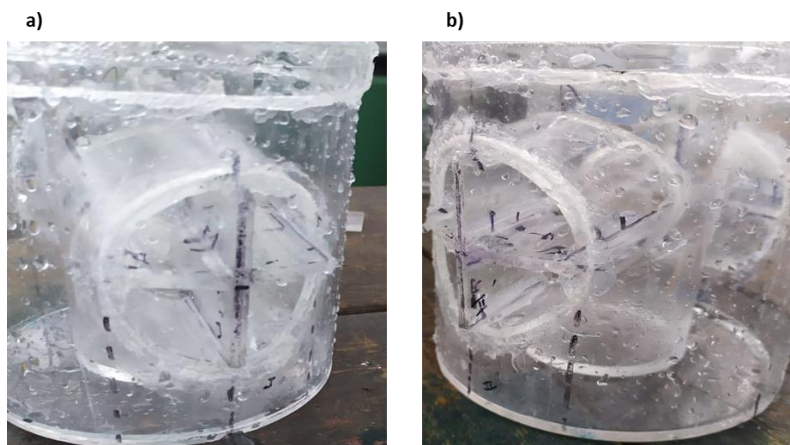


Fig. 4.40. Buza B3c Cp con cruceta. a) Vista frontal, b) Vista isométrica.

4.4.4 Cinética de Mezclado del Trazador Vegetal para la buza B3c Cp con cruceta

De la misma manera que el caso anterior, la Fig. 4.41 muestra la comparación de la difusión de colorante para el caso de la buza de tres cámaras con la cruceta y el caso de la buza convencional. En la Fig. 4.41a que corresponde al tiempo de 0 s se observa que el colorante vegetal apenas comenzara a salir de los puertos de la buza. Pasando 0.375 s (ver Fig. 4.41b) el colorante ha salido de ambos puertos de la buza, para el caso de la Buza con cruceta (B3c Cp cruceta) se ve de manera clara que dicho flujo esta menos inclinado y menos “disperso” que el caso de la buza convencional, la cual incluso se observa que el chorro izquierdo tendrá una mayor inclinación que el derecho. Un tiempo posterior (1.54 s desde el comienzo de la salida del colorante) se puede notar en primera instancia que el flujo proveniente de ambas buzas llegó hasta las paredes angostas, sin embargo, también se ve que para la buza con cruceta dicho flujo comenzó a recircular en la zona izquierda superior del molde, mientras que para la buza convencional se observa que los chorros tienden a dispersarse más y por

consiguiente, su impacto es más profundo y el flujo tiende a recircular primero hacia la parte baja del molde. Pudo verse también que los chorros que producen ambas buzas son muy diferentes a pesar de tener el mismo puerto, los chorros de la buza con cruceta son más rectos y sobre todo delgados, en cambio los de la buza convencional tienden a dispersarse más y a presentar mayores oscilaciones dentro del molde. Una vez transcurridos 4 s (ver Fig. 4.41d) se puede notar que el flujo dentro del molde sigue la tendencia general de ser un flujo de cuatro grandes recirculaciones, sin embargo, a diferencia del caso de la B3c Cp, la buza con cruceta cubrió primero la zona superior del molde dejando así una gran área sin cubrir con el colorante en la zona inferior, caso contrario a la buza convencional, en la cual se aprecia una área cercana a la buza donde la concentración del colorante luce de un tono de azul menor que el resto del área (ver "1"). Casi por último, a un tiempo de 9 s (ver Fig. 4.41e) el colorante en ambas buzas a cubierto prácticamente toda la zona superior del molde y casi por completo la zona inferior, pero como puede verse existen pequeñas diferencias, entre estas, a pesar de que el área sin cubrir es casi la misma, para la buza con cruceta, dicha área se ubica hasta la parte baja central del molde (ver "1"), mientras que para la buza Cp, esta área tiende a extenderse hacia la zona baja de la carcasa de la buza (ver "2"). Finalmente, a un tiempo de 13.5s el colorante se ha dispersado por completo en ambas buzas y no es posible seguir su rastro.

En los párrafos anteriores y en la serie de figuras presentadas pudo observarse una gran diferencia al añadir a los puertos de la buza la cruceta, es decir, se observaron chorros más uniformes y menos intensos (incluso que los de la buza de tres cámaras) que los chorros de la buza convencional. Dichos chorros tienden a impactar menos profundo en el molde, pero también con menor intensidad, como consecuencia de esto, se observó que la zona superior del molde tendió a colorarse primero, sin embargo, no se presentó una gran área de baja velocidad en la zona inferior del molde a pesar de lo observado con el colorante, con lo que se mantuvo la simetría del flujo observada con la buza de tres cámaras, pero atenuando los defectos antes observados que producía dicha buza.

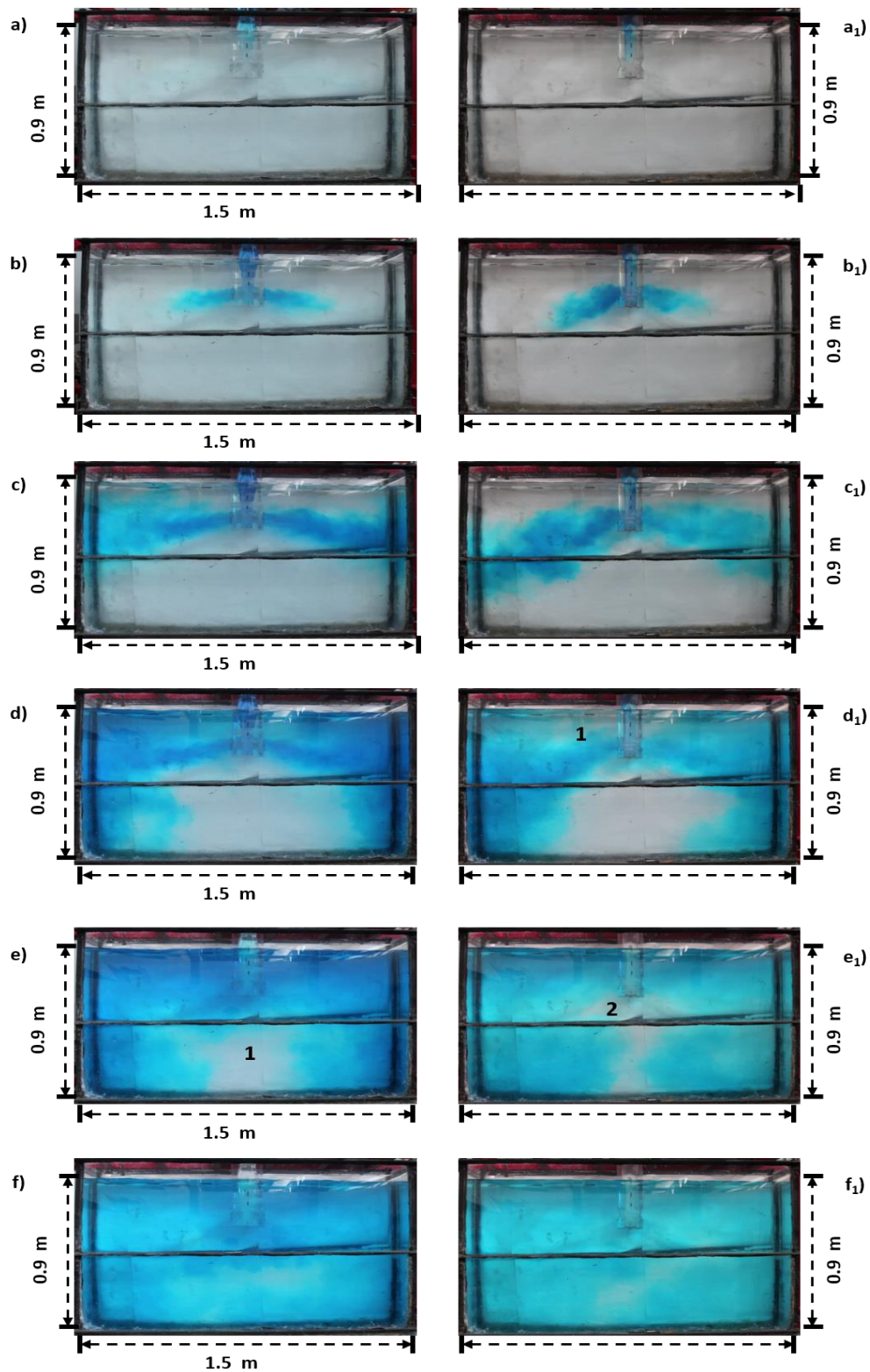


Fig. 4.41. Comparación de la cinética de mezclado del trazador vegetal en el interior del molde para la Buza B3c Cp cruceta y la Buza convencional. a) 0 s, b) 0.375 s, c) 1.54 s, d) 4 s, e) 9 s, f) 13.5 s.

4.4.5 Campo de velocidades obtenido por Velocimetría de Imagen de Partícula para la Buza B3c Cp Cruceta

De igual manera que sucedió con la difusión del láser y sus obvias consecuencias sobre las imágenes obtenidas, se presentó dicho fenómeno en la actual buza y se intensificó (debido a la presencia de la cruceta en el puerto de la buza) por esta razón, se decidió mostrar la comparación del campo vectorial utilizando además las líneas de corriente (justo como en el caso anterior).

La Fig. 4.42a muestra la comparación del campo de velocidad en el plano $Z=0$ para la buza B3c Cp cruceta y la buza convencional Bc Cp. En ambas buzas se aprecia en general un campo fluido dinámico de cuatro grandes recirculaciones, sin embargo, existen bastantes diferencias (ver Fig. 4.42 b y b1). En primera instancia, en la zona superior del molde, para la buza con cruceta se alcanza a apreciar la tendencia de los chorros observada con el trazador vegetal, es decir, los chorros que dicha buza genera tienden a no dispersarse, su diámetro se conserva casi igual hasta llegar a impactar las paredes angostas, fenómeno que no se apreció para la buza convencional. Sin embargo, a pesar de esto, la buza con cruceta, en lo que respecta al chorro derecho, este tendió a incrementar ligeramente su diámetro al acercarse al final de su recorrido, por lo tanto, los chorros no son completamente simétricos. Por otro lado, en lo que respecta al número y posiciones de ambas recirculaciones, se observó que ambas son muy parecidas a las que generó la buza convencional en la misma posición con la diferencia de que en su mayoría la buza con cruceta proporciona un campo fluido dinámico que tiende a re direccionar al fluido hacia sus chorros a altas velocidades (ver "1") mientras que la convencional no lo hace, el fluido impacta las paredes de la buza en el centro del molde, e incluso tiende a direccionarse hacia la superficie libre (ver "2") afectando directamente así las velocidades y la alta turbulencia encontrada en la interfaz con el aire. En lo que respecta a la zona inferior del molde se puede apreciar una mayor simetría en el campo fluido dinámico producido por la buza con cruceta, sus recirculaciones inferiores tienen aproximadamente el mismo tamaño, mientras que, por su parte, la buza convencional, la izquierda es mayor que la derecha.

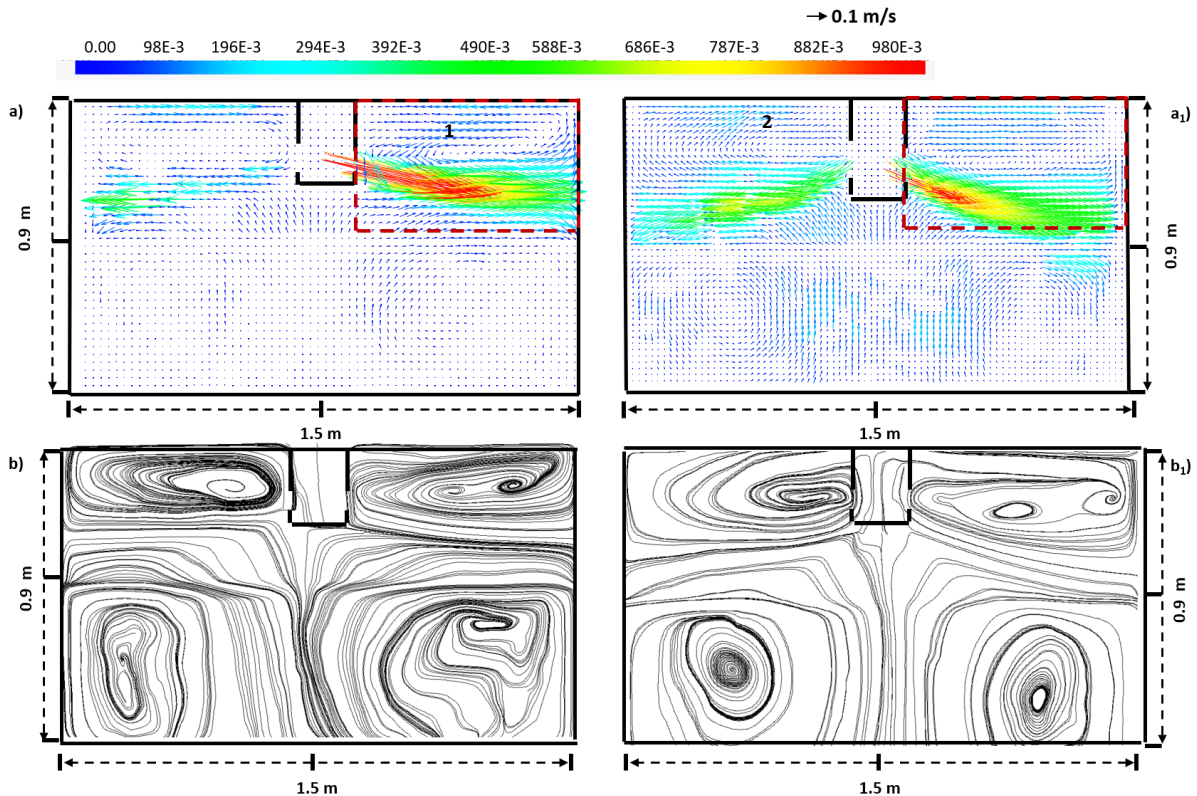


Fig. 4.42. Campo de vectores de velocidad y líneas de corriente para la Buza B3 Cp cruceta obtenidos mediante PIV.

De manera similar a los casos anteriores se presenta a continuación la Fig. 4 43 que muestra el acercamiento realizado al campo vectorial del cuadrante I para el plano $Z=0$. En primera instancia se observa que las velocidades a las que sale el flujo de la buza con cruceta son mayores que las correspondientes de la buza convencional, aunado a esto, se aprecia que el impacto del chorro con la pared angosta es menos profundo, sin embargo, se puede notar también claramente que el chorro de la buza con cruceta tiende a fraccionarse cada vez más en su recorrido hacia la pared angosta (ver “1”) mientras que el chorro de la buza convencional sale más inclinado y solo se “dispersa” al acercarse a la pared y debido a dicha fracción del chorro el flujo que se acerca hacia la pared resultó con menores velocidades. En relación al flujo sobre las inmediaciones de la superficie libre puede verse que la buza con cruceta género dos recirculaciones mientras que la convencional solo una. La recirculación superior en la Fig. 4.43a tiende a dirigir el flujo hacia la segunda recirculación aumentando de tamaño a esta y sobre todo redireccionando el flujo hacia el chorro (ver “2”) teniendo como consecuencia que el flujo sobre la superficie libre tenga menores velocidades que la buza convencional. Por otro lado, debajo del chorro también se puede notar una disminución en las velocidades, principalmente en la zona inferior izquierda (ver

“3”). En lo que respecta a las zonas de baja velocidad localizadas en las esquinas superiores del molde se puede ver que estas disminuyeron en tamaño y magnitud para la buza con cruceta.

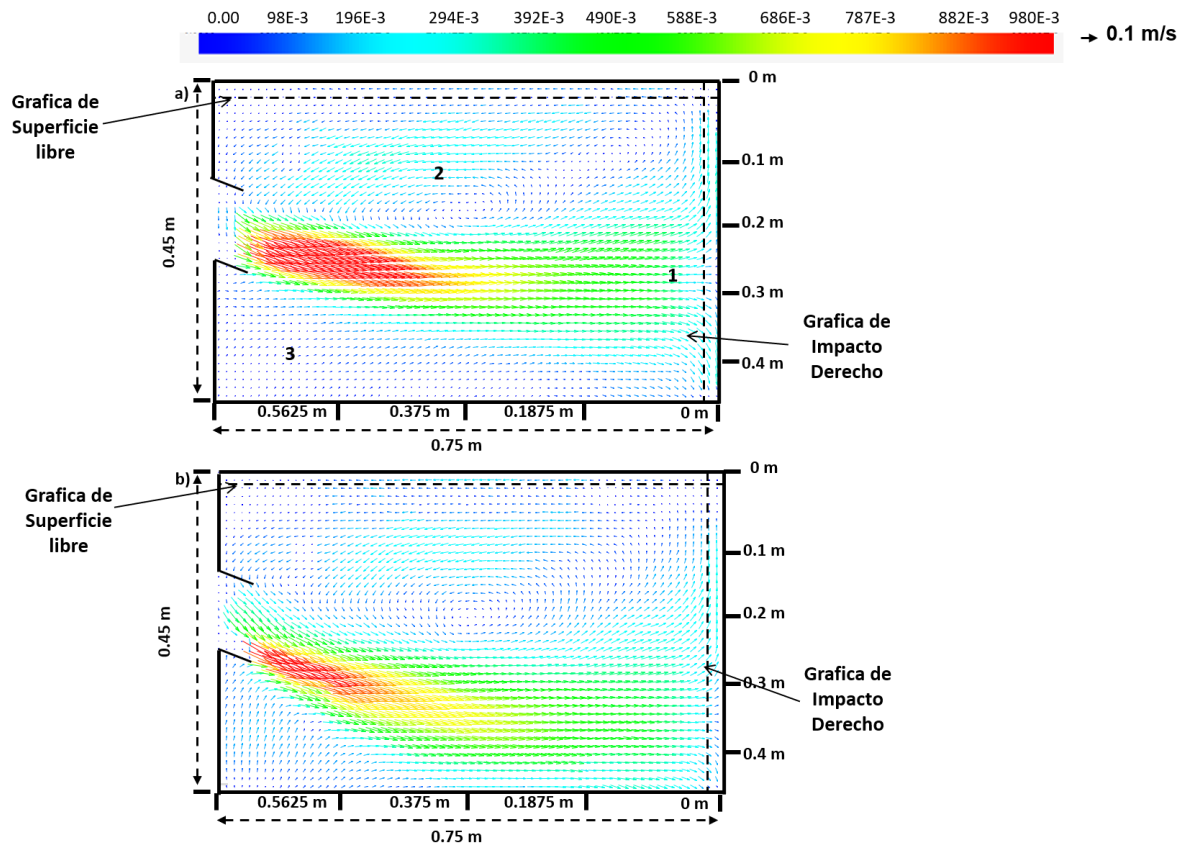


Fig. 4.43. Campo de vectores de velocidad en la zona por encima del chorro derecho para la Buza B3c Cp cruceta obtenidos mediante PIV.

La Fig. 4.44 muestra las gráficas de velocidad de impacto del chorro derecho obtenidas a 5 cm de la pared angosta para la buza con cruceta y la buza convencional. La zona de impacto del chorro para la buza con cruceta ocurre entre los -220 y -280 mm por debajo de la superficie libre y el rango de velocidades que se alcanzan en estas zonas son de aproximadamente 0.09 a 0.12 m/s, por su parte, la buza convencional alcanzo un punto de impacto de alrededor de -300 mm con una velocidad promedio de 0.10 a 0.14 m/s. Para este diseño de buza en particular (buza con cruceta) la máxima velocidad se encuentra por debajo de los -300 mm de la superficie libre la cual es mucho mayor que la velocidad que se obtuvo con la buza convencional (aproximadamente 0.15 m/s). En relación al flujo ascendente se ve que el flujo que se dirige hacia la superficie libre fluctúa entre los valores de 0.20 y 0.25 m/s y por su parte la buza convencional alcanzo valores cercanos a los 0.30 m/s, lo

cual contribuye a que el flujo en las inmediaciones de la superficie libre sea más intenso y con mayores velocidades.

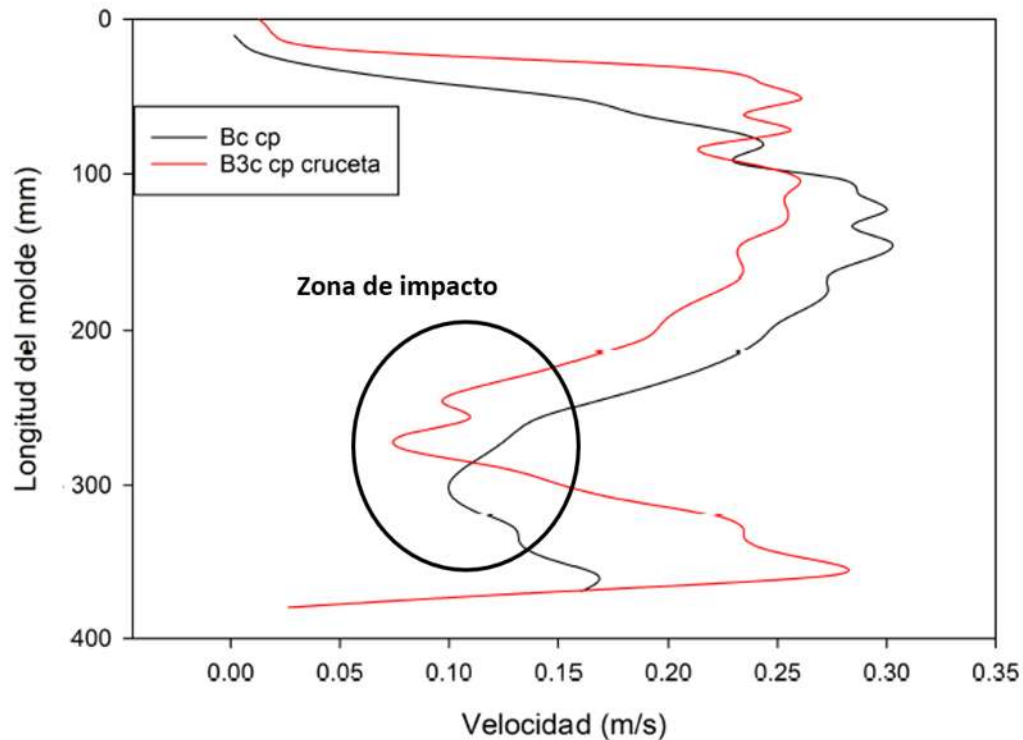


Fig. 4.44. Gráfica de velocidad a 5 cm de la pared derecha para la Buza B3c Cp cruceta.

Por su parte la Fig. 4.45 muestra las gráficas de velocidad obtenidas a 1 cm por debajo de la superficie libre para la buza con cruceta y la buza convencional. En esta gráfica puede observarse que la máxima velocidad en la superficie libre está oscilando entre los valores de 0.10 y 0.14 m/s para la buza con cruceta y para la buza convencional se alcanza un valor de 0.20 m/s. Las máximas variaciones de en ambas buzas se localizan entre los 200 y 500 mm medidos desde la pared angosta, que corresponden a las zonas II y III mencionadas anteriormente y en estas zonas se espera grandes variaciones de nivel. Por otro lado, con respecto al fluido que presento variaciones de velocidad por debajo de los 0.05 m/s se observa que del lado izquierdo se disminuyeron las zonas de baja velocidad (justo al lado de la buza) por lo que el fenómeno de arrastre de escoria por las paredes de la buza podría disminuir para este caso.

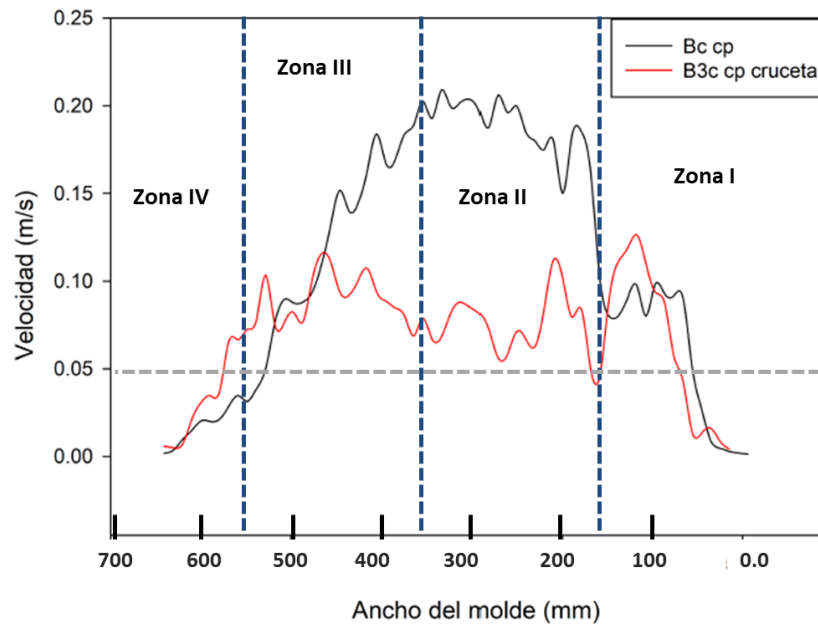


Fig. 4.45. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp cruceta.

4.4.6 Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta

La Fig. 4.46 muestra las oscilaciones de nivel para los casos de la buza B3c Cp cruceta y buza convencional. En la Fig. 4.46a se observa que en la Zona I el nivel cerca de la pared está casi a los +10 mm, después desciende abruptamente hasta llegar al valor de referencia mientras que en la convencional el nivel cerca de la pared alcanza valores de +6 mm y luego descendió hasta la línea de referencia. En la Zona II el agua se mantiene sobre la línea de referencia y la buza convencional descendió hasta los -8 mm. Para la Zona III, en la buza con cruceta el nivel baja levemente (-3 mm) y luego se mantiene casi sobre la línea de referencia y para la convencional, el nivel siguió bajando, llegando a los valores de -10 mm. En la Zona IV las oscilaciones del nivel se comportan muy similares en ambas buzas. En la Fig. 4.46b el fluido oscila en forma de onda para la buza con cruceta, la cresta más alta se ubica en la Zona I y alcanza el valor de +7 mm después comienza a bajar de forma gradual hasta alcanzar el valle ubicado en la Zona III y tiene un valor de -4 mm de aquí se forman dos ondas superficiales, la primera tiene su cresta en la Zona III y alcanza la línea de referencia, la segunda ola tiene su valle en la Zona IV y alcanza el valor de -2 mm mientras que la cresta se ubica en la línea de referencia. Por su parte, se observa que el flujo de la buza convencional también está oscilando en forma de onda, en la Zona I se ubica la cresta y alcanza un valor de +9 mm, después desciende gradualmente hasta llegar al valor de -10 mm en la Zona III y sube ligeramente hasta alcanzar el valor de -5 mm en

la Zona IV. Por otro lado, en la Fig. 4.46c el nivel para la buza con cruceta sigue fluctuando en forma de onda, de la Zona I a la II el nivel cambia de +10 mm a -2 mm mientras que de la Zona III a la IV el fluido se mantiene cercano a la línea de referencia, por su parte, en la buza convencional se aprecia que el nivel en la Zona I se mantiene estable y comienza a descender gradualmente hasta que en la Zona III se ubica el valor mínimo alcanzado de -9 mm después tiende a subir y llega hasta los -5 mm aproximadamente. En lo que respecta a la Fig. 4.46d se aprecia que el nivel desciende desde un valor máximo en la Zona I a uno mínimo en la Zona III de forma gradual (+10 mm a -4 mm) para luego mantenerse sobre la línea de referencia en la Zona IV y en el caso de la buza convencional se observa que el nivel se encuentra bastante estable en las Zonas I y II, sin embargo, después desciende hasta el valor de -10 mm en la Zona III y luego vuelve a mantenerse oscilando sobre la línea de referencia.

La serie de Figs. 4.47a-e corresponde a la segunda serie de oscilaciones para los casos de la buza con cruceta y la buza convencional. En el caso de la Fig. 4.47a para la buza con cruceta en la Zona I el nivel está por arriba de la línea de referencia (+5 mm) después desciende hasta alcanzar el valor de referencia en la Zona II para después volver a descender hasta -4 mm en la Zona III y finalmente en la Zona IV el nivel alcanzó el valor de -10 mm, también se puede observar que la buza convencional en la Zona I el nivel se ubica oscilando en un valor de +4 mm, después comienza a bajar hasta los -3 mm en la Zona II y continua descendiendo hasta alcanzar el valor de -12 mm en la Zona III y luego subir abruptamente hasta llegar al valor de referencia en la Zona IV. Por su parte, la Fig. 4.47b muestra una superficie libre relativamente estable, solo en la Zona I y II existen variaciones, de estas, la de la Zona II alcanzo el valor de -5 mm y en la Zona I un valor de +10mm. Para el caso de la buza convencional se puede ver de igual manera una superficie libre bastante estable, salvo en la Zona III donde el valor de la oscilación del nivel fue de -14 mm aproximadamente. Para la Fig. 4.47c se observa como el nivel en la buza con cruceta desciende ligeramente desde la Zona I (+9 mm) hasta alcanzar en la Zona III el valor de -8 mm, luego comienza a subir hasta alcanzar la línea de referencia en la Zona IV, algo curiosos sucede en la buza convencional, a pesar de que son tiempos completamente diferentes en todas las fotografías del nivel descritas, en dicha buza se observa que el nivel tiende a subir gradualmente desde la Zona I a la Zona IV, en la primera zona, el nivel se ubica alrededor de los -6 mm y justo en la Zona IV se encuentra oscilando de forma bastante estable, es decir sobre la línea de referencia.

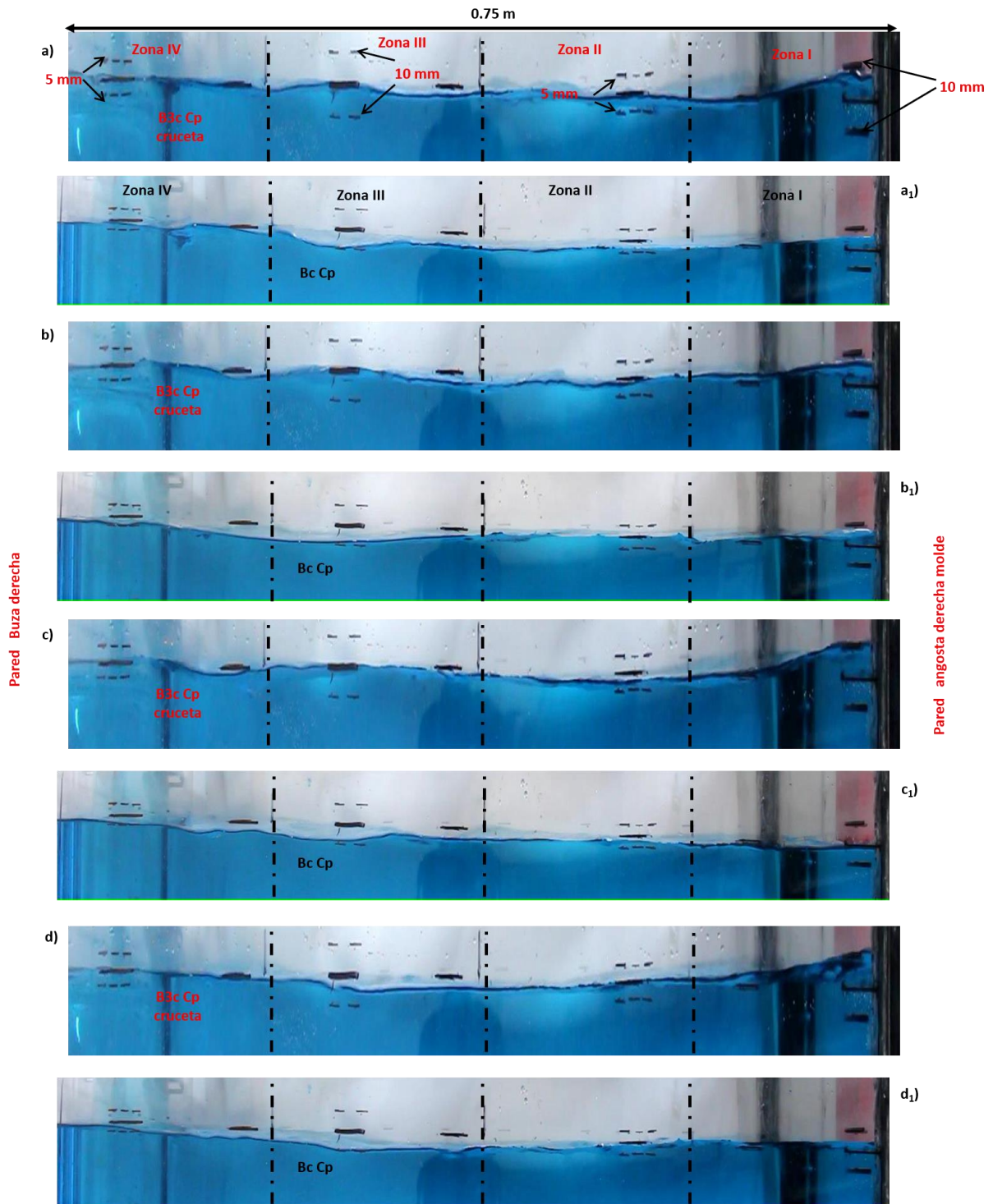


Fig. 4.46. Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta sobre la superficie libre. Finalmente, en la Fig. 4.47d se ve que el nivel oscila en forma de onda para la buza con cruceta, hay tres crestas y dos valles. La cresta más grande se ubica en la Zona I (+10 mm) y el valle más profundo tiene un valor de -3 mm en la Zona II, por su parte,

el flujo que produce la buza convencional también oscila en forma de ondas, pero de mayor amplitud, se ven dos crestas y un solo valle. Las crestas se ubican en las Zonas I y IV donde alcanzan valores de +9 mm y -5 mm respectivamente. En lo que se refiere al valle, este se ubica entre las Zonas II y III y alcanza un valor cercano a los -100 mm justo en la zona central de este lado del molde.

En esta serie de 16 figuras pudo notarse que para el caso de la buza con cruceta, en la Zona I el nivel siempre se encuentra oscilando cercano a los +10 mm y la buza convencional por su parte puede llegar a oscilar con un menor valor incluso por debajo de la línea de referencia. Para la Zona II se observó que ambas buzas siempre tienden a generar flujos que oscilan por debajo de la línea de referencia o con valores muy cercanos a esta, ambas buzas oscilan casi lo mismo en esta zona. Por otro lado, en la Zona III se vio que el flujo de la buza con cruceta siempre oscila cercas a la línea de referencia y el flujo de la buza convencional tiende a alcanzar sus valores máximos negativos, en promedio de -8 mm. En la Zona IV se observó que de nueva cuenta el flujo que produce la buza con cruceta tiende a mantenerse cercano a la línea de referencia mientras que el de la buza convencional tiende a oscilar por debajo de esta en valores promedio de -4 mm.

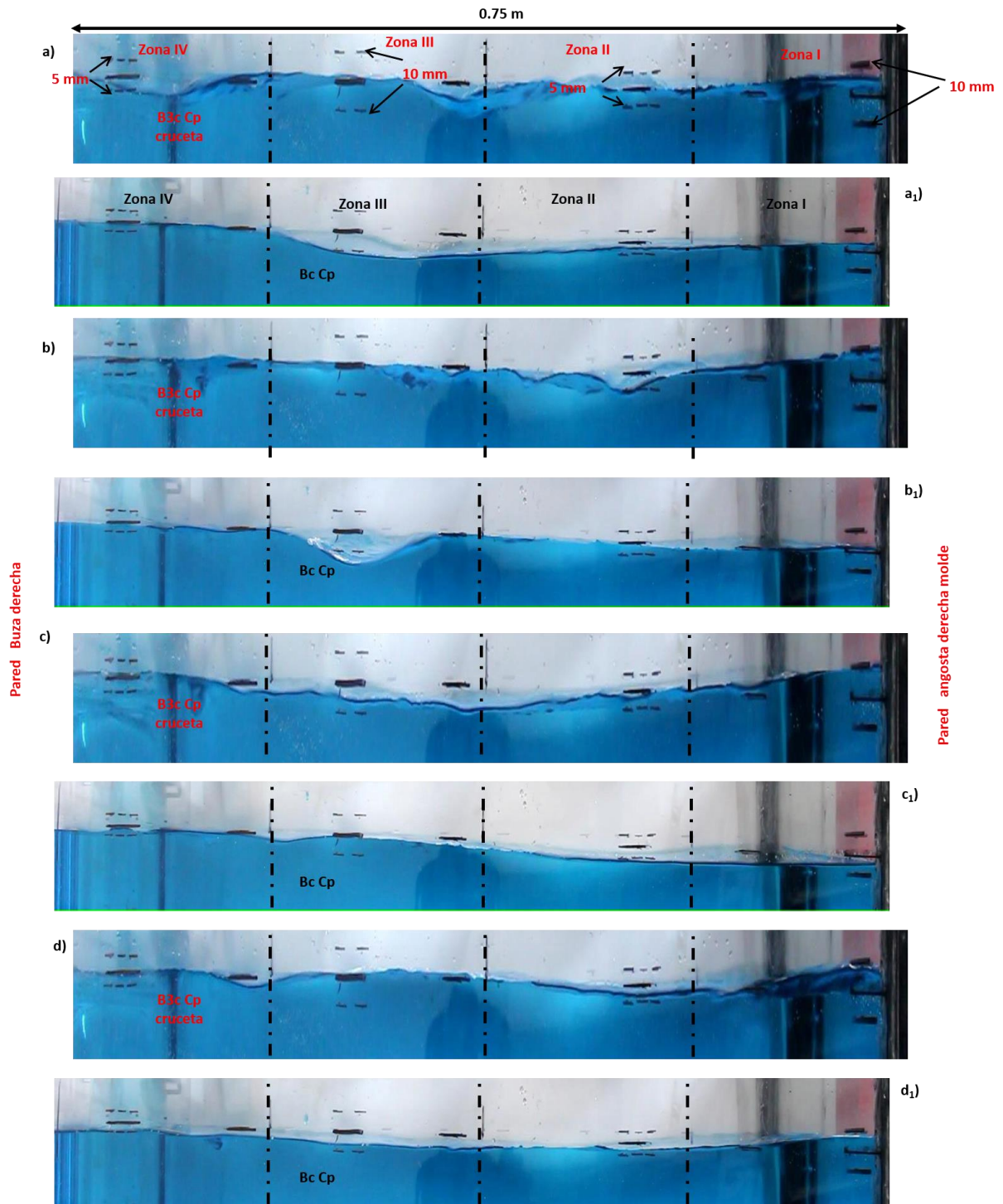


Fig. 4.47. Oscilaciones de nivel para la Buza B3c Cp cruceta sobre la superficie libre.

En la Fig. 4.48 se muestran los vórtices que se generaron en la buza con cruceta y la buza convencional. Se encontraron alrededor de 23 vórtices para la buza con cruceta y alrededor de 13 para la buza convencional. En la Fig. 4.48a se observa un vórtice en la Zona IV cercano a la carcasa de la buza y también se observa un vórtice para la buza convencional en la misma zona, se alcanza a ver que el vórtice de la buza con cruceta es más grande. Por su parte, en la Fig. 4.48b se aprecian dos vórtices para la buza con cruceta y de nueva cuenta, también se aprecian dos vórtices para la buza convencional, estos se ubican en la Zona IV y III. En la Fig. 4.48c se aprecia que la buza con cruceta genero solo un vórtice el cual se ubica en los límites de la Zona IV, a su vez la buza convencional también genero dos vorticidades, una en la misma zona que la buza convencional y la otro en la Zona III. Por último, se ve en la Fig. 4.48d que cada buza produce solo un vórtice, ambos en la misma zona, aunque el vórtice de la buza con cruceta se encuentra más alejado de la pared de la buza. Se pudo notar en esta serie de imágenes que la buza con cruceta tiende a generar más vorticidades y de un tamaño más grande que los que se generan con la buza convencional, lo cual resulto similar en relación a los vórtices que se generaron con las buza de tres cámaras, sin embargo, con la de cruceta estos vórtices resultaron más grandes.

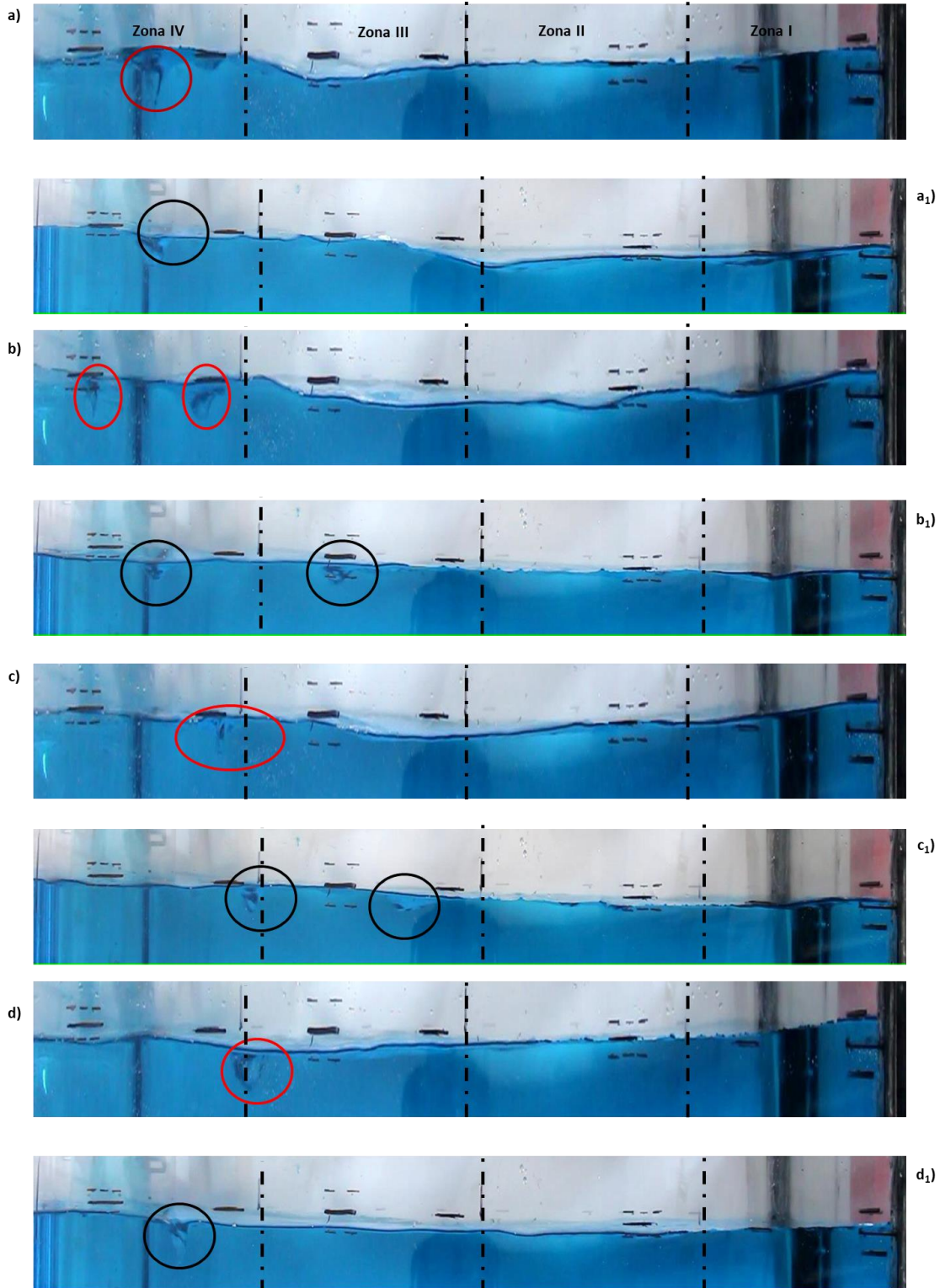


Fig. 4.48. Aparición de Vórtices sobre la superficie libre para la Buza B3c Cp cruceta.

4.4.7 Comparación de Resultados de la Buza convencional vs Buza B3c Cp y B3c Cp cruceta

La Fig. 4.49 muestra la comparación de los campos vectoriales en el plano $Z=0$ para la buza convencional vs la buza de tres cámaras y la buza de tres cámaras con cruceta. Se puede notar en primera instancia que la intensidad del flujo que sale de los chorros es bastante diferente, en el caso de la buza Bc Cp la velocidad cae rápidamente desde 1 m/s hasta 0.7 mientras que para la buza B3c Cp el área en rojo es mayor y el área en amarillo menor (ver "1"), algo similar sucede para el caso de la buza B3c Cp cruceta. Otra diferencia notable resulta en los puntos de impacto del chorro, la buza Bc Cp tiene una mayor profundidad y por el contrario la buza b3c Cp cruceta tiene la menor profundidad de impacto (ver "2") pero también es menor la velocidad con que este chorro impacta la pared angosta. Se puede ver como la forma y posición de las recirculaciones tiene un gran efecto en el flujo sobre la superficie libre, en el caso de la buza Bc Cp los vectores tienden a estar más en posición horizontal, dirigiendo así al flujo hacia las paredes de la buza y en las otras buzas se observan estos mismos vectores pero en dirección inclinada (hacia la misma recirculación), esto tendió a incrementarse debido a que en las dos buzas propuestas se observó una recirculación de flujo cercana a la superficie libre y direcciono los vectores hacia abajo (ver "3") por lo tanto, el flujo en la superficie libre disminuye en comparación con la buza convencional, siendo la buza B3c Cp cruceta la que presento menor velocidad en las inmediaciones de la superficie libre (ver "4"). Finalmente, se puede ver que el flujo por debajo de los chorros también tendió a disminuir en comparación con la buza convencional y de nueva manera, la buza B3c Cp cruceta fue la que tuvo la menor velocidad.

De los párrafos anteriores, se demuestra que a pesar de tener la misma velocidad de entrada en las buzas, la velocidad en el interior del molde se puede disminuir, las dos propuestas de buzas están disipando su energía cinética en el interior de esta y por lo tanto la velocidad dentro del molde disminuyo notablemente.

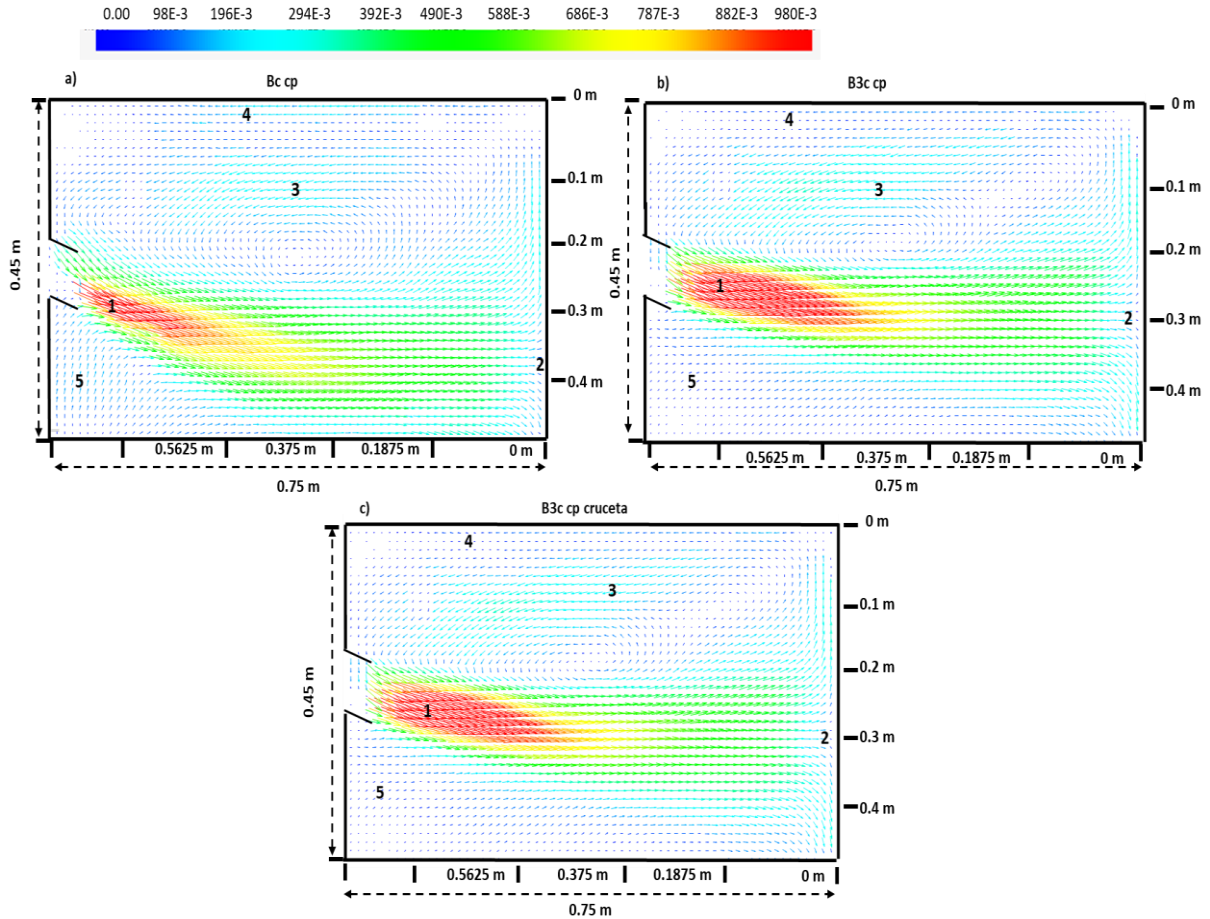


Fig. 4.49. Comparación del campo vectorial obtenidas mediante PIV en el plano Z=0. a) Bc Cp, b) B3c Cp, c) B3c Cp cruceta.

La Fig. 4.50 muestra las tres gráficas de impacto del chorro derecho en una sola imagen. Se puede notar que la buza Bc Cp tiene el impacto del chorro más profundo, después sigue la B3c Cp y por último la B3c Cp cruceta. También se observa que el flujo que se dirige hacia la superficie libre es más intenso para la buza convencional y en cambio, es prácticamente el mismo para las dos buzas propuestas. Por último, en relación al flujo que se dirige hacia la parte baja de la misma se observa más intenso el de la buza B3c Cp cruceta.

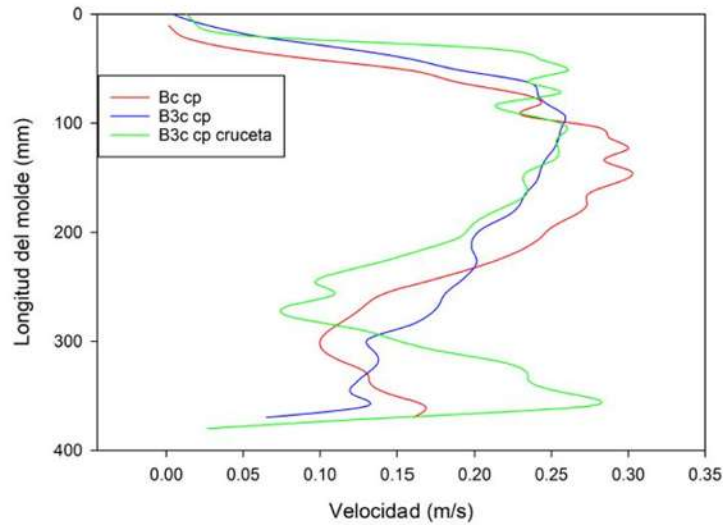


Fig. 4.50. Comparación de las gráficas de velocidad a 5 cm de la pared derecha para las tres buzas.

Por su parte, la Fig. 4.51 muestra las gráficas de velocidad en la superficie libre para los tres casos. Se observa que la buza B3c Cp cruceta tiene menores velocidades en la superficie libre para las zonas I, II y III., Por el contrario, la buza convencional siempre genera mayores velocidades en todas las zonas, salvo en la Zona IV. En forma general, el promedio de velocidades en la superficie libre es el siguiente para cada caso en particular. La Bc Cp tiene una velocidad promedio de 0.11 m/s, la B3c Cp de 0.095 m/s y la B3c Cp cruceta de 0.074 m/s.

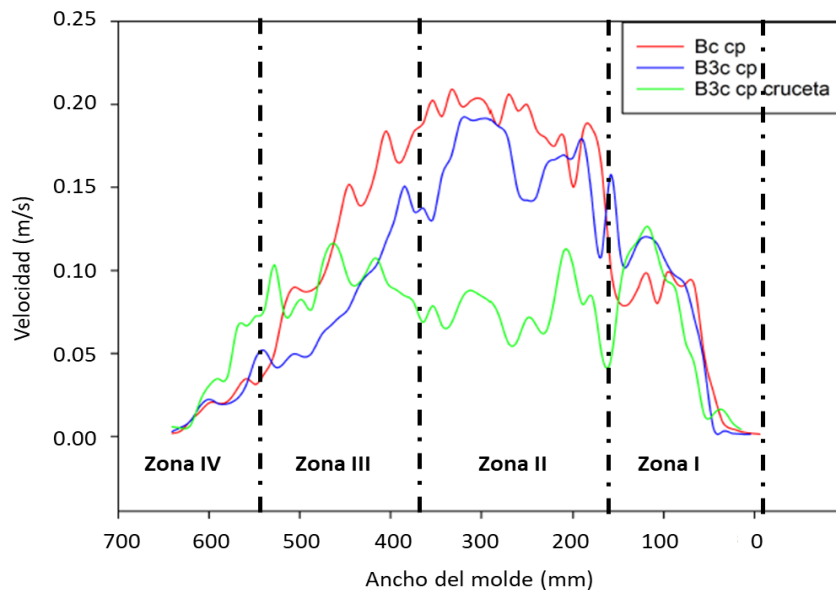


Fig. 4.51. Comparación de las gráficas de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre para las tres buzas.

La Fig. 4.52 muestra la comparación de las oscilaciones de nivel para los tres casos analizados. Después de analizar con detenimiento las 24 imágenes, se seleccionaron 2 de cada serie que representaban de manera general la tendencia de oscilación de nivel de cada caso. Para la Zona I se observó que la Bc Cp tiende a oscilar por encima de la línea de referencia, incluso suele estar sobre esta, para la B3c Cp, se observó que el nivel rara vez baja a la línea de referencia, por el contrario, siempre se mantiene encima de esta y para la B3c Cp cruceta el nivel siempre se mantiene muy cercano a la línea para medir las oscilaciones. En la Zona II, el nivel oscila por debajo de la línea de referencia en la Bc Cp y la B3c Cp mientras que la B3c Cp cruceta tiende a estar más cercana a la línea de referencia. Para la Zona III se aprecia que las oscilaciones son mayores en la buza Bc Cp (oscila por debajo de los -10 mm) y la B3c Cp y B3c Cp cruceta oscilan de manera muy similar. En la Zona IV la oscilación de nivel es muy similar para los tres casos.

En lo que respecta a la formación de vórtices se observó que la Buza Bc Cp tiende a generar vórtices más grandes e incluso llegan a estar más alejados de las paredes de la carcasa de la buza, lo que indica que existe más asimetría en el campo fluido dinámico en esta buza que en las dos propuestas.

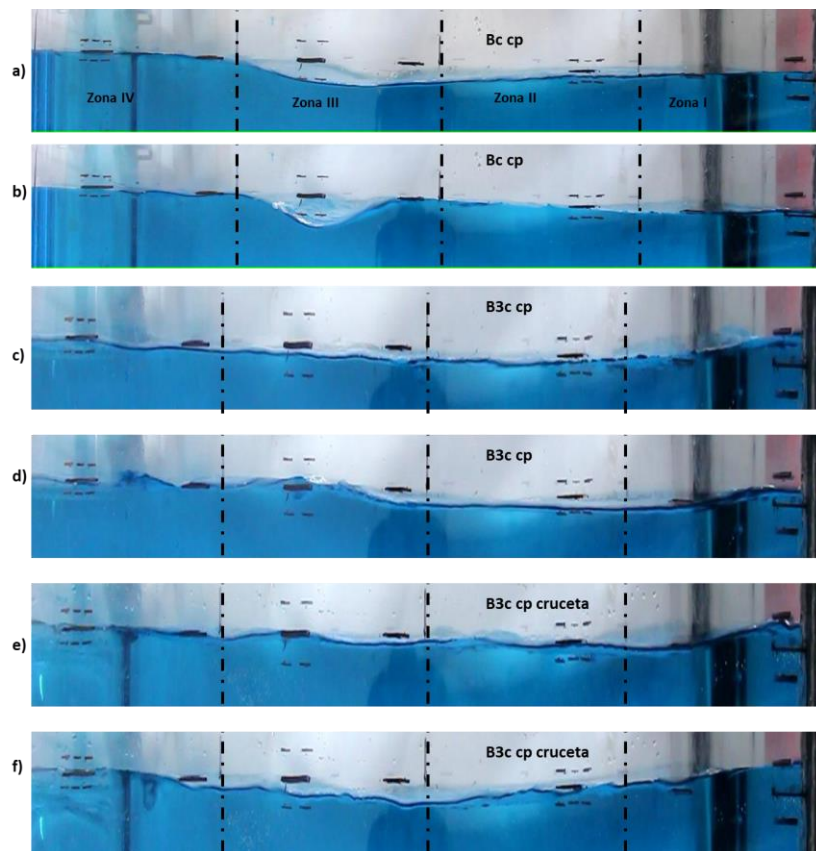


Fig. 4.52. Comparación de las Oscilaciones de nivel. a)-b) Bc Cp, c)-d) B3c Cp, e)-f) B3c Cp cruceta.

4.4.8 Correlación de la Fluido Dinámica en el interior del molde con la aparición de defectos superficiales en el producto final para las B3c Cp y B3c Cp cruceta

En las dos buzas propuestas se presentó el típico patrón de flujo de cuatro grandes recirculaciones (“Double roll”), sin embargo, también en ambas buzas, en la zona superior se presentaron más recirculaciones de flujo, lo que provocó que el flujo tienda a dirigirse de nuevo hacia el chorro, disminuyendo de esta manera las velocidades en la superficie libre y a su vez, provocando menores oscilaciones de nivel. El rango de oscilación fue en promedio de +10 mm a -3 mm, siendo este menor al caso de la buza Bc Cp (+10 mm a -10 mm), por lo que la posibilidad de generar defectos superficiales bajo considerablemente.

Por otro lado, en relación al punto de impacto y velocidad del flujo sobre la pared angosta, se observó de nueva cuenta que ambas buzas generan menores velocidades en la pared angosta, siendo la buza B3c Cp cruceta la que podría generar el menor desgaste de la costra recién solidificada, sin embargo, al tener una menor profundidad de impacto esto podría invertirse debido a que desgastaría con mayor facilidad esta zona que la buza B3c Cp, la cual presenta las mismas velocidades ascendentes en la pared angosta pero con una zona de impacto del chorro mayor.

Un aspecto importante a destacar fue que se observó que la buza B3c cruceta tiende a generar un campo fluido dinámico más simétrico que la buza convencional. También se observó que la Buza B3c Cp cruceta genero un chorro más largo, recto y uniforme que oscila menos que la Buza convencional, por su parte la buza B3c Cp genero un chorro meno grueso que la buza convencional, pero este tiende a oscilar (ver difusión del colorante para los tres casos).

En lo que respecta a las zonas de baja velocidad y formación de vorticidades se observó que alrededor de la buza, las vorticidades que se generan para las buzas de tres cámaras son de un tamaño menor (faltando por averiguar su velocidad, la cual se abordara en el apartado siguiente) y únicamente se generan en las cercanías de la pared a comparación del caso de la Buza convencional, en la cual se observaron vórtices grandes incluso a la mitad del lado derecho del molde.

4.5 Modelo Matemático del Sistema Molde-Buza Acoplado para la Buza B3c Cp.

4.5.1 Campo de Velocidad en el Interior del Molde

La Fig. 4.53 muestra el campo de velocidad obtenido de la simulación acoplada del molde y la buza de tres cámaras (B3c Cp). Los resultados se muestran a un tiempo estadístico de 90 s con el modelo LES que corresponden aproximadamente a 8.5 minutos desde el comienzo de la simulación. En dicha figura se aprecia que el flujo del molde tiene cuatro grandes recirculaciones (“doublé roll”), aunque en la zona superior, las grandes recirculaciones se encuentran fraccionadas en unas más pequeñas, por ejemplo, del lado derecho se aprecian dos pequeños ojos de recirculaciones (ver “1 y 3”), de estas, la marcada con el número tres se ubica al centro del molde y tiende a inclinar más el chorro, pues se nota que los vectores con mayor velocidad tienen una inclinación muy vertical que golpea al chorro de fluido que sale por los puertos de la buza. Del lado izquierdo también se aprecian dos pequeñas recirculaciones, de estas, la recirculación marcada con el “2” es la más intensa y tiende a dirigir el flujo en una dirección paralela a la superficie libre. A consecuencia de estas recirculaciones se puede notar que la inclinación de los chorros es bastante diferente, el chorro derecho está más inclinado que el izquierdo y aparte es mucho más corto también. Con relación a las zonas de baja velocidad ubicadas en las esquinas superiores del molde se aprecia que disminuyeron bastante en relación al caso de la Buza Convencional Cp (ver Fig. 4.8). Por otro lado, en las zonas por debajo de los chorros, se aprecia que el flujo se mueve con mayores velocidades del lado izquierdo y alcanza una velocidad de aproximadamente 0.30 m/s, sin embargo, el tamaño de las recirculaciones es casi el mismo (ver “5 y 6”) dejando así una zona en el centro del molde donde el fluido sube con dirección vertical sin verse afectado por alguna de las recirculaciones inferiores (ver “7”).

Finalmente, se pudo apreciar bastante semejanza entre el campo vectorial obtenido mediante el PIV (ver Fig. 4.33 y 4.34) y la correspondiente imagen obtenida mediante simulación matemática.

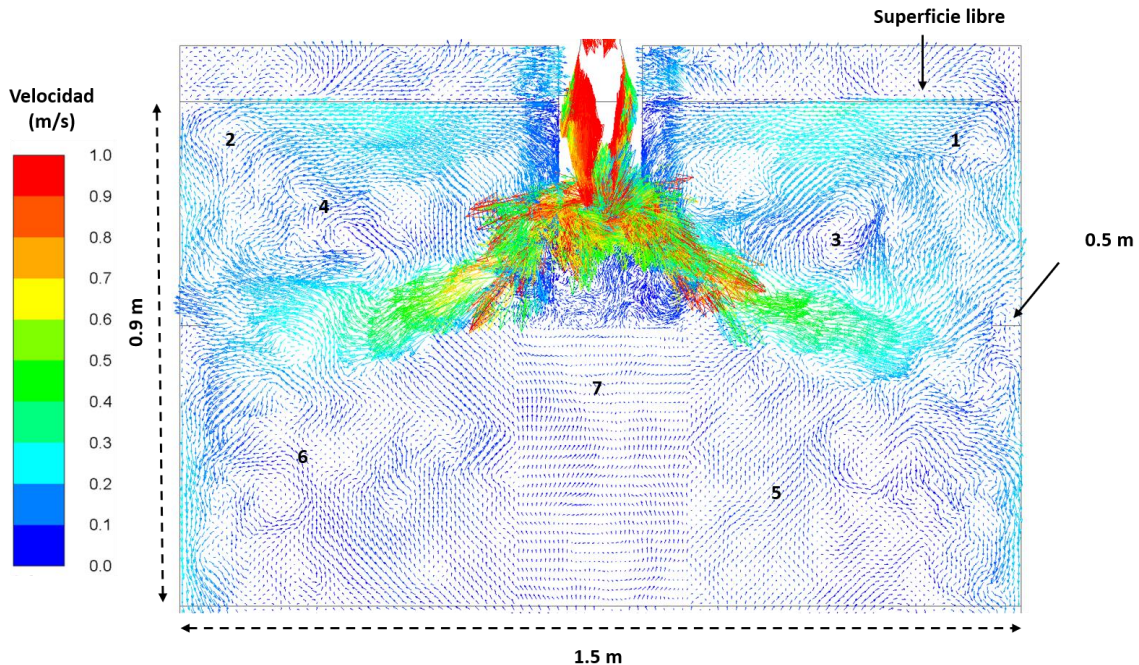


Fig. 4.53. Campo de velocidad para la B3c Cp en un plano de simetría longitudinal ($Z=0$) del molde obtenido mediante simulación matemática.

4.5.2 Campo de Velocidad sobre la superficie libre

En la Fig. 4.54a que corresponde al tiempo de 30 s estadísticos se observa que el flujo a 2 cm por debajo de la superficie libre (Plano $Y=-0.02$) es bastante asimétrico. Del lado derecho del molde se presentan las mayores velocidades (ver "1 y 2"), sin embargo, al acercarse a la buza, este comportamiento se invierte, es decir, el fluido tiene velocidades más elevadas en la zona izquierda de la carcasa (ver "3 y 4"). Por otro lado, se ven grandes zonas de baja velocidad en el centro del molde, tanto en la pared frontal como posterior. Por su parte, también se puede notar que, en las esquinas del molde, las zonas de baja velocidad presentan un comportamiento inverso, se ve que los vectores en la pared derecha tienen una dirección hacia la pared posterior y solo los vectores adyacentes a la pared frontal apuntan hacia el centro del molde, lo que hace pensar en el desbalance que presenta el chorro al impactar en las paredes angostas. Para la Fig. 5.54b (40 s estadísticos) se sigue observando una tendencia similar a la anterior, pero el desbalance de velocidades (ver "1 y 2") tiende a disminuir, caso contrario a lo que ocurre en la zona central del molde. En esta zona se aprecia que del lado izquierdo el flujo alcanza a cruzar hacia la derecha, por la pared frontal (ver "4") mientras que en la posterior se generó una pequeña recirculación de flujo que pudiese arrastrar escoria hacia el interior del molde (ver "3"). En lo que respecta a las zonas de baja velocidad de las esquinas del molde ahora la

de la derecha presenta menores velocidades que la izquierda. A un tiempo de 70 s estadísticos se obtuvo la Fig. 5.54c y se puede notar que la tendencia del desbalance de velocidades se sigue atenuando, se observan mayores velocidades del lado izquierdo (ver "1") y por el contrario estas disminuyeron en tamaño y magnitud en la zona correspondiente del otro lado (ver "2"). Para la zona inmediata a la carcasa de la buza el flujo tiende a circular por la parte posterior de la buza (ver "3") dejando así una zona bastante grande de baja velocidad justo enfrente de la buza. A este tiempo se observó una pequeña recirculación de flujo (ver "4"), sin embargo, esta posee bastante mayor velocidad que todas las recirculaciones de flujo observadas anteriormente. Finalmente, a un tiempo de 90 s estadísticos (Fig. 5.54d) se sigue notando la tendencia previa del flujo hacia la simetría lateral del flujo. Del lado izquierdo se sigue notando un incremento en la velocidad y por el contrario del derecho hay un decremento de la misma (ver "1 y 2") al igual a los costados de la buza se observa un flujo mucho más simétrico que en tiempos anteriores, razón por la cual se aprecian cuatro pequeñas recirculaciones de flujo a los costados de la buza (ver "3"), fenómeno no apreciado para el caso de la Bc Cp (Fig. 4.9).

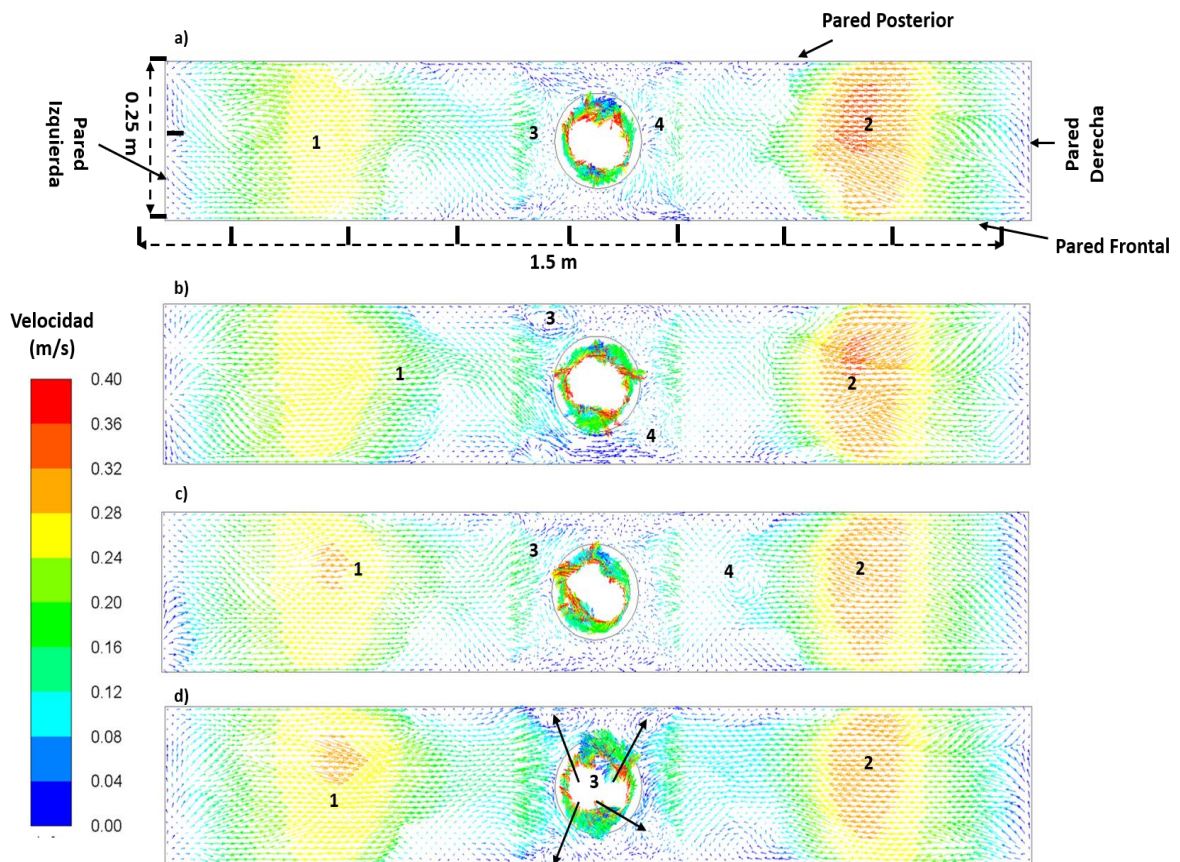


Fig. 4.54. Campo de velocidad obtenido mediante simulación matemática en un plano ubicado a 2 cm por debajo de la superficie libre para la Buza B3c Cp.

4.5.3 Oscilaciones de nivel en la superficie libre para la Buza B3c Cp obtenidos mediante simulación matemática

La Fig. 4.55 muestra los resultados obtenidos de las oscilaciones de nivel para la buza B3c Cp sobre la superficie libre en la pared frontal ($Z=0.25$ m) obtenidas a los tiempos de 30 s, 40 s, 70 s y 90 s estadísticos. La serie de figuras de 4.55a-d corresponden a la zona derecha del molde, mientras que la serie 4.54e-h corresponden a la zona izquierda. Para el tiempo de 30 s estadísticos en la zona derecha (ver fig. 4.55a) se observa que el nivel alcanza valores de +6 mm por encima de la línea de referencia en la Zona I y después comienza a descender gradualmente hasta el valor de -5 mm aproximadamente justo a la mitad de la Zona II donde forma una pequeña onda irregular y se eleva ligeramente (-4 mm), después se mantiene relativamente estable y comienza a ascender para mantenerse así hasta la Zona IV. Después de 10 s (Fig. 4.54b), el nivel ahora tiende a bajar desde la Zona I hasta alcanzar el valor mínimo (en la Zona II) y comienza a oscilar en forma de ondas para que a la mitad de dicha zona tienda a mantenerse constante a -3 mm aproximadamente. Por su parte en la Fig. 4.55c se observa de nueva cuenta que el nivel vuelve a alcanzar un valor en la Zona I de +5 mm justo en la pared angosta, inmediatamente después tiende a descender de forma gradual para entrar a la Zona II con un valor de -2 mm, en esta zona el nivel tiende a formar ondas irregulares de pequeña amplitud y se mantiene oscilando hasta la Zona IV siempre entre los valores de -4 mm y -2 mm. Cuando han transcurrido 90 s estadísticos (Fig. 4.55d) se observa que el nivel tiende a oscilar en forma de onda, en esta ocasión la amplitud es bastante grande, el valle de la onda se ubica en la Zona II y tiene un valor aproximado de -6 mm y por su parte, la cresta de dicha onda se ubica a la mitad de la Zona III, después de la cresta el fluido se mantiene estable (-3 mm).

En lo que respecta a la zona izquierda del molde, en la Fig. 4.55e (correspondiente a 30 s estadísticos) se puede notar que en las zonas V y VIII el nivel está más cercano a la línea de referencia mientras que en las zonas VII y VI el nivel tiene su valor más alejado de la línea, de estas, en la Zona VI se aprecian dos valles y una cresta. Para la Fig. 4.55f (40 s estadísticos) de nueva cuenta se observa un comportamiento muy similar a la anterior figura, en la Zona V en esta ocasión es en donde se ve una onda irregular con pequeña amplitud, en el resto del molde se observa que el nivel tiende a subir o bajar en forma gradual, siendo que en la Zona VII alcanzo el valor mínimo de aproximadamente -8 mm. Para el caso de la Fig. 4.55g correspondiente al tiempo de 70 s estadísticos, se aprecia que en las zonas V y VI se generan algunas ondas irregulares con pequeña amplitud y están oscilando entre los valores de -3 y -5 mm aproximadamente, por otro lado, para las Zonas VII y VIII el nivel tiende a subir hacia la superficie libre, incluso en la última zona se rebasa la línea de referencia justo en la

pared angosta izquierda y presenta un valor de +2 mm. Para el tiempo de 90 s estadísticos se observa un comportamiento del nivel muy similar al observado en el tiempo anterior, pero la formación de ondas con pequeñas amplitudes tendió a disminuir.

Se pudo notar en la serie de imágenes expuestas anteriormente que al pasar el tiempo de la simulación el flujo tiende a estabilizarse, e igualmente la formación de ondas en la superficie libre tiende a atenuarse, se forman más ondas con pequeña amplitud que con grande amplitud, también se pudo notar que el fluido solo rebasa la línea de nivel en las zonas adyacentes a las paredes angostas y por otro lado, en las Zonas II y VII el fluido tiene su valor más bajo de oscilación y por lo general, este nunca rebasa los -6 mm con respecto a la línea de referencia.

La Fig. 4.56 muestra las gráficas de velocidad obtenidas a 10 mm por debajo de la superficie libre en el plano de simetría longitudinal ($Z=0$). Se puede notar que efectivamente el flujo tiende a estabilizarse alrededor del tiempo de 70 s estadístico, la velocidad máxima alcanzada ronda los 0.25 m/s en los límites entre la Zona I y la mitad de la Zona II, justo en estos lugares, el nivel alcanzo su oscilación máxima en la parte derecha del molde, un fenómeno similar ocurrió en la parte izquierda del molde (Zonas VIII y VII), pero las velocidades obtenidas fueron menores en los tiempos iniciales (30 y 40 s).

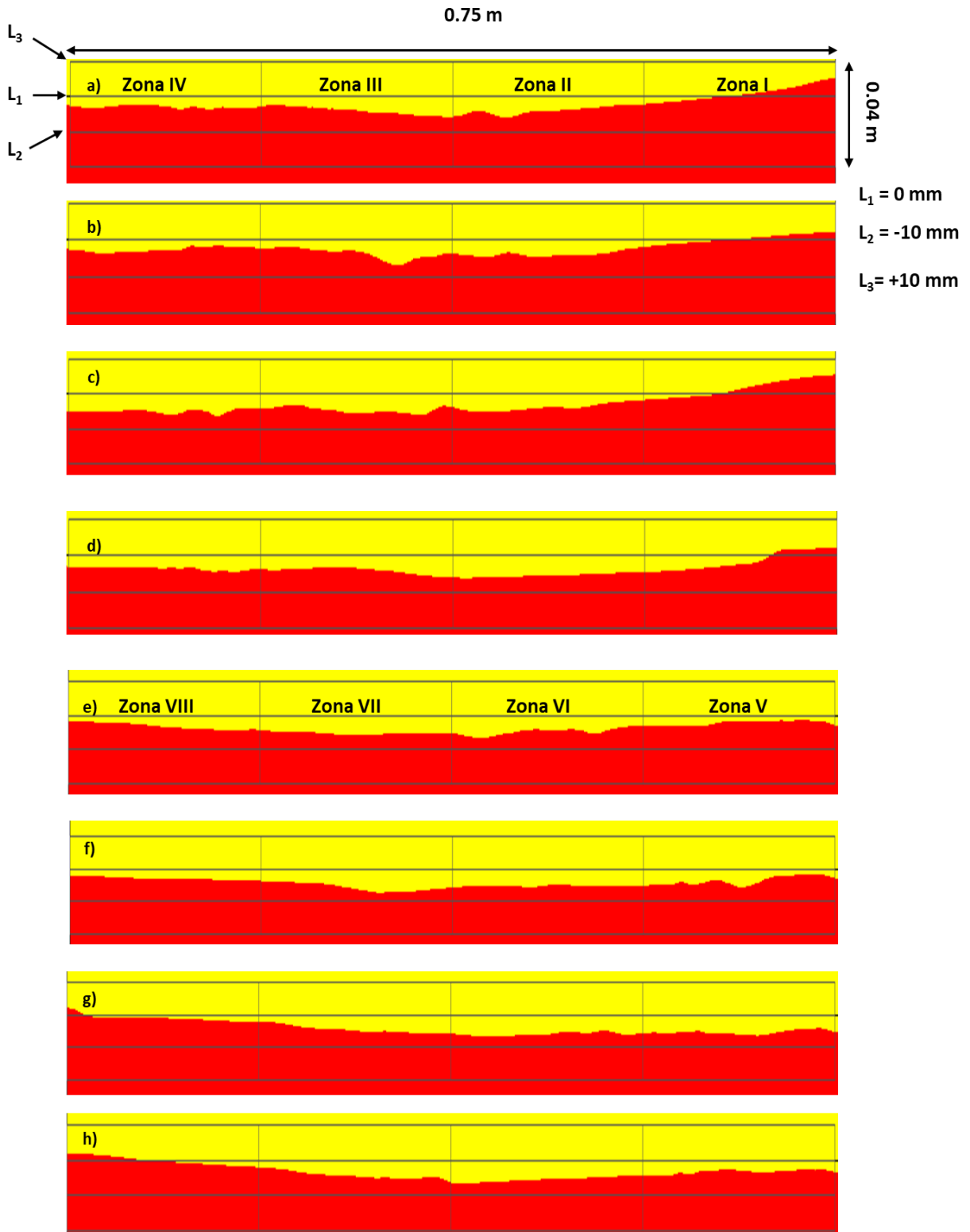


Fig. 4.55. Contornos de Fases, oscilaciones de nivel en la superficie libre en la pared frontal del molde a diferentes tiempos. Zona Derecha e Izquierda.

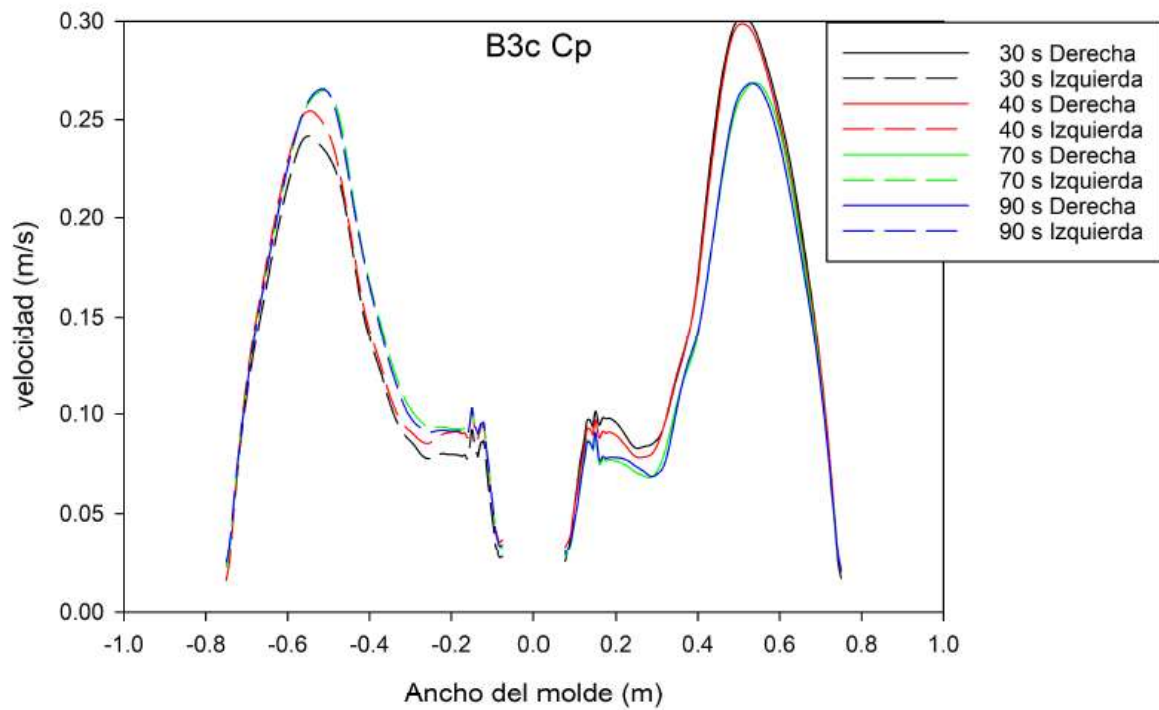


Fig. 4.56. Gráfica de velocidad a 1 cm por debajo de la superficie libre en el plano longitudinal ($Z=0$) obtenida mediante simulación matemática.

Conclusiones.

Se usaron dos técnicas de modelación de flujo de fluidos (modelación física y CFD) para caracterizar la dinámica de fluidos en un molde para planchón convencional a escala 1:1 con condiciones de operación fijas, una velocidad de colada de 1 m/min y una profundidad de inmersión de la buza de 0.150 m. Después se propuso un modelo de buza disipativa mediante CFD y finalmente se validó dicho modelo mediante la construcción y puesta en marcha del prototipo en el molde. Dicho prototipo tuvo como finalidad principal coadyuvar a obtener un mejor producto final, disminuyendo en lo posible la aparición de defectos en la colada que están estrechamente relacionados con la fluido dinámica dentro del molde. En base al análisis realizado en los párrafos anteriores se llegó a las siguientes conclusiones.

1. Se obtuvieron dos buzas disipativas de energía cinética turbulenta. Dichas buzas disiparon su energía en el interior de esta debido a que en su recorrido hacia los puertos de descarga se promovió la mezcla del fluido en sus cámaras, permitiendo así distribuir la velocidad en los tres ejes cartesianos de la misma al salir de por los puertos.
2. La Buza B3c Cp cruceta produjo un campo de fluido bastante simétrico al interior del molde, los chorros de la buza conservaron su inclinación en casi todo el molde, produjo las menores oscilaciones de nivel en la superficie libre, así como también se disminuyó la velocidad del flujo en esta zona, por lo tanto, aunque aparecieron más vórtices, ninguno de estos representa peligro para el arrastre de escoria hacia el interior del molde. El flujo que circula en las paredes angostas también disminuyó en su velocidad disminuyendo así el posible desgaste de la costra recién solidificada, también disminuyeron todas las velocidades en el interior del molde en relación al caso de la buza convencional (Bc Cp).
3. La Buza B3c Cp produjo menores velocidades en la casi toda la superficie libre del molde en relación a la buza convencional. También, se observaron menor rango promedio de oscilación. Se promovió un posible desarrollo de la costra recién solidificada al incrementarse el punto de impacto del chorro y mantenerse una velocidad similar al caso base. El chorro que produce esta buza tiende a fluctuar, pero la energía se disipa al generarse mayores recirculaciones de flujo en el molde.
4. Las buzas disipativas generan oscilaciones de nivel con bajas amplitudes en comparación a las grandes amplitudes que genero la buza convencional. La

buza B3c Cp cruceta tuvo rangos de oscilación de +10 mm a -3 mm, la buza B3c Cp fue de +8 a -7 mm y la buza Bc Cp de +10 a -10 mm.

5. Las buzas disipativas generaron menores velocidades en la superficie libre. La B3c Cp cruceta tuvo en promedio velocidades de 0.075 m/s, la buza B3c Cp fue de 0.09 y la buza convencional de 0.11 m/s.
6. Con las buzas disipativas se disminuyeron bastante las zonas de baja velocidad localizadas en las esquinas del molde y también el flujo alrededor de la buza e incluso bajo la velocidad del flujo que impacta la carcasa en el interior del molde, con esto se espera que el material refractario tenga una vida útil más larga.
7. La buza convencional tiende a generar un campo fluido dinámico bastante asimétrico y oscilatorio, el chorro impacta con bastante velocidad las paredes y pudiera promover un posible desgaste de la costra recién solidificada, el flujo siempre estuvo cargado hacia el lado derecho del molde y las zonas de baja velocidad en las esquinas del molde eran bastante grandes, además que los vórtices observados eran los más grades y que duraron más tiempo, posibilitando así el posible arrastre de escoria.
8. En relación a la buza con y sin piscina, se observó que la piscina promueve la disipación de energía y también ayuda a disminuir el retro flujo. También, la piscina provoco que el chorro se levante ligeramente, cambiando así su inclinación, desperdiciando parte del ángulo dado al puerto de la buza.
9. Se encontró buena concordancia entre los resultados obtenidos mediante la técnica del PIV y la dinámica de fluidos computacional. Por lo que se concluyó que el algoritmo empleado es capaz de simular con buena precisión los resultados obtenidos de la técnica PIV.

Recomendaciones.

Cuando se utiliza la técnica del PIV y se requiere realizar modelación numérica (CFD) la literatura recomienda usar el modelo de turbulencia LES, sin embargo, no advierten que dicho modelo ocupa demasiado tiempo de cálculo y en el caso específico del molde de colada continua, se requieren por lo menos 8 a 10 minutos de simulación, por lo que dichos resultados consumirán al menos dos meses de cálculo en una computadora bastante buena con una malla de alrededor de 1.8 millones de elementos. Dejando de lado la disponibilidad de recursos computacionales, se requiere instrumentar el molde con algunos sensores de oscilación o presión, para poder medir de mejor manera los puntos clave del fenómeno. Además de adquirir o desarrollar software de post procesamiento para agilizar el análisis de resultados. Por otro lado, se necesita utilizar algún otro material transparente y que no refleja la luz, para obtener mejores mediciones con el equipo del PIV al utilizar la buza disipadora con cámaras rómbicas.

En los resultados presentados párrafos arriba, se mostró que la buza disipativa diseñada puede funcionar a velocidades de colada superiores a la actual por lo que haría falta evaluarla a diferentes profundidades para ver su desempeño en el molde. Además, sería conveniente realizar la simulación con el modelo de rastreo de partículas activado para ver el porcentaje de remoción de inclusiones que tiene la buza, y también con el modelo de energía y solidificación activados, para tener un mejor panorama del funcionamiento integral de dicha buza dentro del molde a fin de evaluar la posibilidad de construirla y realmente ponerla en operación dentro de la industria, obviamente también se necesita realizar la simulación fluido-estructura para evaluar el desgaste del material refractario y los esfuerzos mecánicos inducidos por el flujo de fluidos dentro y fuera de la buza.

Finalmente, en una búsqueda de mejora permanente se sugiere realizar un estudio más detallado de la buza con piscina y sin piscina a fin de eliminarla en un posible diseño posterior, debido a que la actual piscina tiende a levantar el chorro, desperdiciando parte del ángulo dado en el puerto de descarga. También habría que eliminar por completo el retro flujo en el puerto de la buza y modelar el comportamiento del chorro al salir por un puerto cuadrado o un puerto hexagonal con ángulo de giro para provocar un que el chorro tenga altas velocidades radiales y transversales.

Referencias Bibliográficas.

1. Infografía de la Industria del Acero en México, “CANACERO”, agosto 2022. (Online). Disponible.
2. Fady M., and et al., “Numerical Study of Steady Turbulent Flow through Bifurcated Nozzles in Continuous Casting” *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 26b, pp. 749-765, 1995.
3. Anupal Sen and et al., “Designing of Sub-entry Nozzle for Casting Defect-free Steel”, *4th National Conference on Processing and Characterization of Materials, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 75, 2015.
4. Real. C.-A, Miranda R., Hoyos L., and et al., “Numerical Evaluation of a Submerged entry Nozzle for Continuous Casting of Steel” *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 19, pp. 179-188 2012.
5. Real C.A, Miranda R., Carvajal I., and et al., “Hydrodynamic Study of a Submerged Entry Nozzle with Flow Modifiers”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 48b, pp. 1358-1375, 2016.
6. Hernandez C.-A., Barron M.-A., Miranda R., “Anchor-Shaped Design of a Submerged Entry Nozzle for the Continuous Casting of Steel”, *Open Journal of Applied Sciences*, Vol. 6, pp. 593-600, 2016.
7. Miranda R., Barron M.-A., Hernandez C.-A., “Velocity Monitoring of Steel in a Continuous Casting Mold using Three Submerged Entry Nozzle Designs”, *Modeling and Numerical Simulations of Material Science*, Vol. 6, pp. 59-68, 2016.

8. González J., Real-R. C.A, Miranda R., and et al. “Numerical and Physical Parametric Analysis of a Sen with Flow Conditioners in Slab Continuous Casting Mold” *Arch. Metall. Mater.* Vol. 62, No. 2, pp. 927-946, 2017.
9. Ramirez-L. P., and Morales R., “Self-similarity Phenomena of Discharge Jets in Conventional Slab Mould”, *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 33, No. 2, pp. 157-168, 2006.
10. Solorio D. G., Morales R., Barreto-S. J.J., and et al., “Numerical Modelling of Dissipation Phenomena in a New Ladle Shroud for Fluidynamic Control and Its Effect on Inclusions Removal in a Slab Tundish”, *Steel Research International*, Vol. 84, No. 9999 pp. 1-12, 2013.
11. Brian G.T. and et al., “Validation of Fluid Flow and Solidification Simulation of a Continuous Thin Slab Caster,” *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes*, Vol. IX, pp. 769–776, Aug. pp. 20-25, 2000.
12. D.F. Wu and S.S. Cheng, ” Effect of Sen Design on Surface Fluctuation and Solidifying Shell in Slab Mold and its Optimization” *Acta Metall. Sin.* Vol. 21, pp. 341-350, 2008.
13. Ruiz-C. C.O., “Modelación Física y Matemática del Flujo Transitorio en la Interface Metal-Escoria del Molde de Colada Continua” Tesis para Obtener el grado de Maestría, Posgrado en Metalurgia, *Instituto Tecnológico de Morelia*, Morelia Mich., 2012.
14. Garcia H. S., Morales D. R., Barreto J.J. and et al.,” Numerical Optimization Fluidynamics by Crontoling Backflow in a Continuous Casting Slab Mold”, *ISIJ International*, Vol. 53. No. 10, pp. 1794-1802, 2013.

15. Mizobe A., Kurisu A., and Ueki M., "Computer Analysis of Molten Steel Flow and Application to Design of Nozzles for Continuous Casting System", *Appl. Theory Compute. Technol.* Vol. 2, No. 4, pp. 35-63, 2017.
16. Mizobe A. and Ueki M., "Design of nozzle for steel continuous casting system based on flow analysis II –Submerged entry nozzle (SEN)-", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 12, No. 6, 2018.
17. Chaudhary R., Go-Gi L., Brian. G. T., and et al., "Transient Mold Fluid Flow with Well-and Mountain-Bottom Nozzles in Continuous Casting of Steel", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 39B, pp. 870-884, 2008.
18. Calderón-R I., Morales R.D., "Influence of Turbulent Flows in the Nozzle on Melt Flow Within a Slab Mold and Stability of the Metal–Flux Interface", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 47B, pp. 1866-1881, 2016.
19. Calderón R. and R. Morales, "The Role of Submerged Entry Nozzle Port Shape on Fluid Flow Turbulence in a Slab Mold", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 46B, pp. 1314-1325, 2015.
20. Salazar C. M.M., Morales R.D., y cols., " A Physical Model to Study the Effects of Nozzle Design on Dispersed Two-Phase Flows in a Slab Mold Casting Ultra Low-Carbon Steels" *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018.
21. Rajat K. D. and et al., "Numerical Investigation of Interfacial Fluctuation with turbulence Effects in Casting Mold due to Submerged Entry Nozzle", *International Journal of Current Research and Academic Review*, Vol. 2, No. 5, pp. 98-107, May-2014.

-
22. Liquid J., Cheng J, and Shen H., “Experimental Research on the Flow Instability and Level Fluctuation in Continuous Thin Slab Casting Mold”, *Metallurgical Research Technology*, Vol. 114, pp. 103-112, 2017.
23. Ren L., Ren Y., Zhang L. and Yang J., “Investigation on Fluid Flow inside a Continuous Slab Casting Mold Using Particle Image Velocimetry”, *Steel Research International*, Vol. 90, pp. 1-11, 2019.
24. Kasai, N. and Iguchi M., “Water Model Experimental Melting Powder Trapping by Vortex in the Continuous Casting Mold”, *ISIJ International*, Vol. 47, pp. 982-987, 2007.
25. T. Kouji and et al., “Effects of Electromagnetic Brake and Meniscus Electromagnetic Stirrer on Transient Molten Steel Flow at Meniscus in a Continuous Casting Mold”, *ISIJ International*, Vol. 43, No. 6, pp. 915-922, 2003.
26. Zhongqui L. and et al., “Large Eddy Simulation of Transient Flow and Inclusions Transport in Continuous Casting Mold under Different Electromagnetic Brakes”, *The Minerals, Metals, and Material Society*, Vol. 68, No. 8, pp. 2180-2190, 2016.
27. Zhuang L., W. Engang, y and et al., “Influence of SEN Depth and Port Angle on Vertical Electromagnetic Brake Effects in Continuous Casting Mold”, *International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 445-457, 2017.
28. Xu L., Engang W., Karcher C., and et al., “Numerical Simulation of the Effects of Horizontal and Vertical EMBr on Jet Flow and Mold Level Fluctuation in Continuous Casting”, *Metallurgical And Materials Transactions B*, 2018.

-
29. Kubota M and et al., "Meniscus Flow Control in the Mold by Travelling Magnetic Field for High-speed Slab Caster" *Mold Operation for Quality and Productivity*, edited by A.W. Cramb and E. Szekeres, Iron & Steel Society, Warrendale, Pa., 1991.
 30. Jin K, Surya P., Vanka, Brian G.T., "Large Eddy Simulations of the Effects of EMBr and SEN Submergence Depth on Turbulent Flow in the Mold Region of a Steel Caster", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 48B, pp. 162-178, 2017.
 31. Zhan Y., Zheng-Q. Zhang and Zhong-M. Ren, "Effect of Flow Control Mold on Field During high-Speed Continuous Casting", *Shanghai University and Springer-Verlag GmbH Germany*, 2017.
 32. Toscano R. G., and Dvorkin E. N., "Modelado Termo-Mecánico del Proceso de Colada Continua de Planchones de Acero", *Mecánica Computacional*, Vol. 21, pp. 2651-2674, Oct. 2002.
 33. Tsukaguchi Y., and et al., "Design of Swirling Flow Submerged Entry Nozzles for Optimal Head Consumption between Tundish and Mold", *ISIJ International*, Vol. 47, pp. 1436-1443, 2007.
 34. Sengupta J., Brian.G. T., Shin H. J., Lee G. G., and Kim S. H., "A New Mechanism of Hook Formation during Continuous Casting of Ultra-Low-Carbon Steel Slabs." *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 37A, No.5, pp. 1597-1611, 2006.
 35. Emling W.H., Waugaman T.A., Feldbauer S.A., and Cramb A.W., "Subsurface Mold Slag Entrainment in Ultra Low Carbon Steels." *Steelmaking Conference Proceedings*, The Iron and Steel Society, Vol. 77 pp. 371-379, 1994.

36. Torres E., “Efecto de la Buza de Alimentación Sobre las Oscilaciones del Acero en el Molde de Planchón Delgado”, Tesis de Doctor en Ciencias en Metalurgia y Materiales, *Instituto Politécnico Nacional*, Posgrado en Metalurgia y Materiales, pp. 20 – 35, 2008.
37. Cengel Y. A., *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*, Mc Graw Hill Education, pp. 380-382, 2006.
38. Lomaz H., Pulliam T. H., “Fundamentals of Computational Fluid Dynamics”, *Springer Verlag, EUA.*, 2001.
39. Fernández Oro J. M., Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos, Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el método de Volúmenes Finitos, *Editorial Reverte, Barcelona España*, pp. 58-122, 2012.
40. Murthy Y. J., “Numerical Methods in Heat, Mass, and Momentum Transfer”, *School of Mechanical Engineering, Purdue University*, 2002.
41. Menter F.R., *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 269–89, 1994.
42. Xincheng M., and et al. "Effect of an electromagnetic brake on the turbulent melt flow in a continuous-casting mold." *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 43, No. 4, pp. 954-972, 2012.
43. Asad A., Kratzsch C., and Schwarze R., “Numerical Investigation of the Free Surface in a Model Mold” *Steel Research International*, Vol. 86, No. 9999, pp. 1-10, 2015.
44. Kai J., Surya P., Vanka, Brian. G. T., “Large Eddy Simulations of the Effects of EMBr and SEN Submergence Depth on Turbulent Flow in the Mold Region

- of a Steel Caster”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 48b, pp. 162-178, 2017.
45. Cedillo V. y Morales R.D., “Biased Flows in Slab Molds Induced by Slide Gates. Part I: Experimental Measurements and Flow Simulation”, *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 45, No. 3, pp. 204-214, 2018.
46. Ramos B. A., Sánchez P., Demedices G., L. y cols. “Mathematical Simulation and Physical Modeling of Unsteady Fluid Flows in a Water Model of a Slab Mold”. *Metallurgical Materials Transactions B*, Vol. 35, pp. 449-460, 2004.
47. Smagorinsky J. *Monthly Weather Rev.*, Vol. 91, pp. 99-165, 1963.
48. Fluent 6.3 User’s Guide, Fluent Inc., Lebanon, N.H., USA, 2006, Modeling Multiphase Flows, VOF
49. Chiapparoli W., and et al., “Estudio en Modelo de Agua del Efecto del Ancho de Molde, Velocidad de Colada y Profundidad de Inmersión de Buza” *Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais*, Vitória, 2000.
50. He, Q. “Observations of Vortex Formation in the Mold of a Continuous Slab Caster.” *ISIJ International*, Vol. 33, No. 2, pp. 343- 345, 1993.
51. Gebhard M., and et al., “Vortexing Phenomena in Continuous Slab Casting Moulds.” *Steelmaking Conference Proceedings, The Iron and Steel Society*, Vol. 76, pp. 441-446, 1993.
52. Gupta D. and Lahiri A. K., “Water-Modeling Study of the Surface Disturbances in Continuous Slab Caster.” *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 25B, No. 2, pp. 227-233, 1994.

53. Teshima T., Kubota M., Susuki M., et al., Tetsu-to-Hagan A, Vol. 79, No. 5, pp. 576-582, 1993.