



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIGALGO

INTITUTO DE INVESTIGACIONES METALURGICAS

**“SIMULACIÓN FÍSICA Y MATEMÁTICA DEL
COMPORTAMIENTO DE LAS INCLUSIONES
EN UN MOLDE DE COLADA CONTINUA DE
PLANCHÓN DELGADO”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES**

PRESENTA:

CARLOS ALBERTO ESPINOSA CORTEZ

ASESOR:

DR. GERARDO BARRERA CARDIEL

Doctor en Física

MORELIA, MICHOACAN, FEBRERO DEL 2014



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Gerardo Barrera por su apoyo durante mi estancia en la Maestría, para poder adquirir nuevos conocimientos y contribuir en mi formación profesional.

Agradezco a mis padres que fueron mi fuerza para seguir en mi preparación profesional y humana. Por siempre tener palabras de aliento que nunca me dejaron caer y motivaban mi camino.

Agradezco mis hermanos (Eduardo, Alejandra, Brenda y Karen) por su ejemplo que me motiva a siempre dar lo mejor de mí.

Agradezco a Luisa Herrera por que durante gran parte de la maestría fue el motor y las ganas de ser alguien mejor en la vida, de seguir luchando por objetivos y sueños.

A mi mesa de sinodales que contribuyeron en mi continuo aprendizaje durante el posgrado.

DEDICATORIA

“A mis Padres y mis Hermanos, que son toda mi vida.”

“A Luisa Herrera, que deslumbró mi corazón... ¡Ya hace más de 6 años!”

A Irma Becerril, por su coraje y a José Espinosa, por haber compartido siempre su sabiduría.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I	
1.1 Introducción	13
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Hipótesis	14
CAPÍTULO II	
2.1 Revisión y discusión del estado del arte	15
CAPÍTULO III	
3.1 Equipos y materiales	21
3.2 Metodología	21
3.2.1 Modelo matemático	21
3.2.2 Modelo de fase discreta	22
3.2.2.1 Saffman's lift force	23
3.2.2.2 Modelo discreto random walk	23
3.2.3 Consideraciones del modelo	25
3.2.4 Modelación de flujo de fluidos	25
3.2.5 Flujo de fluidos en la Buza	26
3.2.6 Flujo en el molde	27
3.2.7 Profundidad de inmersión de Buza	27
3.2.8 Análisis teórico	28
3.2.9 Criterios de similitud	29
3.2.10 Desarrollo de modelos con agua	31
3.2.11 Diseño y construcción del modelo	33
3.3 Escalamiento de inclusiones	34
3.4 Preparación de las inclusiones	39
3.4.1 Molienda	40
3.4.2 Tamizado	40
3.4.3 Impregnación de líquidos penetrantes de las inclusiones	42
3.5 Preparación del equipo para obtención de imágenes	42
3.6 Monitoreo de vibraciones	43
3.7 Procesamiento de datos	46
3.8 Experimentación	46
3.8.1 Simulación física	47
3.9 Procesamiento de imágenes	52
CAPÍTULO IV	
4.1 Resultados	53
4.1.1 Partículas	53
4.1.2 Digitalización de las señales del acelerómetro	61

4.1.3 Simulación física.....	66
4.1.4. Simulación matemática.....	72
4.1.5 Validación del modelo matemático.....	81
4.1.6 Correlación de los niveles de vibraciones con la eliminación de inclusiones.....	84
4.2 Aportaciones y originalidad del trabajo.....	87
CAPÍTULO V	
5. Conclusiones.....	88
RECOMENDACIONES VI.....	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS VII.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diseño de buza utilizada en los experimentos de Meratian y Hadjari.....	16
Figura 3.1. Esquema de las partes más importantes del distribuidor y el molde.....	27
Figura 3.2. Dimensiones del modelo físico del sistema molde tipo embudo-buza de planchón delgado.....	33
Figura 3.3. Esquema del recipiente receptor del agua proveniente del molde.....	35
Figura 3.4. Relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua para diferentes valores de escala.....	36
Figura 3.5. Relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua en un modelo a tercera escala para diferentes valores de γ	37
Figura 3.6. Instalación de focos de luz obscura.....	43
Figura 3.7. Detalles del molde y buza de un modelo de colada continua de PD.....	44
Figura 3.8. Equipo para la adquisición de vibraciones.....	45
Figura 3.9. Zona donde se colocó el transductor.....	45
Figura 3.10. Diagrama del funcionamiento del Modelo físico.....	46
Figura 3.11. Programación gráfica de la fase de conversión de señales.....	50
Figura 3.12. Interfaz gráfica de la adquisición de datos.....	51
Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula de 60 μm	53
Figura 4.2. Distribución de tamaño de partícula de 110 μm	55
Figura 4.3. Distribución de tamaño de partícula de 177 μm	56
Figura 4.4. Distribución de tamaño de partícula de 250 μm	57
Figura 4.5. Diámetro de tamiz.....	59
Figura 4.6. Imagen de inclusiones obtenidas por el SEM.....	60
Figura 4.7. Diámetro de Feret.....	60

Figura 4.8. Trazo de ejes para el cálculo del diámetro de Feret.....	61
Figura 4.9. Magnitud de las vibraciones en función del flujo volumétrico.....	62
Figura 4.10. Relación de velocidad y nivel de energía en el modelo.....	63
Figura 4.11. Relación de la velocidad con respecto a la pared del modelo.....	63
Figura 4.12. Comparación de los niveles de vibraciones a las diferentes velocidades de colada continua.....	64
Figura 4.13. Comparación de los niveles de vibraciones en el punto tres a 6 m/min.	65
Figura 4.14. Inclusiones de 250 μm (modelo) a un tiempo de 1.5 segundos.....	66
Figura 4.15. Inclusiones de 250 μm (modelo) a un tiempo de 4 segundos.....	67
Figura 4.16. Inclusiones de 250 μm (modelo) a un tiempo de 9 segundos.....	67
Figura 4.17. Inclusiones de 250 μm (modelo) a un tiempo de 20 segundos.....	68
Figura 4.18. Inclusiones de 250 μm (modelo) a un tiempo de 40 segundos.....	69
Figura 4.19. Inclusiones de 250 μm (modelo) atrapadas en la capa de escoria.....	69
Figura 4.20. Inclusiones de 250 μm (modelo) atrapadas en la zona cercana a la pared del molde.....	70
Figura 4.21. Adelgazamiento de la capa de escoria cercana a las paredes del molde.....	70
Figura 4.22. Comparación del porcentaje de eliminación de inclusiones a 22 cm de inmersión de buza.....	71
Figura 4.23. Comparación del porcentaje de eliminación de inclusiones a 34 cm de inmersión de buza.....	72
Figura 4.24. Trayectoria de partículas de 150 μm donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de	

buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 4 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.73

Figura 4.25. Trayectoria de partículas de 150 μm donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 5 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.75

Figura 4.26. Trayectoria de partículas de 150 μm donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 4 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.76

Figura 4.27. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 4 m/min.77

Figura 4.28. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.78

Figura 4.29. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 6 m/min.78

Figura 4.30. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 6 m/min.79

Figura 4.31. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.80

Figura 4.32. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.80

Figura 4.33. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 4 m/min.81

Figura 4.34. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 5 m/min.82

Figura 4.35. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 6 m/min.....	82
Figura 4.36. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 4 m/min y 34 cm de inmersión de buza.....	83
Figura 4.37. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 5 m/min y 34 cm de inmersión de buza.....	83
Figura 4.38. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 6 m/min y 34 cm de inmersión de buza.....	84
Figura 4.39. Comparación de los niveles de vibraciones a 4,5 y 6 m/min.....	85
Figura 4.40. Comparación de los niveles de vibraciones a 4,5 y 6 m/min.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Propiedades físicas del agua a 293 k y del acero a 1873 k.....	32
Tabla II. Parámetros para el cálculo de las inclusiones modelo.....	38
Tabla III. Correspondencia de inclusiones prototipo y modelo.....	39
Tabla IV. Mallas utilizadas para la clasificación de las partículas.....	41
Tabla V. Parámetros a utilizar en la simulación.....	47
Tabla VI. Diámetro, radio, volumen de las inclusiones.....	48
Tabla VII. Cantidad de partículas por un gramo.....	49
Tabla VIII. Análisis estadístico para partículas de 60 μm	54
Tabla IX. Análisis estadístico para partículas de 100 μm	55
Tabla X. Análisis estadístico para partículas de 177 μm	56
Tabla XI. Análisis estadístico para partículas de 250 μm	58
Tabla XII. Resultados conseguidos de las partículas obtenidos por SigmScan Pro.....	61

RESUMEN

Debido al gran impedimento que presenta el analizar la remoción de inclusiones en el acero a altas temperaturas durante el proceso de colada continua y la imposibilidad de colocar sensores dentro del molde, la simulación matemática y física, así como el análisis de vibraciones, son herramientas útiles que pueden entregar información medible de la cantidad de energía en el molde y dar a conocer la forma en la que la hidrodinámica en el molde influye en la eliminación de las inclusiones.

Se ha podido encontrar que el acelerómetro es un transductor capaz de relacionar el nivel de vibraciones con el comportamiento de las inclusiones en un molde de colada continua. Indicando que a mayores niveles de vibraciones dentro del molde de planchón delgado mayor será la remoción de inclusiones dentro del mismo.

En cuanto al análisis del comportamiento de las inclusiones, se ha observado que la tendencia de las partículas es de ser llevadas al fondo del modelo cuando se aumenta la velocidad de colada, esto debido a la oscilación de los chorros que presenta la buza original ocasionando que la interface (escoria-metal) fluctué de manera constante.

En esta etapa experimental el uso de la buza original ha ayudado como herramienta para mejorar y hacer las modificaciones pertinentes a la buza propuesta para controlar parámetros indispensables en el atrapamiento de las inclusiones. Se han observado cambios en los patrones de flujo, en el molde y la disminución de la oscilación de los chorros provenientes de los puertos de la buza, además de poca fluctuación de la superficie. Lo anterior, conlleva a una mayor recuperación o eliminación de inclusiones hacia la capa de escoria (capa de polvo lubricante).

La zona cercana de la buza presenta una mayor concentración de partículas, lo cual es debido a la baja velocidad o cambio de patrón de flujo en dicha zona. Estas inclusiones que se quedan flotando en esta zona finalmente llegarán a ser removidas y atrapadas en la capa de escoria.

Palabras Claves: Buza, simulación matemática y física, inclusiones, escoria, velocidad de colada, acelerómetro y molde de colada continua.

ABSTRACT

Due to the great impediment to perform an analysis of the removal of inclusions in steel at high temperatures during the continuous casting process and the inability to place sensors inside the mold, the mathematical and physical simulation and vibration analysis is a useful tool that can deliver information measurable the amount of energy into the mold and to show the way in which hydrodynamic in the mold influences the elimination of inclusions.

It has been found that the accelerometer is a transducer capable of relating the vibration with the behavior of the inclusions in the continuous casting mold. Indicating that higher levels of vibration in the thin slab mold is greater the removal of inclusions therein.

For analysis of the behavior of the inclusions , it was observed that the tendency of the particles is to be taken to the bottom of the model when the casting speed is increased, this due to the oscillation of the jet having the original nozzle causing interface (slag-metal) fluctuate constantly.

In this experimental phase using the original nozzle has helped as a tool to improve and make appropriate modifications to the nozzle to control essential parameters given in the entrapment of inclusions. There were changes in the flow patterns in the mold and the decay of the oscillation of the jet from the nozzle ports, plus the surface little fluctuation. This entails better recovery or removal of inclusions into the slag layer (layer of lubricant powder).

The area near the nozzle has a greater concentration of particles, which is due to low speed or flow pattern change in said zone. These inclusions are floating in this area eventually become stripped and trapped in the slag layer.

Keywords: Nozzle, mathematics and physics simulation, inclusions, slag, casting speed, accelerometer and continuous casting mold.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

La tendencia en la industria del acero es el desarrollo de equipos y procesos de colada continua de acero que lleven al acero líquido lo más cerca posible al tamaño del producto final. La colada continua de planchón delgado permite la laminación en caliente directa en línea con solamente algunos pasos finales hasta el producto final, eliminando la necesidad del tren de laminación tradicional. En la actualidad, los métodos convencionales para la eliminación de las inclusiones de un acero se basan en la utilización, entre otras, de las fuerzas boyantes cuando se agita el acero con gases inertes en la etapa de refinación secundaria. Este método, sin embargo, no funciona bien para inclusiones en el orden de micrómetros, por lo que la velocidad terminal de las inclusiones depende de su volumen y se requieren de tiempos de procesamiento más largos para la eliminación de éstas.

El presente trabajo de investigación está orientado a analizar el comportamiento de las inclusiones en un molde de colada continua de planchón delgado, tipo embudo, y observar si en esta etapa aún existe la posibilidad de eliminarlas. Se hace uso de la simulación física y matemática con dos diferentes geometrías de buzas. Los parámetros estudiados; velocidades de colada y profundidad de la buza y se ha observado que eliminan hasta un máximo posible las oscilaciones de los chorros y las fluctuaciones de la superficie del acero en el molde. Estos dos fenómenos son un indicador del comportamiento de la interfase acero-polvos lubricante así como la estabilidad de la interfase antes mencionada, ya que si ésta es muy inestable puede llegar a romperse la capa de escoria y como consecuencia arrastre de polvo hacia el seno de metal incrementando el contenido de inclusiones y deteriorando la calidad del acero.

1.2 Justificación

Debido a la dificultad inherente de llevar a cabo observaciones directas del comportamiento de la dinámica de flujo de acero líquido y de las inclusiones en el proceso de fabricación de acero mediante la colada continua, los modelos físicos con agua han sido una ayuda invaluable para el conocimiento de los fenómenos de flujo de fluido y poseen una gran popularidad y aceptación desde mediados del siglo XX.

En años recientes muchos investigadores se han dado a la tarea de llevar a cabo diversos estudios, tanto físicos como matemáticos, para el análisis del flujo de fluidos y el comportamiento de las inclusiones en acero líquido en el interior de moldes de colada continua. Sin embargo, prácticamente la totalidad de estas investigaciones se han centrado en moldes de colada continua de planchón convencional. A la fecha, existe muy poca información disponible en la literatura con relación al comportamiento de las inclusiones en el proceso de colada continua de planchón delgado, y especialmente con relación del flujo de acero e inclusiones en el interior del molde tipo embudo.

1.3 Objetivos

- Simular el comportamiento de las inclusiones en un molde de colada continua de planchón delgado con dos diferentes diseños de buzas.
- Cuantificación de inclusiones a través del análisis de imágenes.
- Identificar los parámetros óptimos de velocidades de colada y profundidad de buza que lleven a una mayor eliminación de inclusiones.
- Estudiar la relación que existe entre la energía producida por las fuerzas boyantes del acero y las vibraciones del molde de colada continua, monitoreadas con un acelerómetro, como método para predecir la eliminación de inclusiones.
- Simular el comportamiento de las inclusiones por medio de la simulación matemática para tener un punto de comparación con respecto a la física.

1.4 Hipótesis

Con los nuevos parámetros de rediseño de la buza, profundidad de la misma y velocidades de colada se podrá lograr una mayor eliminación de inclusiones en el seno del acero líquido y lograr que éstas queden atrapadas en la capa de polvo lubricante (escoria).

CAPÍTULO II

2.1 Revisión y discusión del estado del arte

En esta parte de la investigación se hará mención de los trabajos científicos de mayor relevancia en cuanto a la visualización del comportamiento de las inclusiones, que es la parte fundamental del estudio de este trabajo, tanto en planchón convencional como en planchón delgado. Se buscará ver la relevancia de los mismos y hacer una discusión de la trascendencia que pueden tener para el trabajo de investigación que se está realizando. Como ya se ha mencionado, la parte del flujo de fluidos es la base para poder hacer las simulaciones de las inclusiones. Por lo que la primera parte de la discusión del estado del arte abordará el tema en cuestión.

M. Meratian y A. Hadjari [9] construyeron un modelo físico a escala completa de un sistema de colada continua de planchón delgado con un diseño de buza (SEN; Submerged Entry Nozzle) con cuatro orificios. Con base a los números adimensionales de Reynolds y el criterio de similitud de Froude, el flujo del fluido en un modelo de escala completa es similar al de un sistema real y, por lo tanto, los datos obtenidos a partir del modelo de agua pueden ser aplicados al sistema real. Con el fin de determinar los parámetros operacionales óptimos, varios experimentos fueron llevados a cabo bajo diferentes condiciones de colada. Los resultados mostraron que el diseño de la buza de cuatro agujeros conduce a un patrón de flujo especial, generando recirculaciones de flujo para cada uno de los orificios. También demostraron que el aumento de la velocidad de colada y de la inyección de gas resultó en una turbulencia de la superficie. Para poder evitar la turbulencia de la superficie y los problemas relacionados con colada, recomendaron profundidades del SEN de 30 y 40 cm para velocidades de colada de 3.5 y 4.5 m/min, respectivamente.

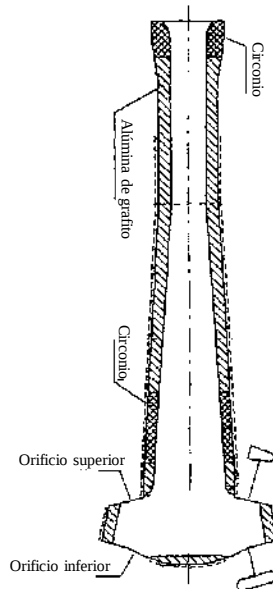


Figura 2.1 Diseño de buza utilizada en los experimentos de Meratian y Hadjari.

El diseño de buza que se muestra en la Fig. 2.1 permite ver que hay dos formas en las que el acero líquido puede salir, por los orificios de arriba y abajo. La conclusión a la que ellos llegan es que la salida de acero por los orificios de arriba ayuda a que no se solidifique la superficie. Sin embargo esto acarrea consecuencia que pudieran no ser analizadas ya que al provocar fluctuaciones en la superficie haría que se abriera ésta y se re-oxide el acero, promoviendo la formación de inclusiones.

W. Chiapparoli y colaboradores [10] hicieron un estudio en un modelo de agua escala 1:1 con el objetivo de evaluar la influencia de diferentes condiciones operativas, tales como la velocidad de colada, ancho de molde y profundidad de inmersión de buza. Trabajaron con una buza construida en acrílico y realizaron ensayos con anchos de molde de 1200 y 900 mm, simulando velocidades de colada de 1.6 y 1.3 m/min y con un ancho de molde de 1600 mm con velocidad de 1.3 m/min, en todos los casos con tres diferentes profundidades de buza: 80, 140 y 200 mm, las cuales se midieron desde el nivel del agua hasta el borde superior de las aberturas de las buzas. Encontraron que al aumentar la velocidad de colada, ancho de molde y al disminuir la profundidad de inmersión de buza provocan un incremento la turbulencia de la superficie, generándose una mayor posibilidad de atrapar escoria. Hallaron que la distancia desde el menisco hasta el punto de impacto del chorro sobre la cara angosta, aumenta sobre

todo al incrementarse la velocidad de colada y en menor medida al aumentar la profundidad de inmersión de buza. El ancho de chorro parece ser mayor para la velocidad de colada más alta, con cualquiera de las profundidades de inmersión. También observaron corrimientos del polvo lubricante en los laterales, y atrapamiento del polvo particularmente en la zona cercana a la buza, con mayor frecuencia para la menor profundidad de inmersión. Cabe resaltar que los moldes de colada continua era de planchón convencional.

Y. Murakata y colaboradores [11] llevaron a cabo un experimento en un modelo de agua para simular el comportamiento de las colisiones de partículas en acero líquido. La tasa de colisión de partículas de poliestireno, simulando las inclusiones en el acero líquido fue cuantificada por la observación de las partículas en un flujo turbulento. La tasa de colisión de las partículas contadas por el uso por un método de análisis de imagen se comparó con una tasa de colisión teórica, que se calculó mediante la sustitución de la tasa de disipación de energía turbulenta obtenida en la ecuación de Saffman-Turner. En el rango con mayor velocidad de disipación de energía turbulenta más allá de $0.06 \frac{m^3}{s^2}$, la tasa de colisión observada estaba desviada por encima de los valores teóricos. En vista de esto, la ecuación de Saffman-Turner ha sido modificada para que pueda ser aplicada a un rango con una mayor velocidad de disipación. Sin embargo, este estudio no hace referencia directa de la flotación de inclusiones que es de gran importancia para el trabajo que se está desarrollando, ya que habla de la relevancia que tiene la colisión de las inclusiones para incrementar su volumen. Se sabe que los métodos para eliminar inclusiones no funcionan bien con tamaños más pequeños a los micrómetros debido a que la velocidad terminal depende del volumen.

Y. Sahai y T. Emi [12] encontraron que en los modelos con agua, un modelo a escala reducida no puede satisfacer simultáneamente el criterio de similitud tanto de Reynolds como de Froude. Por lo tanto discuten la importancia y la validez de este criterio. Para la simulación de flotación de inclusiones en modelos con agua, la fuerza gravitacional se convierte en algo muy importante. Ya que la fuerza gravitacional no tiene influencia en el flujo de fluidos en estos sistemas, el número de similitud de Froude es importante solo para situaciones de flujo laminar, por lo tanto se vuelve menos importante para flujos en el molde de colada continua ya que éste es normalmente turbulento. En tales flujos, el número de similitud de Reynolds turbulento se satisface naturalmente mientras se opere bajo éste régimen. Basado en este

análisis, se puede concluir que los modelos a escala reducida pueden proveer suficiente información para caracterizar el flujo del acero fundido en el molde de colada continua.

T. Matsumiya [13] hizo una investigación en relación a los tres mayores temas de colada continua; inclusiones no-metálicas, agrietamiento y segregación. Usando agitación electromagnética (EMS) en el molde la captura de inclusiones, durante el crecimiento inicial de la capa sólida, se ve obstaculizada y el número de éstas cerca de la superficie del planchón se ve reducido. Usando campo magnético débil (LMF) el flujo de líquido descendente inducido por el flujo de salida de la buza sumergida se desacelera bastante y el atrapamiento de las inclusiones grandes dentro del planchón se elimina, pero por otro lado causa defectos internos. La colada Electromagnética (CEM) impide la formación de oscilaciones y la marca de gancho, simultáneamente elimina el atrapamiento de inclusiones y burbujas en la marca de gancho y también impide la formación de la depresión superficial y formación de grietas en la superficie longitudinal en los aceros peritécticos y en los hipoeutectoides. La desventaja principal de estos métodos para la limpieza de los aceros es que son muy caros y aumentan el precio del producto final.

Y. Kwon y colaboradores [14] llevaron a cabo un estudio de un modelo de agua para investigar la dispersión de burbujas y la eliminación de inclusiones por la adhesión de burbujas en el molde de colada continua. El caudal de agua se varió en el intervalo de 37-74 L/min, que es equivalente a 1.0-2.0 m/min la velocidad de colada. El flujo de gas que se varió en el intervalo de 0-2.5 L/min. Cuentas huecas de vidrio recubiertas de plata (SCHG) y partículas de plástico se utilizaron para imitar las inclusiones y para investigar el efecto de humectabilidad, es decir, el ángulo de contacto de las inclusiones con el líquido, en la eliminación de inclusión por adhesión de la burbuja. El efecto de los flujos de gas y agua en la dispersión de burbujas en el molde lo determinaron de forma sistemática. La eliminación de las inclusiones a diferentes caudales de gas y el agua lo determinaron cuantitativamente mediante una cámara fotográfica de alta velocidad que tomó fotos. Se encontró que la capacidad de mojado de las inclusiones con el líquido fue un factor decisivo en la eliminación de inclusiones: con baja capacidad de humectación, es decir, un gran ángulo de contacto, se incrementa la eficiencia de remoción con el incremento de gas y las tasas de flujo líquido,

mientras que la eficiencia de remoción fue poco afectada por el flujo de gas con capacidad de mojado alta, es decir, con un menor ángulo de contacto.

Para interpretar los resultados de los experimentos con los modelos con agua, varios modelos de dinámica de fluidos computacionales (CFD) fueron hechos. Ninguno de ellos fue capaz de representar los resultados experimentales dentro de un rango aceptable. Dos nuevos modelos de CFD, que empleaban un número de Reynolds modificado y la teoría de campo de fuerza alrededor de la burbuja, fueron desarrollados para simular la dispersión de burbujas y la eliminación de inclusiones, respectivamente. Los resultados indicaron que estos modelos pueden simular la dispersión de burbujas y la eliminación de las inclusiones y mostraron una razonable concordancia con los resultados del modelo de agua de colada continua. La única parte negativa de éste estudio, y que no tomaron en consideración, es que la generación de burbujas puede ser contraproducente debido a que sí las burbujas no flotan quedaran atrapadas en las láminas de acero lo que provocaría defectos mecánicos.

B.G. Thomas y colaboradores [16] simularon el movimiento y captura de partículas en un modelo de colada continua usando la aproximación del seguimiento de la trayectoria de Lagrange, que está basado en campos de flujo en función del tiempo obtenidos a partir de simulaciones LES (Large Eddy simulations). Primeramente se llevó a cabo una simulación en un modelo de agua estandarizado de colada continua a escala completa, donde las mediciones fueron realizables. Se simuló el transporte de 15,000 partículas de plástico y su remoción por una pantalla colocada cerca de la superficie superior del molde. El cálculo mostró que en la pantalla de remoción las fracciones de partículas capturadas fueron de $27 \pm 5 \%$ para un tiempo de 0 a 10 segundos y de $26 \pm 2 \%$ para 10 a 100 segundos. El flujo de salida de la buza fue relativamente uniforme, y el dominio del flujo turbulento fue más caótico, por lo tanto la remoción de partículas no depende de su ubicación inicial al ser introducidas en el puerto de la buza. También simularon el movimiento y captura de 40, 000 inclusiones pequeñas (10 a 40 μm) en un modelo de colada continua de planchón delgado. Las partículas se movieron a través del molde con una distribución asimétrica el cual fue causado por flujos turbulentos transitorios en la región inferior de la recirculación, en lugar de las variaciones de entrada en el puerto de la buza. Solo el 8% de estas pequeñas partículas fueron removidas hacia la superficie. Ésta fracción de eliminación fue independiente tanto del tamaño como de la densidad de la partícula, probablemente debido a que todas las partículas simuladas fueron

muy pequeñas como para apartarse significativamente del flujo de fluido circundante. Por último, los resultados de la simulación matemática se procesaron adicionalmente para predecir la distribución final de las partículas impuras en la parte solidificada del planchón delgado después de que una pequeña cantidad de inclusiones entró al modelo. Los resultados de dicho trabajo confirman el importante papel de los transitorios de flujo en el transporte y la captura de partículas durante la colada continua y que puede servir como punto de referencia para futuros modelos simplificados. L. Zhang y colaboradores [17] estudiaron que la obstrucción de la buza sumergida (SEN) es un problema serio durante la colada continua del acero, y su influencia en las operaciones de colada y calidad final del producto. El flujo de fluido relacionado al fenómeno en la región molde de colada continua con la obstrucción SEN se investigaron en el presente artículo, incluyendo la evaluación cuantitativa de la eliminación de las inclusiones, la escoria de arrastre y la transferencia de calor. Los cálculos indican que, con el fin de simular con precisión el flujo de fluido en la región del molde, la SEN debe estar conectada con la región del molde y los dos deben calcularse conjuntamente. Además, toda la región del molde tiene que ser calculada. La obstrucción en la SEN en un lado induce chorros asimétricos de los dos puertos exteriores, por lo que el flujo del fluido en el molde es asimétrico. Asimismo, más inclusiones son transportadas por el flujo a la parte superior de la superficie del lado no obstruido, y el planchón en el lado no propicia una calidad más baja. Con SEN obstruida de un solo lado, las inclusiones recorrer una distancia mucho más grande, en promedio, antes de que escapen desde la parte superior o se muevan a la parte inferior. La fracción de todas las inclusiones arrastradas a la parte superior de la superficie para inclusiones de cualquier tamaño es menor que 10 pct. Una mayor energía de turbulencia y una mayor velocidad superficial induce a un mayor arrastre de inclusiones desde la superficie. Inclusiones pequeñas son más fácilmente arrastradas al interior del acero que las más grandes. Inclusiones mayores a 200µm pueden ser arrastradas en el acero fundido de la escoria con obstrucción que sin obstrucción. La obstrucción unilateral de la buza sumergida no solo genera una distribución de la temperatura asimétrica en el molde, sino que también genera temperaturas más altas que las temperaturas de liquidus en algunos lugares de la capa solidificada, lo cual aumenta el riesgo de fracturas. La obstrucción SEN debe reducirse al mínimo con el fin de lograr una la limpieza uniforme del acero, un acero más limpio, y una operación de colada continua segura.

3.1 Equipos y materiales

- Modelo físico: escala a $\frac{1}{2}$ del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo, en acrílico,
- Cámara digital,
- Cámara de video,
- Inclusiones no-metálicas (acrílico),
- Computadora personal,
- LabVIEW 9.0 y APP para procesar imágenes,
- Aceite mineral, simulará la capa de polvo lubricante,
- Lámparas de luz negra,
- Líquidos penetrantes,
- Molino,
- Tamices,

3.2 Metodología

La fase experimental de este trabajo se diseñó basándose en el análisis de los resultados de la modelación matemática que se hizo [15], tanto de la buza como del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo. A continuación se describen aspectos importantes que se consideraron para el diseño del modelo físico.

3.2.1 Modelo matemático

El modelo matemático para estudiar el porcentaje de eliminación de inclusiones mediante el uso de dos buzas, una utilizada actualmente en la industria y otra obtenida a partir de la modificación de la geometría interna de esta para un molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo ha sido desarrollado. A continuación se hace una descripción del modelo utilizado.

3.2.2 Modelo de fase discreta

El modelo de fase discreta sigue la aproximación de Euler-Lagrange. Donde la fase fluida es tratada como continua mediante la solución de las ecuaciones promediadas en el tiempo de Navier-Stokes, mientras la fase dispersa es resuelta mediante el rastreo de un número grande de partículas a través del campo de flujo ya calculado. La fase discreta puede intercambiar movimiento, masa y energía con la fase fluida.

Una consideración fundamental de éste modelo es que las trayectorias de las partículas son calculadas individualmente durante intervalos específicos de los cálculos de la fase fluida.

FLUENT es un software que contiene amplias capacidades de modelado físico necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión a la combustión en un horno, de columnas de burbujas a las plataformas petroleras.

FLUENT por lo tanto ayuda a predecir la trayectoria de la fase discreta (inclusión) integrando el balance de fuerzas sobre la partícula, el cual es escrito en un marco de referencia Lagrangiano. Este balance de fuerzas iguala la inercia de la partícula con las fuerzas actuantes sobre la partícula. La cual puede ser escrita en coordenadas cartesianas en la dirección x como:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.1)$$

Donde F_x es un término adicional de aceleración (fuerza/unidad de masa por partícula), $F_D(u - u_p)$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa por partícula y

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re}{24} \quad (3.2)$$

Aquí u es la velocidad de la fase fluida, u_p es la velocidad de la partícula, μ es la viscosidad molecular del fluido, ρ es la densidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula y d_p es el diámetro de la partícula. Re es el número de Reynolds relativo, el cual es definido como

$$Re \equiv \frac{\rho d_p (u_p - u)}{\mu} \quad (3.3)$$

3.2.2.1 Saffman's lift force

La Saffman's Lift Force, o flotación debido al corte fue incluida también en el término de fuerza adicional [3].

La fuerza de sustentación de Saffman, o sustentación debida a la cizalladura, también puede ser incluida en el término fuerza adicional como una opción. La fuerza de sustentación usada es de Li y Ahmadi y es una generalización de la expresión proporcionada por Saffman:

$$\vec{F} = \frac{2Kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{lk})^{\frac{1}{4}}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (3.4)$$

Donde $K=2.594$ y d_{ij} es la fuerza de deformación. Esta forma de la fuerza de sustentación está destinada a pequeñas partículas del número de Reynolds. También, la partícula del número de Reynolds basada en la diferencia de la velocidad de fluido de la partícula debe ser más pequeña que la raíz cuadrada de la partícula del número de Reynolds basada en el campo de cizalla. Dado que la restricción es válida para partículas submicrónicas, es recomendado usar esta opción solo para este tipo de partículas.

3.2.2.2 Modelo discreto random walk

En el conocido modelo de duración de remolino, la interacción de una partícula con una sucesión remolinos turbulentos de la fase fluida es simulada. Donde cada remolino es caracterizado por

- Una distribución Gausiana de la velocidad fluctuante al azar, u', v', w'
- Una escala de tiempo, τ_e

Los valores de u', v' y w' que prevalecen durante la duración del remolino turbulento son muestreados considerando que estos obedecen una distribución de probabilidad Gausiana.

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.5)$$

Donde ζ es un número normalmente distribuido variablemente, y el resto del lado de la mano derecha es el valor local RMS de las fluctuaciones de la velocidad. Dado que la energía cinética de las turbulencias es conocida en cada punto del fluido, estos valores de los componentes fluctuantes RMS puede ser definidos (suponiendo isotropía) como:

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2} = \sqrt{2k/3} \quad (3.6)$$

Para el modelo $k-\epsilon$, el modelo $k-w$, y sus variantes. Cuando el RSM es usado, la isotropía de la tensión está incluida en la derivación de las fluctuaciones de la velocidad:

$$u' = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (3.7)$$

$$v' = \zeta \sqrt{v'^2} \quad (3.8)$$

$$w' = \zeta \sqrt{w'^2} \quad (3.9)$$

Cuando se ve en un marco de referencia en el que el segundo momento de la turbulencia es diagonal. Para el modelo LES, las fluctuaciones de la velocidad son equivalentes en todas las direcciones.

La característica de vida de los remolinos es definida ya sea como una constante:

$$\tau_e = 2T_L \quad (3.10)$$

Donde T_L es dada por la ecuación de la integral del tiempo en general, o como una modificación de la variable T_L :

$$\tau_e = -T_L \log(r) \quad (3.11)$$

Donde R es un número uniformemente variable entre 0 y 1 y T_L es dada por la ecuación $T_L \approx 0.15 \frac{k}{\epsilon}$. La opción de cálculo variable del rendimiento τ_e da una descripción más realista de la función de correlación.

La partícula eddy crossing time es definida como:

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[1 - \left(\frac{L_e}{\tau |u - u_p|} \right) \right] \quad (3.12)$$

Donde τ es el tiempo de relajación de la partícula, L_e es la escala de longitud del remolino, y $|u - u_p|$ es la magnitud de la velocidad relativa. Se supone que la partícula interactúa con la fase del fluido del remolino sobre el menor del tiempo de vida del remolino y el tiempo de

cruce del remolino. Cuando este tiempo es alcanzado, un nuevo valor de velocidad instantánea es obtenido aplicando un nuevo valor de ζ en la ecuación 3.5.

3.2.3 Consideraciones del modelo

Con la finalidad de validar los resultados del modelo numérico con los posteriores resultados del modelo físico, se simuló agua como fluido de trabajo en la simulación numérica. Todas las simulaciones se llevaron a cabo en estado estable e isotérmico. Se consideraron condiciones de rebote en casi todas las paredes solidas del modelo. La parte de la interfase aire-agua del molde se cambió de entrada de presión a pared la cual considera que si una partícula la llegara a tocar, esta sería atrapada, lo cual simularía la escoria en el proceso real. La salida del molde sigue siendo velocidad de colada considerando que las partículas que lleguen a estas sean atrapadas en el planchón lo cual simularía el frente de solidificación.

Las ecuaciones del modelo son discretizadas a través del software computacional FLUENT empleando el método segregado con una formulación implícita.

En todos los casos se consideró una inmersión de la buza, la máxima permisible. Para los mismos casos, se simularon las velocidades de colada de 4, 5 y 6 m/min y diámetros críticos de partícula de 150, 170, 225 y 250 μm [5]. Esto hizo del trabajo una cantidad de seis casos. La malla no estructurada utilizada para los 6 casos, estuvo compuesta de 1,800,000 celdas.

3.2.4 Modelación de flujo de fluidos

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

Diferentes modelos de turbulencia han sido usados por diferentes investigadores para simular el flujo de fluidos en el molde de colada, tales como los modelos de una sola ecuación (viscosidad turbulenta más una escala de longitud dada), modelos de turbulencia de dos

ecuaciones tales como el modelo $k-\epsilon$, LES (simulación de grandes remolinos) y el modelo de turbulencia de siete ecuaciones RSM (modelo de los esfuerzos de Reynolds), el modelo de los esfuerzos de Reynolds es anisotrópico es decir, las tasas de deformación no son iguales en todas las direcciones.

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

3.2.5 Flujo de Fluidos en la Buza

Actualmente se reconoce que la geometría de la buza tiene una influencia determinante en las condiciones de flujo dentro del molde [1-8]. Mediante la comparación entre modelos físicos y numéricos, se ha observado que el flujo a la salida cambia dependiendo de ciertas características geométricas de la buza como son su longitud, altura metalúrgica y el tamaño y la forma de los puertos de salida. Algunas de estas características cambian de manera natural debido a las condiciones de operación de la colada continua. El ejemplo más claro de esto es la modificación de la geometría de los puertos debida al desgaste de la buza ocasionada por erosión y por deposición de impurezas. Por lo tanto, para lograr una caracterización correcta del comportamiento del flujo dentro de la buza, es necesario reproducir las condiciones a diferentes regímenes de operación y determinar el efecto de las condiciones geométricas iniciales de diseño.

La buza sumergida (SEN) conecta al distribuidor con el molde, como se puede ver en la Fig. 3.1. El flujo a través de la buza influencia el taponamiento, entrada de aire, y lo más importante, controla las condiciones del flujo entrante al molde. Esas condiciones incluyen el ángulo, velocidad y la oscilación de los chorros provenientes de los puertos de la buza, su nivel de turbulencia, recirculación y extensión y el tamaño y la distribución de burbujas de gas e inclusiones acompañantes. Por lo que la modelación del flujo precisa, requiere de una atención cuidadosa a dichas condiciones de entrada.

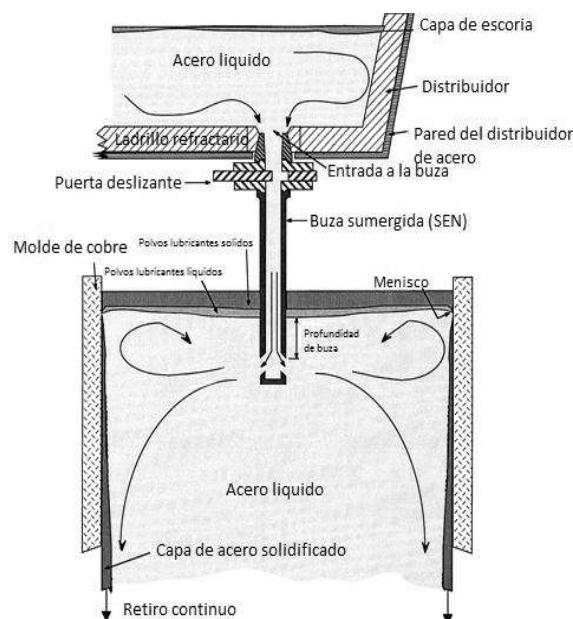


Figura 3.1. Esquema de las partes más importantes del distribuidor y el molde.

3.2.6 Flujo en el molde

El comportamiento del flujo de fluidos durante la colada continua gobierna la calidad del producto final. Algunos investigadores [1, 7,8] han estudiado los flujos transitorios en el interior del molde haciendo uso de modelación física y matemática. La oscilación de los patrones del flujo eliminará o reducirá la falta de uniformidad en el crecimiento de la capa de acero solidificada. Por lo que, el control del flujo de fluidos en el molde juega un papel muy importante para conseguir un producto de mejor calidad.

3.2.7 Profundidad de inmersión de buza

La profundidad de inmersión de la buza, no es constante durante todo el proceso, esto como una medida para minimizar la erosión de la buza sumergida en la interfase metal-escoria. Los efectos de la inmersión de la buza sobre la calidad del acero deben ser tomados en cuenta [6].

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

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

Por lo que cada buza tiene una profundidad de inmersión óptima la cual está en función el ángulo de los puertos de la buza, velocidad de colada, tamaño del molde, etc.

3.2.8 Análisis teórico

En la modelación física, un modelo del molde y buza a escala reducida o completa puede ser diseñado basado en los criterios de similitud apropiados en el cual el flujo de metal líquido es simulado mediante el flujo de agua. Si el flujo de agua en el modelo es una representación realista del flujo real en el molde, se puede usar para estudiar varios aspectos del flujo en el molde, incluyendo:

1. Deformación de la superficie libre y turbulencia superficial;
2. Visualización del flujo en diferentes áreas del molde con un trazador;
3. Medidas detalladas de la velocidad y la turbulencia en el líquido usando una sonda de anemometría de hilo caliente o un velocímetro láser de efecto Doppler;
4. Estudio de la distribución del tiempo de residencia del fluido (RTD);
5. Simulación del transporte de inclusiones y flotación; y
6. Formación de vorticidades en la interfase metal-escoria y atrapamiento de escoria hacia el seno del metal líquido en el molde.
7. Disipación de energía, etc.

El estudio del comportamiento del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo, se facilita a partir de la simulación física, utilizando modelos a base de agua, que cumplan y satisfagan las condiciones requeridas. Además, el modelo se puede construir con un material transparente, como el acrílico, para observar el comportamiento de los fluidos que participan durante el experimento.

La teoría que sustenta el estudio de la simulación física del distribuidor de colada continua, consiste en la revisión de:

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

3.2.9 Criterios de similitud

Para conseguir similitud entre dos sistemas de flujo las siguientes cuatro condiciones deben ser respetadas [9-10]:

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

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

$$\text{Número de Froude} = \frac{V^2}{gL} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas gravitacionales}} \quad (3.13)$$

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{VL}{\nu} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} \quad (3.14)$$

$$\text{Número de Weber} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas de Tensión Superficial}} \quad (3.15)$$

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

Criterios de Similitud Número de Reynolds y Froude

El número de Reynolds, Re , es dado por [1]:

$$Re = \frac{VLr}{\mu} \quad (3.16)$$

El número de Froude, Fr , es dado por:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \quad (3.17)$$

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

$$\left(\frac{VL\rho}{\mu} \right)_m = \left(\frac{VL\rho}{\mu} \right)_p \quad (3.18)$$

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

$$V_m \approx \left(\frac{1}{\lambda} \right) V_p \quad (3.20)$$

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

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} \quad (3.21)$$

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

$$V_m = \sqrt{\lambda} \cdot V_p \quad (3.22)$$

El número de Reynolds es la relación de las fuerzas inerciales y viscosas que actúan sobre el fluido. Las fuerzas inerciales dan un aumento al flujo convectivo o transferencia de momento convectiva, y las fuerzas viscosas causan transferencia de momento viscosa o difusiva. En flujo laminar, la viscosidad molecular del fluido causa el intercambio entre capas adyacentes de fluido y da como resultado la transferencia de momento difusiva. Sin embargo, el flujo de fluidos dentro del distribuidor es generalmente turbulento. En flujos turbulentos, la transferencia de momento difusiva no es solamente debida al intercambio de moléculas sino también debido al intercambio de vórtices sobre distancias relativamente grandes (comparado

a la distancia molecular media libre), conocida como longitud de remolino. En tal flujo la contribución de la transferencia de momento difusiva debida al intercambio de vórtices puede ser en órdenes de magnitud mayor que la contribución debido al intercambio molecular causado por la viscosidad molecular.

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

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

3.2.10 Desarrollo De Modelos Con Agua

Se considera que las fuerzas que actúan en el molde son gravitacionales [6,11] por lo que el número estándar de Froude puede satisfacerse a cualquier escala en un modelo con agua, siempre y cuando todas las medidas de los orificios utilizados y las alturas hidráulicas en el sistema fueran variadas de acuerdo con un solo parámetro de escala, esto debido a que la viscosidad cinemática del acero a temperatura de proceso (1600 °C) y del agua, son prácticamente iguales, ver la Tabla I.

Tabla I. Propiedades físicas del agua a 293 k y del acero a 1873 k.

PROPIEDAD	AGUA (20° C)	ACERO (1600° C)
Viscosidad (cp) g/cm .s	1.0	6.4
Densidad g/cm ³	.998	7.014
Viscosidad cinemática (cs) cm ² /s	1.0	0.913
Tensión superficial (dina/cm)	7.3	3.1

Por lo que, para un flujo gravitatorio, el número de Froude puede ser mantenido si todas las dimensiones (incluyendo tamaños de recipientes, secciones transversales de orificios y alturas hidráulicas) son escaladas de acuerdo a un solo parámetro de escala. En resumen un número de relaciones han sido desarrolladas. Las cuales son:

$$\text{Factor De Longitud: } \frac{L_m}{L_p} = X \quad (3.23)$$

$$\text{Factor Velocidad: } \frac{V_m}{V_p} = \sqrt{X} \quad (3.24)$$

$$\text{Factor De Flujo Cinemática: } \frac{Q_m^0}{Q_p^0} = X^{2.5} \quad (3.25)$$

$$\text{Factor De Tiempo: } \frac{t_m}{t_p} = \sqrt{X} \quad (3.26)$$

Dada la dificultad que presenta la observación del flujo del acero líquido directamente, el modelado físico, ha sido una herramienta utilizada para estudiar los fenómenos que ocurren en los diferentes procesos siderúrgicos. Comúnmente la técnica empleada para el análisis del flujo en el molde, es por medio de las curvas DTR (Distribución de Tiempos de Residencia), la cual consiste en inyectar en forma de impulso un trazador en la posición de entrada y

monitorear la concentración de este trazador en lugares críticos observados en la simulación matemática del molde.

Esto permite cuantificar el rendimiento del molde para flotar inclusiones no metálicas. Se han utilizado diferentes técnicas como son calorimetría, conductividad y espectrometría. Algunos parámetros que se miden con estas técnicas son: volumen pistón, volumen muerto y volumen de mezclado.

Las fracciones de la flotación de inclusiones no metálicas no pueden ser representadas completamente por la simulación física ya que existe una diferencia muy grande entre el modelo y el prototipo debido a las complejas reacciones químicas que se llevan a cabo en el distribuidor cuando está operando.

3.2.11 Diseño y Construcción del Modelo

Para estudiar el comportamiento del flujo se fabricó un modelo físico a $\frac{1}{2}$ del molde real de colada continua de planchón delgado tipo embudo en acrílico transparente de 10 mm de espesor y la buza sumergida de geometría compleja, la cual se fabricó en resina de alta densidad respetando los espesores del refractario de la buza original. El molde fue diseñado para trabajar con una velocidad de hasta 8m/min lo cual equivaldría en agua a 84.34 litros/min. En la Fig. 3.2 se muestran las dimensiones tanto de la buza como del molde.

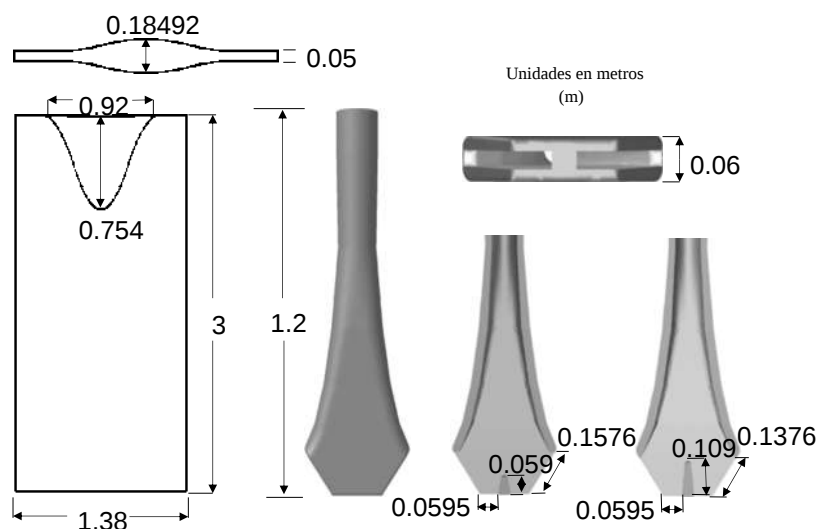


Figura 3.2. Dimensiones del modelo físico del sistema molde tipo embudo-buza de planchón delgado.

El modelo se montó en un recipiente construido en acrílico de 12mm de espesor, el cual recibirá el agua proveniente del modelo del molde. En la Fig. 3.3 se muestran sus dimensiones.

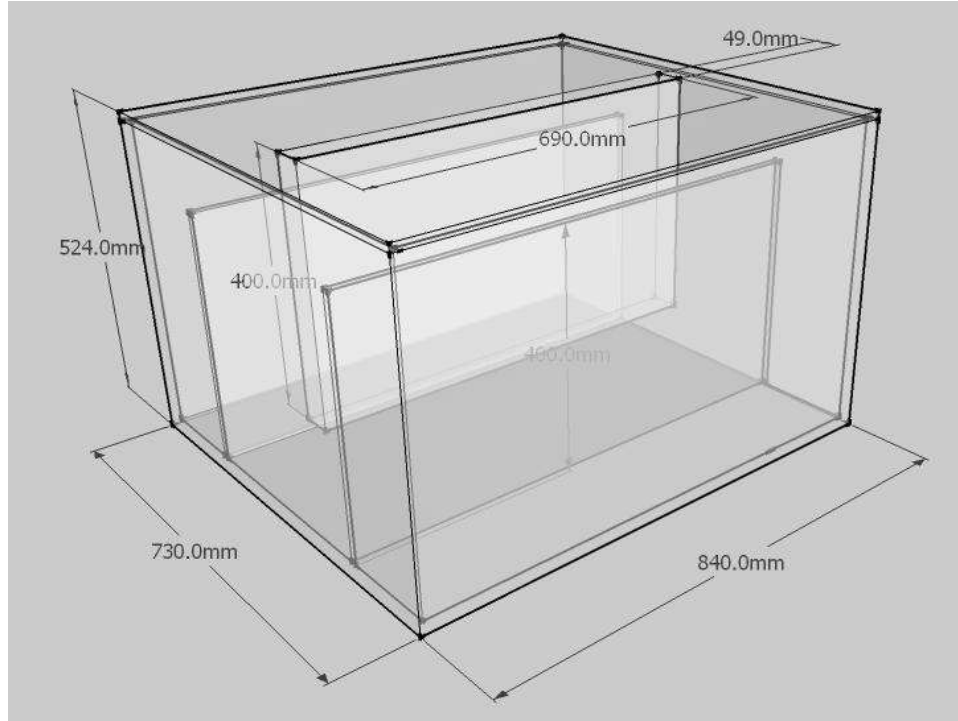


Figura 3.3. Esquema del recipiente receptor del agua proveniente del molde.

3.3 Escalamiento de las inclusiones

Las inclusiones no-metálicas en el acero líquido son más ligeras, por lo tanto pueden flotar a la superficie. Para un rango de tamaños de inclusiones que llegan al molde de colada continua, puede ser asumido que las inclusiones flotan acorde con la velocidad de Stokes. Una inclusión es llevada con el fluido a una velocidad ($V_{f,p}$) y flotada con la velocidad de Stokes ($V_{r,p}$). En un modelo de colada continua, las correspondientes velocidades son $V_{f,m}$ y $V_{r,m}$. La similitud de la trayectoria de las partículas y por lo tanto para hacer una simulación adecuada, es necesario que la siguiente condición de relación de velocidades se satisfaga:

$$\frac{V_{f,m}}{V_{f,p}} = \frac{V_{r,m}}{V_{r,p}} \quad (3.27)$$

Para esta discusión, aquí se considera que un modelo a escala completa de agua satisface el criterio de similitud de Reynolds y de Froude, y un modelo a escala reducido es operado con el

criterio de similitud de Froude. En el modelado de flotación de inclusiones usando un modelo de agua de escala completa, la situación es relativamente sencilla. Las longitudes, velocidades, tasas de flujo volumétrico, y los correspondientes tiempos de diferentes eventos permanecen igual en el prototipo y en el modelo. El tamaño de las inclusiones del modelo debería de mantenerse igual como las inclusiones en el acero y la relación de la densidad al líquido debería también mantenerse igual en el modelo de colada y el prototipo. Esto va a satisfacer el criterio definido en la ecuación 3.27 y estos experimentos de modelado se espera que proporcionen información acerca de la flotación de inclusiones la cual debería representar fielmente la situación real.

Ahora se considera que el modelo experimental de escala reducido ha sido diseñado en base al criterio de Froude. Por lo tanto siguiendo las relaciones que existen entre el modelo y el prototipo:

$$\text{Velocidad, } V_m = \sqrt{\lambda} V_p \quad (3.28)$$

$$\text{Longitud, } L_m = \lambda L_p \quad (3.29)$$

En éste experimento, las inclusiones modelo deberían de ser seleccionadas para tener la misma relación de densidad (inclusión a líquido) como en el metal líquido. La pregunta importante es acerca sobre el tamaño de las inclusiones. Basado estrictamente en la similitud de Froude, uno puede proponer que el tamaño (diámetro) de las inclusiones modelo deberían de ser reducidas a un factor de λ de acuerdo a la ecuación 3.30 esto permite examinar la pregunta del tamaño de inclusión modelo basado en las velocidades relativas que actúan en la partícula. Como fue establecido antes, para poder alcanzar la misma tasa de flotación en el modelo como en el prototipo, las relaciones de velocidades debido al flujo del líquido y debido a la flotación de Stokes deberían ser iguales en los dos casos. La relación de velocidades debido a:

$$\frac{V_{f,m}}{V_{f,p}} = \sqrt{\lambda} \quad (3.30)$$

La velocidad de flotación de las inclusiones de Stokes en un modelo de agua y prototipo son:

$$V_{r,m} = \frac{2R_{inc,m}^2 g (\rho_w - \rho_{inc,m})}{9\mu_w} \quad (3.31)$$

$$V_{r,p} = \frac{2R_{inc,p}^2 g (\rho_{st} - \rho_{inc,p})}{9\mu_{st}} \quad (3.32)$$

Así, por la similitud de las trayectorias de las inclusiones en el prototipo y en el modelo, la relación de las dos velocidades de flotación de Stokes obtenidas dividiendo la ecuación 3.31 entre la ecuación 3.32, debería de obtener lo mismo. Asumiendo que las viscosidades cinemática del agua a la temperatura ambiente y que la del acero a 1600 °C son casi la misma:

$$\frac{V_{r,m}}{V_{r,p}} = \frac{R^2_{inc,m} \left(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}\right)}{R^2_{inc,p} \left(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}}\right)} = \sqrt{\lambda} \quad (3.33)$$

$$\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w} = \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}} \quad (3.34)$$

$$\frac{R^2_{inc,m}}{R^2_{inc,p}} = \frac{D^2_{inc,m}}{D^2_{inc,p}} = \sqrt{\lambda} \quad (3.35)$$

$$R_{inc,m} = \lambda^{0.25} R_{inc,p} \quad (3.36)$$

Así, la relación dada por la ecuación 3.36 debería de proveer la similitud en las trayectorias de las inclusiones en el modelo de agua y en el prototipo y debería simular correctamente la flotación de inclusiones. Por ejemplo, en un tercio de un modelo escala el tamaño de una inclusión debe ser 0.76 veces el tamaño de la inclusión de acero. Es interesante notar que la relación dada por la ecuación 3.36 es diferente para cualquier longitud de dimensión basada estrictamente en la similitud de Froude.

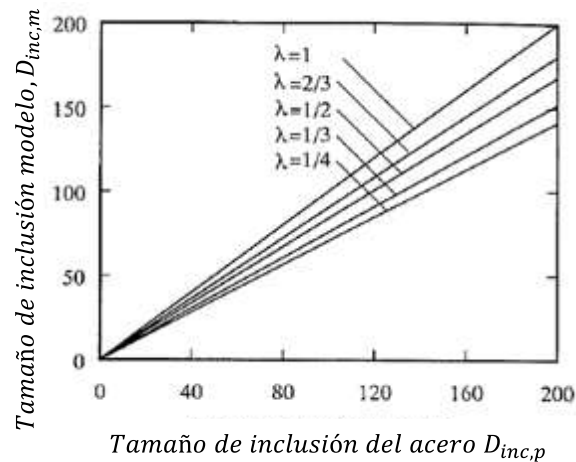


Figura 3.4. Relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua para diferentes valores de escala [12].

La Fig. 3.4 muestra la relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua para diferentes valores de escala.

A veces, llega a ser complicado encontrar un modelo de inclusiones con la misma relación de densidad.

$$\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w} \neq \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}} \quad (3.37)$$

Luego, de la ecuación 3.37

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0.25} \left[\frac{(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w})}{(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}})} \right]^{0.5} \quad (3.38)$$

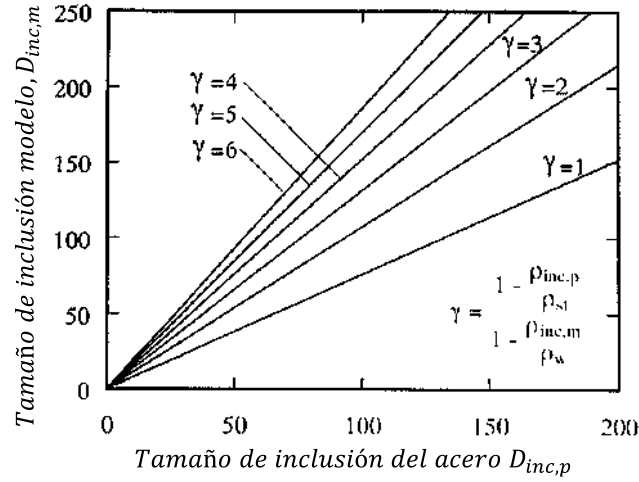


Figura 3.5. Relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua en un modelo a tercera escala para diferentes valores de γ [12].

Uno puede usar la ecuación 3.38 para el tamaño de la inclusión modelo con diferentes relaciones de radios. La figura 3.5 muestra la relación entre el acero y el tamaño de inclusión para el modelo de agua en un modelo a tercera escala para diferentes valores de γ , la cual es definida como sigue:

$$\gamma = \frac{(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}})}{(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w})} \quad (3.39)$$

Para un modelo a un tercio de escala ($\lambda = 0.33$), permite que la relación de densidad en el prototipo sea de 0.6 y que la inclusión modelo sea 0.8, es decir a γ de 2:

$$\frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}} = 0.6 \quad (3.40)$$

$$\frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w} = 0.8 \quad (3.41)$$

Luego, de la ecuación 3.42

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \frac{D_{inc,m}}{D_{inc,p}} = 1.07 \quad (3.42)$$

En otras palabras, éste resultado sugiere simplemente que si la partícula del modelo tiene una relación densidad del líquido que es mayor que la relación correspondiente del prototipo, entonces la partícula del modelo ascenderá lentamente, y por lo tanto una partícula más grande será necesaria para compensar la diferencia de densidad. De esta manera, se puede obtener la relación del tamaño de inclusión con diferentes relaciones de densidad de las partículas en el líquido.

Para poder llegar a la fórmula que permita calcular el radio de inclusiones que se van a utilizar para las simulaciones físicas hay que empezar por utilizar la expresión que contempla la relación de radios y densidades que es la ecuación 3.42.

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0.25} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}\right)} \right]^{0.5} \quad (3.43)$$

De la cual si despejamos el radio de la inclusión modelo obtenemos lo siguiente:

$$R_{inc,m} = \left(\lambda^{0.25} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{st}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_w}\right)} \right]^{0.5} \right) R_{inc,p} \quad (3.44)$$

Esta fórmula lo que indica es como calcular el radio de la inclusión para el molde a partir del factor de escala, la densidad de la inclusión en el molde, la del agua, la de la inclusión en el prototipo, la del acero y el radio de la inclusión en el prototipo.

Tabla II. Parámetros para el cálculo de las inclusiones modelo.

Densidad de la inclusión modelo (Acrílico $\frac{gr}{cm^3}$)	Densidad del agua ($\frac{gr}{cm^3}$)	Densidad de la inclusión prototipo (Alúmina $\frac{gr}{cm^3}$)	Densidad del acero ($\frac{gr}{cm^3}$)	Radio de la inclusión prototipo (μm)
0.9740	1.0	3.4	7.4	50-100

Sustituyendo los valores de la tabla II en la fórmula 27 obtenemos por lo tanto que:

$$R_{inc,m} = \left(0.5^{0.25} \left[\frac{\left(1 - \frac{3.4}{7.4} \right)}{\left(1 - \frac{0.9740}{1.0} \right)} \right]^{0.5} \right) R_{inc,p} \quad (3.45)$$

Es decir,

$$R_{inc,m} = 2.5 R_{inc,p} \quad (3.46)$$

Esto quiere decir que las inclusiones modelo deben guardar esa relación para que se cumpla la similitud de su trayectoria en el modelo de agua y en el prototipo, y a la vez, debe simular correctamente la flotación de las inclusiones.

Utilizando un rango de inclusiones prototipo de 50 a 100 micrómetros, que son las que más probabilidad tienen de eliminarse en el proceso real debido a que más pequeñas será casi imposible de eliminarlas y tendrán un efecto insignificante en la calidad final del planchón. Se puede hacer el cálculo de las inclusiones modelo con base a la ecuación 3.46. En la tabla III se muestran las inclusiones que tienen que ser modeladas.

Tabla III. Correspondencia de inclusiones prototipo y modelo.

$R_{inc,p} (\mu\text{m})$	$R_{inc,m} (\mu\text{m})$
50	125
60	150
70	175
80	200
90	225
100	250

3.4 Preparación de las inclusiones

Una vez escaladas las inclusiones, para poder generar la simulaciones en el modelo físico es importante llevar una serie de pasos que nos van a permitir darle el tamaño adecuado y el colorido necesario para su `posterior visualización en la experimentación con luz negra.

3.4.1 Molienda

Ya que se conocen los tamaños de partículas que se deben de obtener es necesario, por lo tanto, llevar el material (acrílico) a una reducción de dimensión por medio de una pulverizadora o molino.

La pulverizadora es una máquina que nos permite disminuir el tamaño del material a niveles más pequeños, en este caso micrométricos. En esta parte lo que se hizo fue colocar el acrílico en la pulverizadora durante los tiempos de 1, 2,4 y 6 minutos.

Se sabe que no se puede obtener un tamaño definido por lo que posteriormente se pasa a clasificar las partículas en los tamices.

3.4.2 Tamizado

Como es de suponer, las partículas procedentes de cualquier operación de reducción de tamaño tienen una gama de características como son: de forma, tamaño, distribución, asociación, y de composición. Esto, dificulta sobremanera la descripción precisa del producto. Por conveniencia, se debe usar una sola característica para describir aproximadamente una partícula. Esta característica podría ser el diámetro.

Debido a que resulta impráctico medir y clasificar cada partícula por separado, el análisis de tamaños más común es a través del uso de una serie de tamices, que permite obtener un diámetro equivalente de partícula o de tamiz. Estos tamices separan las partículas en intervalos de tamaño adecuadamente estrecho.

Los tamices se designan por un número de malla (número de aberturas por pulgada lineal de tejido). Existen en el mercado series de tamices (serie de tamices U.S., serie internacional de tamices, Tyler, Británica estándar, entre otras), las cuales difieren principalmente en sus relaciones entre tamaños de abertura y el calibre del alambre.

Es aquí donde finalmente se puede hacer la clasificación de los tres tamaños de partículas que se desea usar como inclusiones para que después puedan ser impregnadas con los líquidos penetrantes.

Las mallas utilizadas para la clasificación de las partículas por tamaños se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Mallas utilizadas para la clasificación de las partículas.

Numero de malla	Apertura(μm)
270	53
230	62
140	105
100	149
80	177
70	210
60	250
30	590

De la utilización de los tamices que se muestran en la tabla IV se obtuvieron los siguientes tamaños: 110, 177, 210, 250 μm .

Si bien este es un método rápido para saber los tamaños de partículas que se obtuvieron, se decidió utilizar un método más preciso para comprobar los tamaños obtenidos. Este método consistió en la utilización de un equipo para medición de tamaño de partícula marca Coulter, modelo LS100Q. El equipo permite determinar el tamaño de las partículas por medio de dos vías: seca y húmeda. En este caso se utilizó el módulo de volúmenes pequeños, para el cual previamente se debió hacer la preparación de las muestras, que se explicara a continuación, para poder ser introducidas al equipo.

Debido a que la muestra debe de ser introducida en húmedo al equipo, al verterle agua a una de las muestras que es representativa de la población de inclusiones se genera un problema, que es la aglomeración de las partículas. Este problema traería como consecuencia que el equipo calculara un tamaño de partícula equivoco y por lo tanto fue necesario buscar una solución. El cloruro de hidroxilamina es un disolvente el cual tiene como función evitar la

aglomeración de las partículas y partiendo de esto se debió preparar una solución como se describe a continuación:

- Primeramente se pesaron .25 gramos de partículas impregnadas de líquidos penetrantes en la balanza analítica (Denver instruments APX-200, aproximación de 0.1 mg).
- Posteriormente se disolvieron en 25 ml de agua destilada con 0.05 ml de cloruro de hidroxilamina. Esta solución se agito durante un 1min.
- Por último la solución se colocó en el baño ultrasónico (Branson 1510) el cual tiene como función agitar las partículas y homogeneizar la muestra durante 5 minutos.

Una vez que se tenía la solución hecha con la muestra de cada uno de los tamaños de partículas caracterizados por los tamices (110, 177, 210, 250 μm) se introdujeron una por una en el equipo que permite obtener la distribución de tamaño. El software muestra los datos estadísticos obtenidos que posteriormente serán analizados en la sección de resultados.

3.4.3 Impregnación de líquidos penetrantes de las inclusiones

Una vez clasificadas las inclusiones por tamaños se impregnaron con el líquido penetrante para inspección por fluorescencia (Magnaflux Penetrant ZL-27A). Posteriormente se dejaron secar durante 30 minutos expuestas al sol.

3.5 Preparación del equipo para obtención de imágenes

La luz negra es el nombre común para lámparas que emiten radiación electromagnética ultravioleta cercana, con una componente residual muy pequeña de luz visible. Las lámparas de luz negra son hechas generalmente del mismo modo que las lámparas fluorescentes convencionales, excepto que utilizan un único fósforo, y en lugar del cristal transparente exterior emplean un cristal oscuro conocido como cristal de Wood, que bloquea la mayor parte de "luz visible" sobre los 400 nanómetros.

La radiación ultravioleta de estas lámparas se produce con una longitud de onda superior a 350 nm. Una onda ultravioleta generada tan cerca del espectro visible no produce daño (o al menos no mayor daño que el que puede producir la luz visible). No obstante, por su naturaleza invisible, la luz negra se utiliza siempre como iluminación tenue.

La luz negra se utiliza en ambientes oscuros para resaltar algunos colores sobre otros, logrando efectos sorprendentes. En realidad la luz negra resalta los colores fluorescentes, entre ellos el poliéster, que suele estar presente en las telas blancas (en camisetitas, camisas y zapatillas).

Se colocaron de cinco focos de luz negra al modelo físico, tres que dirigen la luz al modelo con un ángulo deseado, es decir, se implementó un mecanismo que permite cambiar el ángulo de incidencia de luz y dos focos que se encuentran por encima del modelo para aumentar la luminosidad al momento de hacer las corridas de colada continua, Fig. 3.6.

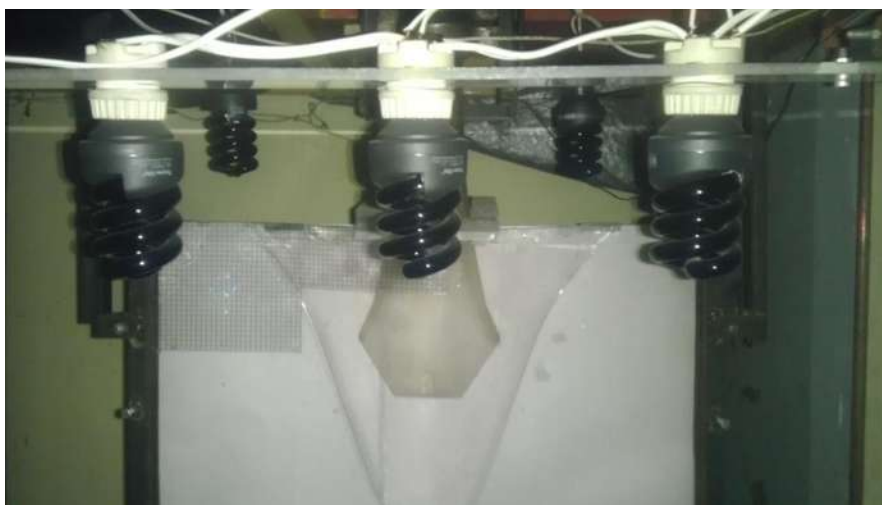


Figura 3.6. Instalación de focos de luz oscura.

Posteriormente se colocó una cámara de video SONY HD, la cual tienen la función de tomar imágenes del comportamiento que están teniendo las inclusiones dentro del molde de colada continua y esto es debido a que el líquido penetrante, que se impregna en las inclusiones, resalta ante la presencia de la luz emitida por los focos de luz negra; así que podrán ser observadas con claridad las imágenes. La cámara digital permite tomar imágenes o fotos con una resolución de 1270 x 720p, ésta se utilizará en el momento de la experimentación para captar las inclusiones atrapadas en el polvo lubricante y las tomas se harán enfocando la lente desde la parte superior del modelo.

3.6 Monitoreo de vibraciones

Por la manera en que opera una máquina de colada continua se puede decir que sería imposible “visualizar” la forma en que se comportan las inclusiones en el seno del acero

líquido. Una manera de poder predecir este comportamiento es utilizando las herramientas que brinda la simulación matemática y física y además con la posibilidad de hacerlo por medio del uso de transductores. La gran mayoría de los sensores conocidos no soportarían las altas temperaturas del acero líquido por lo que, a través de la simulación física se podría encontrar un transductor que indirectamente pudiera seguir la evolución de las inclusiones en el metal líquido. Esto puede ser posible relacionando las vibraciones producidas en el molde de colada continua, energía de impacto en las paredes del molde, y relacionar éstas con la probabilidad de eliminar inclusiones del molde de colada continua. Estas vibraciones pueden ser cuantificadas utilizando acelerómetros, los cuales convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la energía aplicada al sistema bajo ensayo.



Figura 3.7. Detalles del molde y buza de un modelo de colada continua de PD.

El equipo experimental consta de varias unidades entre las que destacan; el molde colada continua, construido en acrílico, hecho a escala de $\frac{1}{2}$ del real, éste incluye la buza que es el aditamento de descarga del acero del distribuidor al molde de colada continua, la cuál va sumergida en el molde, Fig. 3.7 [5]. El acelerómetro utilizado, PCB-482A, tiene una sensibilidad de 1014 mV/g en un rango de frecuencias de 2.5 a 3000 Hz.



Figura 3.8. Equipo para la adquisición de vibraciones.

Otra parte importante del equipo es el sistema de digitalización de la señales del acelerómetro, NI 9234: 4 canales diferenciales, Resolución de 24 bits, Velocidad de muestreo 51.2 KS/s por canal, Fig. 3.8. Este dispositivo va conectado a uno de los puertos USB de la computadora. Todos los ensayos en los que se introdujeron inclusiones (escaladas) serán filmados, las inclusiones ya previamente tratadas como se mencionó anteriormente.

El acelerómetro se colocó en varios puntos, en una de las paredes del molde, la posición del mismo se eligió analizando los datos arrojados por la simulación matemática [4]. En la Fig. 3.9 se puede observar la zona elegida para el monitoreo.

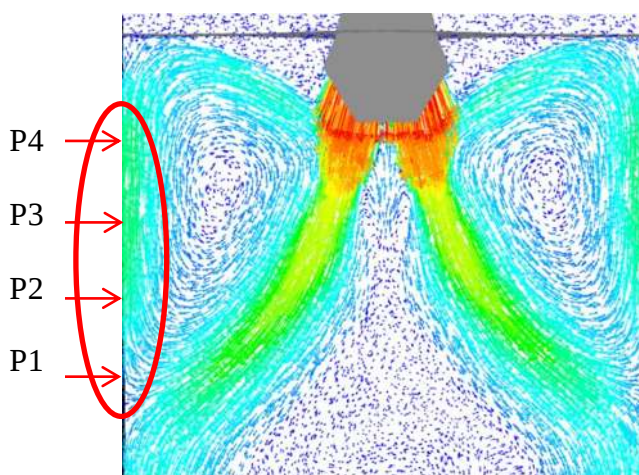


Figura 3.9. Zona donde se colocó el transductor.

3.7 Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos se llevó a cabo con programas escritos en lenguaje de programación G, comercialmente conocido como LabVIEW. Primeramente se toma una señal base o patrón (ruido natural del sistema) que después es restada a la señal del transductor para así obtener una señal absoluta del ensayo en cuestión. Posteriormente se generaron dos programas; uno de los programas hace la digitalización de las señales del acelerómetro, y les hace un pre-procesamiento que consiste en homogenizar la señal en el rango positivo para a continuación guardar las señales en archivos tipo ASCII. Otro programa lee diferentes archivos de datos guardados y calcula el área bajo la curva de las señales del acelerómetro. Dependiendo de las condiciones reinantes en el molde, causadas por la velocidad de colada, así será la magnitud de las vibraciones. Estas vibraciones serán comparadas con las imágenes procesadas donde se verá el comportamiento de las mismas y por ende el destino, es decir, si serán atrapadas en la escoria o en el seno del metal.

3.8 Experimentación

En esta sección se explica cómo funciona el modelo físico del molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo para llevar a cabo la simulación del comportamiento de las inclusiones. Como se puede observar en la Fig. 3.10 el funcionamiento consta de los siguientes pasos:

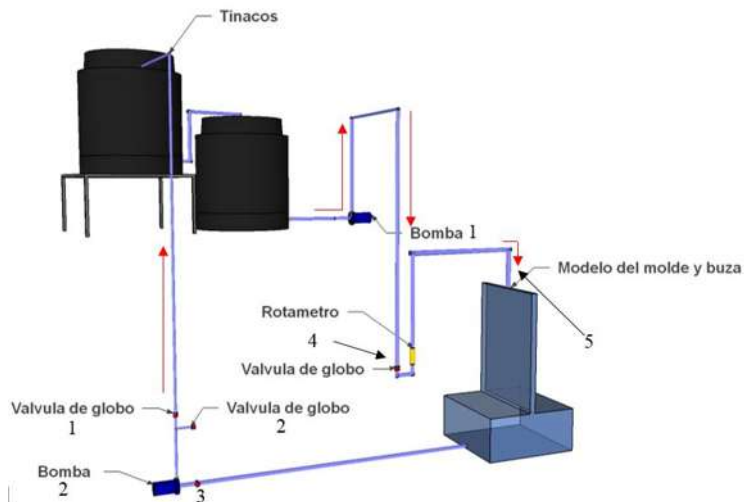


Figura 3.10. Diagrama del Modelo Físico.

1. Activar la bomba 1 para empezar a llenar con agua el modelo físico.
2. Ajustar la válvula de globo 4 a la velocidad de colada deseada. Esto quiere decir que se regula el caudal de entrada mediante el rotámetro.
3. Cuando es alcanzada la altura de la columna de agua en el modelo del molde se activa la bomba 2 para mantener la altura de la columna y posteriormente se abre la válvula 1 ò 2, dependiendo de la calidad del agua. Cabe mencionar que la válvula 3 ha sido previamente calibrada.
4. Sí la válvula 1 se abre significa que el agua está libre de trazador o de inclusiones y por lo tanto se puede recircular de nuevo a los tinacos para ser reutilizada.
5. Sí la válvula 2 se abre significa que el agua tiene inclusiones o trazador y por lo tanto ya no puede ser reutilizada. Esta agua es desechada.
6. En la parte 5 se inyectan las inclusiones por medio de una jeringa, Previamente las inclusiones se debieron haber mojado con agua dentro de la jeringa para evitar las aglomeración de las mismas.

3.81 Simulación física

Las simulaciones se llevan a cabo con las siguientes velocidades de colada que se muestran en la tabla V. Estos valores de velocidades de colada se basaron en la escala elegida para la construcción del modelo.

Tabla V. Parámetros utilizados en la simulación.

Velocidad (m/min)	Flujo (litros/min)
4	49
5	61.2
6	73.4
7	85.6
8	97.8
9	110

Otro parámetro de importancia es la profundidad de inmersión de la buza, para este caso se llevó a cabo con dos profundidades; las profundidades en el prototipo son de 22 y 34 cm y debido al factor de escala en el modelo son de 11 y 17 cm respectivamente.

Se hicieron simulaciones matemáticas de colada continua de planchón delgado tipo recto donde se inyecta una cantidad de partículas o inclusiones que van desde los 14,000 a las 40,000 [16]. Por lo que el criterio para saber cuántas partículas serán inyectadas será con base al peso. En este caso la medida será de 1 gramo y a partir de esto se puede hacer el cálculo de cuantas partículas hay en dicha cantidad sabiendo de antemano que se conoce la densidad del acrílico. El cálculo quedaría de la siguiente forma:

Conociendo la densidad del acrílico y la cantidad que será inyectada se puede utilizar la siguiente fórmula para calcular el volumen deseado.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.47)$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1gr}{0.974 \frac{gr}{cm^3}} = 1.03cm^3 \quad (3.48)$$

Ya que se conoce el volumen para un gramo de inclusiones, se procede a calcular el volumen de una partícula idealizándola a una esfera. En la tabla VI se puede observar el diámetro, radio y volumen para las partículas seleccionadas para hacer la simulación en el modelo físico. El cálculo del volumen se realiza con la fórmula de una esfera.

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (3.49)$$

Tabla VI. Diámetro, radio, volumen de las inclusiones.

Diámetro (μm)	Radio (cm)	Volumen (cm ³)
110	0.0055	6.9691E-07
177	0.00885	2.90348E-06
210	0.0105	4.84905E-06
250	0.0125	8.18123E-06

Por último, se debe hacer una división de los volúmenes para obtener la cantidad de inclusiones por gramo. En la tabla VII se muestra la cantidad de partículas.

Tabla VII. Cantidad de partículas por un gramo.

Diámetro de inclusión (µm)	Cantidad de partículas por gramo
110	1,473,209.007
177	3,536,08.4395
210	211,731.0429
250	125,493.836

En la, tabla VII, se observa que la cantidad de partículas es mucho más grande que las mencionadas en la literatura [16] para hacer las simulaciones. Sin embargo, se llegó a la conclusión que para 0.01 gramos de inclusiones se cae dentro del rango mencionado de 14,000 a 40,000 partículas. Por lo tanto se hará a la par las simulaciones con estas dos cantidades (1 y 0.01 gramos); en el caso de 1 gramo se hará de esta forma para poder observar de mejor forma la dinámica y el comportamiento de las inclusiones. Se podría decir que es más con propósitos didácticos que operativos.

Una vez seleccionada la velocidad de colada y la profundidad de la buza, se estabiliza el flujo, es decir, se debe controlar que el agua llegue a una cierta altura que está delimitada por una marca que está en el modelo. Ya estabilizado, se coloca una capa de aceite vegetal que hará la función del polvo lubricante y retenedor de inclusiones, posteriormente se pone en marcha el equipo para digitalizar las señales del acelerómetro y a la inyección de las inclusiones.

El programa escrito en LabVIEW para la conversión de las señales de analógico a digital del acelerómetro se muestra en la Fig. 3.11.

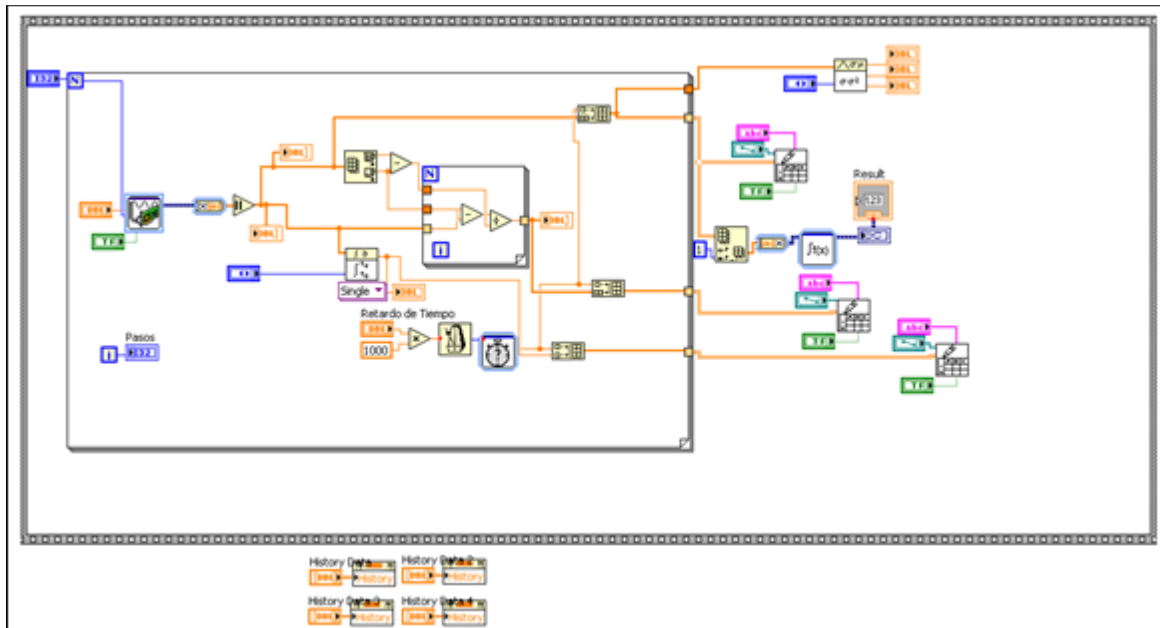


Figura 3.11. Programación gráfica de la fase de la digitalización de las señales.

Las señales análogas provenientes del acelerómetro son digitalizadas en el programa, el cual hace tres funciones principales: la primera de ellas es obtener la señal absoluta que viene del transductor, lo siguiente es normalizar la señal, es decir, permite tener una simetría de los datos con respecto a su media y por último la integración de la señal. En la Fig. 3.12 se observa la interfaz gráfica para el usuario.

En esta pantalla el usuario tiene el control de las variables para la digitalización de las señales, como: velocidad de muestreo, número de pasos y el retardo de tiempo. En ella se puede observar varios gráficos; en el primero se muestra la señal como valor absoluto ya que hace los valores negativos positivos para que en el momento que sea integrada no vayamos a obtener como resultado una señal nula.

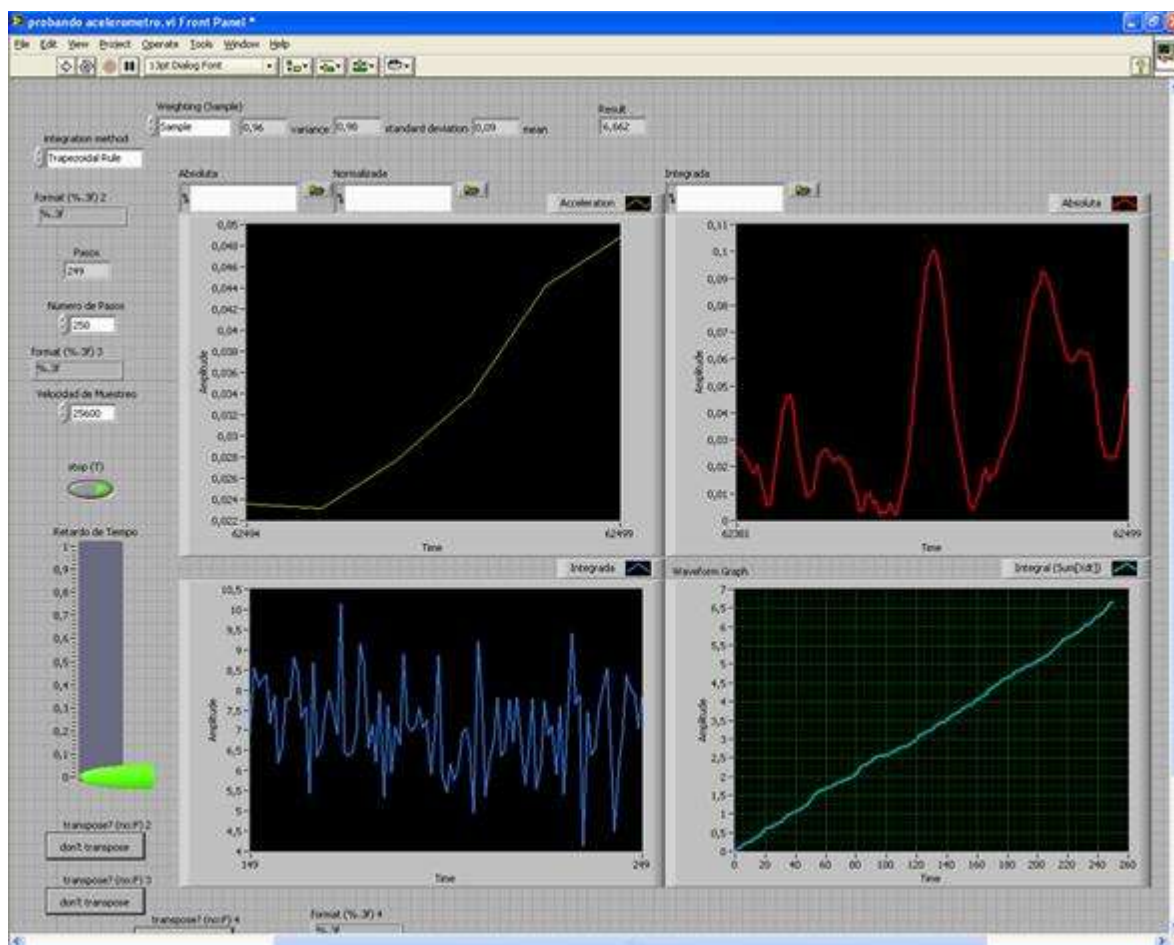


Figura 3.12. Interfaz gráfica de la adquisición de datos.

En el segundo grafico se muestra la señal normalizada, en la tercera se muestra la señal integrada de toda la muestra, muestras por segundo, la va graficando en tiempo real. Y por último se muestra la señal acumulada de las integrales, que es un parámetro que puede indicar si hay fluctuaciones grandes en los parámetros de la colada continua que modifiquen la energía del modelo y que también indica el valor de energía total.

Los ensayos o experimentos en el modelo duran alrededor de 50 segundos, tiempo necesario para saber cuántas inclusiones se eliminaron en la superficie y cuantas se quedaron atrapadas en el planchón. Para poder conocer el porcentaje de eliminación se pesan las inclusiones atrapadas y se saca una relación con las inyectadas; es importante en este paso lavar las inclusiones para eliminar el peso del aceite y no sea contabilizado como parte de ellas. Una vez pesadas se utiliza la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de inclusiones eliminadas:

$$\text{Porcentaje de eliminación} = \left(\frac{\text{Inclusiones atrapadas}}{\text{Inclusiones inyectadas}} \right) 100\% \quad (3.50)$$

De esta forma se hace una tabla comparativa de ambas buzas (original o modificada) y bajo que parámetros se obtiene los mejores resultados de remoción de partículas.

3.9 Procesamiento de imágenes

Otro método para poder analizar cuantas inclusiones quedaron atrapadas en la capa de polvo lubricante, es la utilización del procesamiento de imágenes bajo ambiente de programación gráfico, LabVIEW.

LabVIEW tiene dos herramientas que pueden ser muy útiles para el objetivo que se está planteando y son: NI IMAQ y NI VISION. Estos programas permitirán observar las imágenes, tomadas con la cámara digital, y hacer la cuantificación de las inclusiones. Una de las utilidades más importantes de IMAQ para los científicos, radica en la identificación de las coordenadas de elementos físicos de diferentes formas, esto permite obtener las coordenadas de movimiento de objetos en el tiempo, lo cual facilita la realización de cálculos de velocidad, posición, aceleración, entre otras. Las herramientas de NI IMAQ son fáciles de implementar, y lo mejor es que permiten un gran control del proceso de dinámicos muy útiles para la industria y la investigación en este caso.

Debido a que se está tomando video de las corridas en el modelo físico se encuentra que una de las utilidades más importantes de IMAQ radica en la posibilidad de descomponer un video en imágenes tipo LabVIEW para realizar sobre ellas independientemente procesos de identificación; esto permite estudiar el movimiento de objetos en función del tiempo para realizar cálculos de velocidad, posición, etc. La función es de fácil de implementar, y lo mejor es que permite un gran control del proceso de descomposición.

4. Resultados

Como ya se sabe, se hicieron simulaciones tanto matemáticas como físicas del comportamiento de las inclusiones en un molde de colada continua de planchón delgado tipo embudo. En base a estos resultados a continuación se mostraran los resultados haciendo primeramente el análisis de cada uno por separado y posteriormente haciendo la validación de los dos métodos resueltos para de esta forma saber si hay o existe relación entre ambos.

Otro aspecto tomado en cuenta será la resolución que entrega el análisis de vibraciones en el molde de colada con la probabilidad de eliminar inclusiones, de tal forma que esta sería una manera de predecir, dependiendo de su nivel de energía, si un molde será capaz de eliminar inclusiones.

4.1 Partículas

En el apartado de la metodología de la experimentación se hizo mención del equipo que permitió obtener la distribución de tamaño de partícula, por lo que ahora se mostraran los resultados obtenidos para cada una de las partículas analizadas.

En la Fig. 4.1 se muestra unas de las caracterizaciones para un tamaño de partícula de aproximadamente de 60 μm .

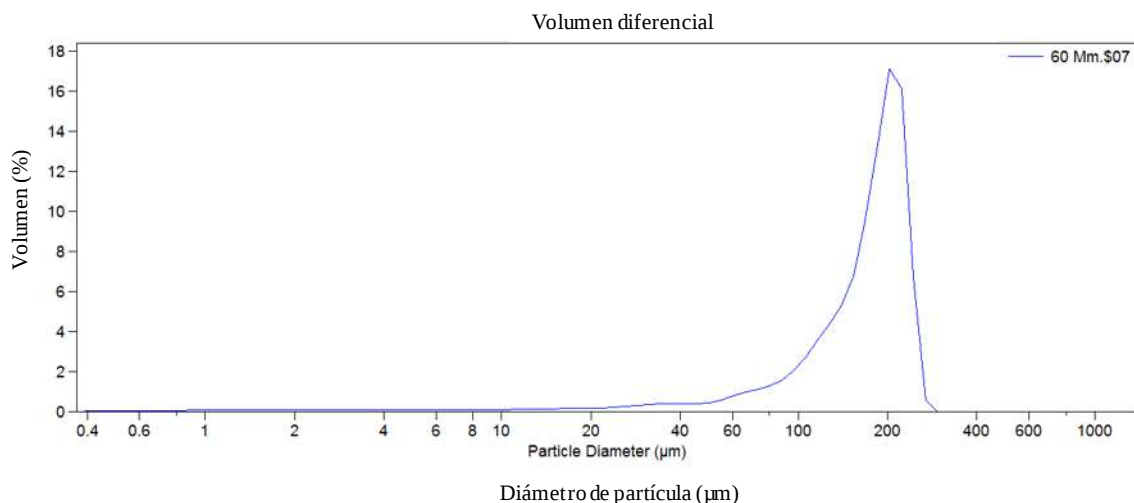


Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula de 60µm.

Los datos estadísticos arrojados por el software del equipo utilizado, se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII. Análisis de la distribución de partículas de 60 µm.

Media (µm)	146.8
Mediana (µm)	181.8
Moda (µm)	203.5
Desviación estándar	2.041
Varianza	4.168
Sesgo	-3.964
Curtosis	20.49 Leptocúrtica

Para las distribuciones que tienen la forma general de la sección de corte de una campana, Fig. 4.1, se puede hacer la siguiente aseveración que es mucho más firme:

1. Alrededor del 68% de las partículas caerán dentro de una desviación estándar de la media, esto es, $\bar{x}-s$ y $\bar{x}+s$; tomando en cuenta que la media es de 146.8, por lo tanto el 68% de las partículas cae dentro de 144.759 y 148.841.
2. Aproximadamente 95% de las partículas caerán dentro de dos desviaciones estándar de la media, es decir, que $\bar{x}-2s$ y $\bar{x}+2s$; tomando en cuenta que la media es de 146.8, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 142.718 y 150.882.
3. Alrededor del 99.7% de las partículas caerán dentro de tres desviaciones estándar de la media, esto es, entre $\bar{x}-3s$ y $\bar{x}+3s$; tomando en cuenta que la media es de 146.8, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 140.677 y 152.923.

También se puede concluir de la tabla VIII que el sesgo indica que la mayoría de los datos están cargados a la izquierda y la curtosis indica el grado de concentración que presentan los

valores en la región central de la distribución, en este caso como es leptocúrtica se tiene una gran concentración de partículas en la región central.

En la Fig. 4.2 se muestra la distribución de partícula para un tamaño aproximado de 110 μm .

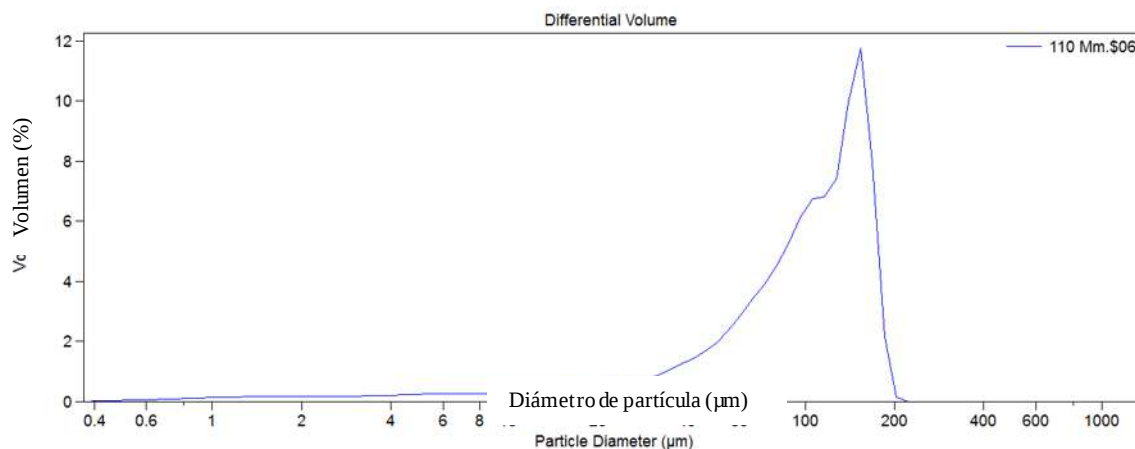


Figura 4.2. Distribución de tamaño de partícula de 110 μm .

El análisis estadístico que el software proporciona es el que se muestra en la tabla IX.

Tabla IX. Análisis estadístico para partículas de 110 μm .

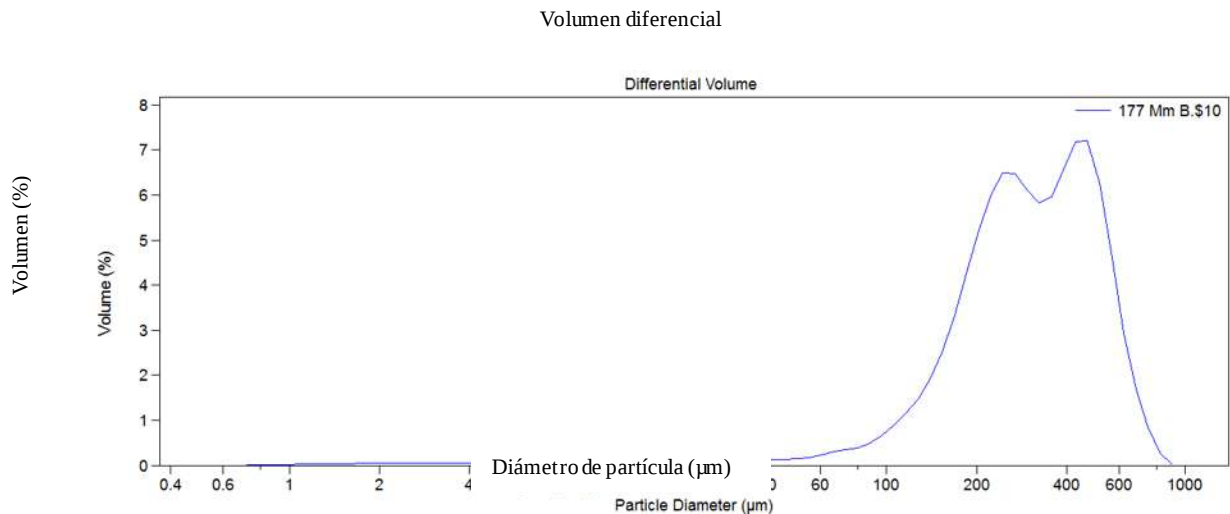
Media (μm)	77.4
Mediana (μm)	105.4
Moda (μm)	153.8
Desviación estándar	2.654
Varianza	7.044
Sesgo	-2.478
Curtosis	6.834 Leptocúrtica

En este caso se vuelve a presentar que la distribución de las partículas tiene la forma general de la sección de corte de una campana, Fig. 4.2, por lo que se puede hacer la misma aseveración:

1. Alrededor del 68% de las partículas caerán dentro de una desviación estándar de la media, esto es, $\bar{x}-s$ y $\bar{x}+s$; tomando en cuenta que la media es de 77.4, por lo tanto el 68% de las partículas cae dentro de 74.746 y 80.054.
2. Aproximadamente 95% de las partículas caerán dentro de dos desviaciones estándar de la media, es decir, que $\bar{x}-2s$ y $\bar{x}+2s$; tomando en cuenta que la media es de 77.4, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 72.092 y 82.708.
3. Alrededor del 99.7% de las partículas caerán dentro de tres desviaciones estándar de la media, esto es, entre $\bar{x}-3s$ y $\bar{x}+3s$; tomando en cuenta que la media es de 77.4, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 69.438 y 85.362.

También se puede concluir de la tabla IX que el sesgo indica que la mayoría de los datos están cargados a la izquierda y la curtosis indica que al ser leptocúrtica se tiene una gran concentración de partículas (datos) en la región central.

En la Fig. 4.3 se muestra la distribución de partícula para un



tamaño de 177 μm .

Figura 4.3. Distribución de tamaño de partícula de 177 μm .

Los datos estadísticos arrojados por el programa son los que se muestran en la tabla X.

Tabla X. Análisis estadístico para partículas de 177 μm .

Media (μm)	270.5
Mediana (μm)	299.0
Moda (μm)	429.2
Desviación estándar	2.089
Varianza	4.364
Sesgo	-3.037
Curtosis	16.39 Leptocúrtica

De igual forma para que los dos tamaños de partículas anteriores se observa que la distribución de las partículas tiene la forma general de la sección de corte de una campana, Fig. 4.3, se puede hacer la siguiente aseveración que es mucho más firme:

1. Alrededor del 68% de las partículas caerán dentro de una desviación estándar de la media, esto es, $\bar{x}-s$ y $\bar{x}+s$; tomando en cuenta que la media es de 270.5, por lo tanto el 68% de las partículas cae dentro de 268.411 y 272.589.
2. Aproximadamente 95% de las partículas caerán dentro de dos desviaciones estándar de la media, es decir, que $\bar{x}-2s$ y $\bar{x}+2s$; tomando en cuenta que la media es de 270.5, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 266.322 y 274.678.
3. Alrededor del 99.7% de las partículas caerán dentro de tres desviaciones estándar de la media, esto es, entre $\bar{x}-3s$ y $\bar{x}+3s$; tomando en cuenta que la media es de 270.5, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 264.233 y 276.767.

También se puede concluir de la tabla X que el sesgo indica que la mayoría de los datos están cargados a la izquierda y la curtosis indica que al ser leptocúrtica se tiene una gran concentración de partículas en la región central.

En la Fig. 4.4 se muestra la distribución de partícula para un tamaño de 250 μm .

Volumen diferencial

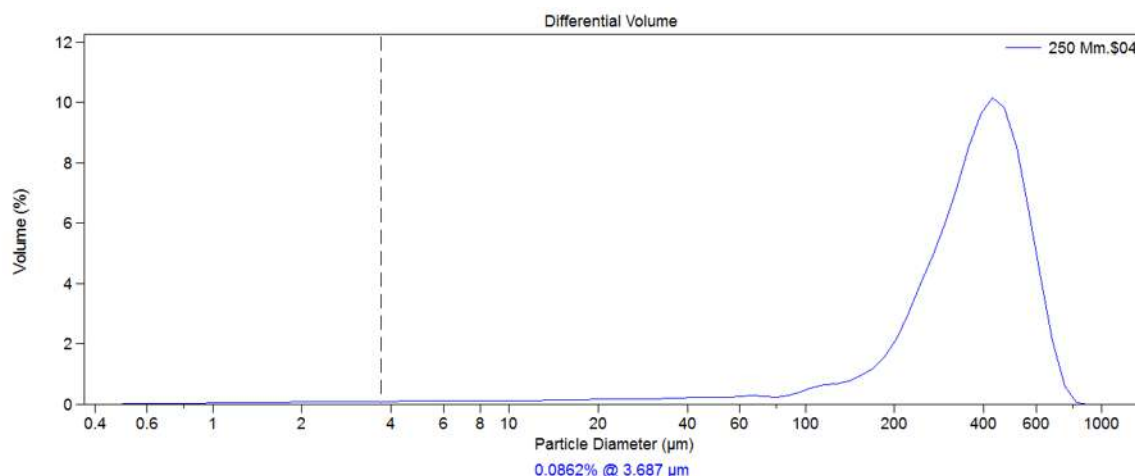


Figura 4.4. Distribución de tamaño de partícula de 250μm.

Los datos estadísticos arrojados por el programa son los que se muestran en la tabla XI.

Tabla XI. Análisis estadístico para partículas de 250μm.

Media (μm)	303.5
Mediana (μm)	378.8
Moda (μm)	429.2
Desviación estándar	2.423
Varianza	5.869
Sesgo	-3.367
Curtosis	13.84 Leptocúrtica

Por último se presenta que la distribución de este tamaño de partícula tiene la forma general de la sección de corte de una campana, Fig. 4.4, se puede hacer la siguiente aseveración que es mucho más firme:

1. Alrededor del 68% de las partículas caerán dentro de una desviación estándar de la media, esto es, $\bar{x}-s$ y $\bar{x}+s$; tomando en cuenta que la media es de 303.5, por lo tanto el 68% de las partículas cae dentro de 301.077 y 305.923.
2. Aproximadamente 95% de las partículas caerán dentro de dos desviaciones estándar de la media, es decir, que $\bar{x}-2s$ y $\bar{x}+2s$; tomando en cuenta que la

media es de 303.5, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 298.654 y 308.346.

3. Alrededor del 99.7% de las partículas caerán dentro de tres desviaciones estándar de la media, esto es, entre $\bar{x}-3s$ y $\bar{x}+3s$; tomando en cuenta que la media es de 303.5, por lo tanto el 95% de las partículas cae dentro de 296.231 y 310.769.

También se puede concluir de la tabla XI que el sesgo indica que la mayoría de los datos están cargados a la izquierda y la curtosis indica que al ser leptocúrtica se tiene una gran concentración de partículas en la región central.

Se puede notar que, los tamaños de partículas obtenidos por la caracterización mediante los tamices se encuentran distantes a los resultados mostrados por el equipo que calcula la distribución de tamaño de partícula. En uno de los argumentos que se puede usar para fundamentar esta variación es debido a que la geometría irregular de las inclusiones presente una cierta dificultad al pasar por las mallas, lo que puede provocar que se tamicen inclusiones más grandes en mallas con diámetro más pequeño, Fig. 4.5.

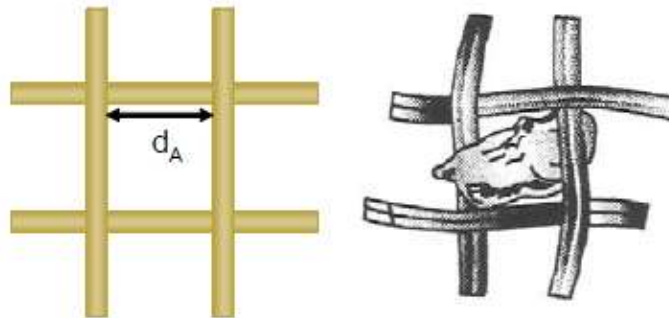


Figura 4.5. Diámetro de tamiz.

Cuando se desea caracterizar una partícula irregular por una sola dimensión debemos recurrir a la *Teoría de la Esfera Equivalente*. La idea es relacionar alguna o algunas propiedades geométricas de la partícula irregular con las correspondientes a una esfera y calcular a partir de estas relaciones un diámetro equivalente. Este es otro de los argumentos por el cual se puede decir que el equipo tiene una tendencia a sacar un diámetro de partícula a la geometría

ideal, lo que crea una incertidumbre en el sentido cuál es el diámetro que está obteniendo efectivamente.

Para conocer la morfología de las partículas se obtuvieron imágenes a través del microscopio electrónico de barrido. En la Fig. 4.6 se puede observar las inclusiones:

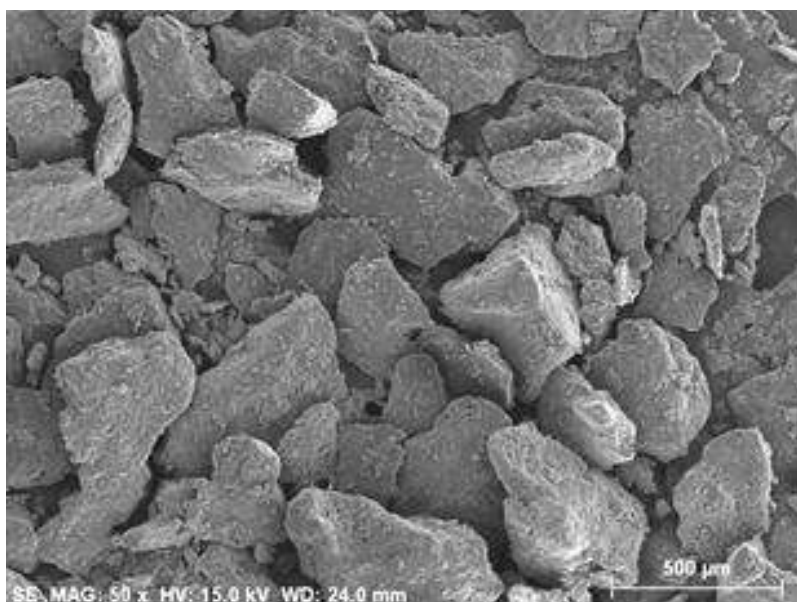


Figura 4.6. Imagen de inclusiones obtenidas por el SEM.

Utilizando las ventajas que brinda el software SigmaScan Pro, se calculó el diámetro de varias de las partículas observadas en la Fig. 4.6. El software se basa en el cálculo del diámetro de Feret que trata lo siguiente:

El diámetro de Feret es usado en microscopía. En este caso representa la distancia entre dos líneas paralelas que son tangenciales al contorno de la proyección de la partícula, tal como puede observarse en la Fig. 4.7. Como sucede con el diámetro de Martin, pueden determinarse diferentes diámetros de Feret de acuerdo a la dirección con la que se tracen las tangentes.

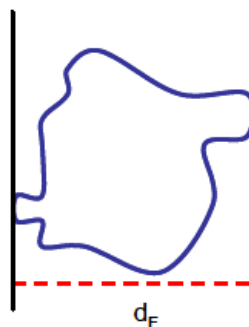


Figura 4.7. Diámetro de Feret.

El programa permite trazar dos ejes (mayor y menor) para poder obtener los parámetros que sean seleccionados en la herramienta de mediciones. Los parámetros seleccionados y que son los más importantes para el estudio son los que se muestran en la tabla XII. Con SigmaScan Pro se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XII. Resultados conseguidos de las partículas obtenidos por SigmaScan Pro.

Capa	Área (μm^2)	Diámetro de Feret (μm)	Eje mayor (μm)	Eje menor (μm)
1. Azul	2060.467829	51.21981179	582.3420179	193.0712651
2. Rojo	2752.990211	59.20486469	749.6915939	179.3188993
3. Amarillo	1957.87192	49.92834818	450.3024133	241.3479377
4. Acqua	2180.163055	52.68652405	612.892992	203.0008783

En la Fig. 4.8 se puede observar las partículas seleccionadas para obtener los parámetros mencionados en la tabla X, previamente se calibró el programa basándose en la cota de $500\mu\text{m}$ y se hizo la calibración para poder hacer el cálculo de área y distancia reales.

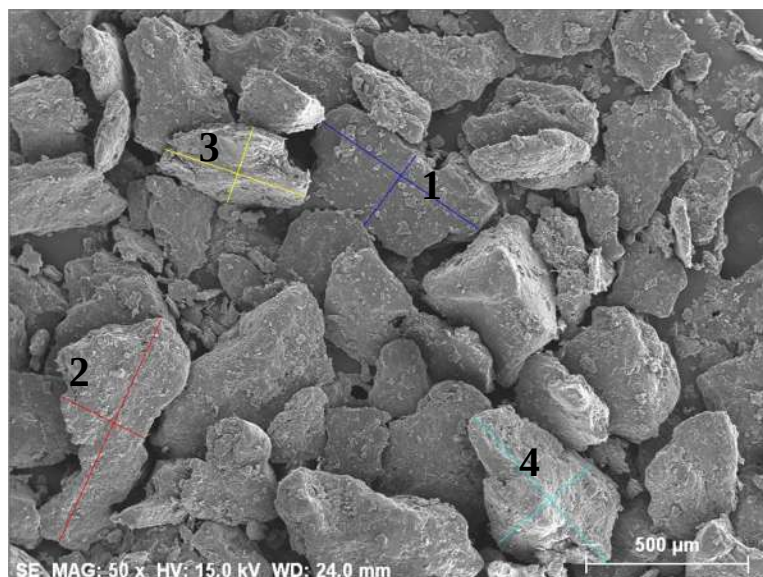


Figura 4.8. Trazo de ejes para el cálculo del diámetro de Feret.

4.2 Digitalización de las señales del acelerómetro

Se hicieron algunos ensayos, en el modelo de agua, para poder validar la utilidad y sensibilidad del acelerómetro y ver si éste podría ser usado para medir los niveles de energía de agitación del metal dentro del molde de colada continua y correlaciones con la eliminación de inclusiones. Con base a los resultados obtenidos de las simulaciones, tanto matemática como física, se pudo analizar y determinar que existe una relación que es directamente proporcional entre el incremento del movimiento de las inclusiones con el aumento de la velocidad de colada continua. En la Fig. 4.9 se muestra esta relación.

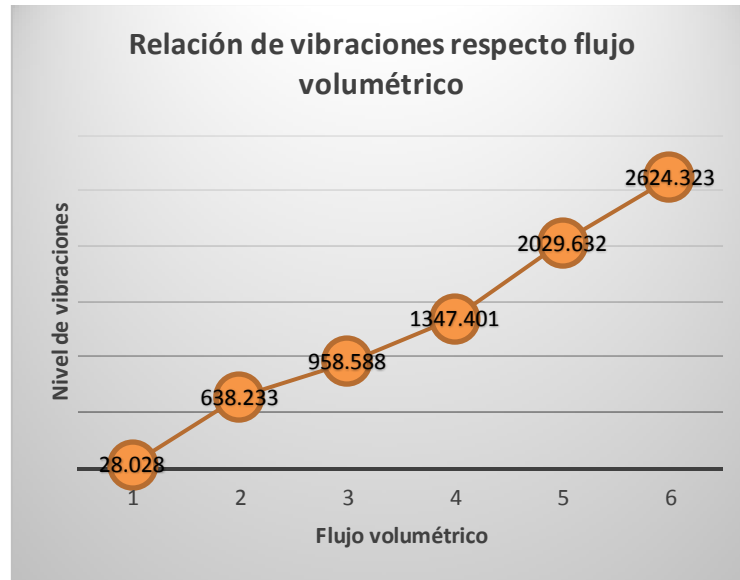


Figura 4.9. Magnitud de las vibraciones en función del flujo volumétrico.

Se puede observar en la Fig. 4.10, que a medida que aumenta la velocidad de colada también se da un incremento en el nivel de vibraciones. Por lo tanto, la manera de relacionar este nivel de vibraciones con la posibilidad de eliminar inclusiones es que sí se conoce el nivel de energía que se encuentra en el modelo físico este se puede relacionar con el atrapamiento de inclusiones en la capa de polvo lubricante.

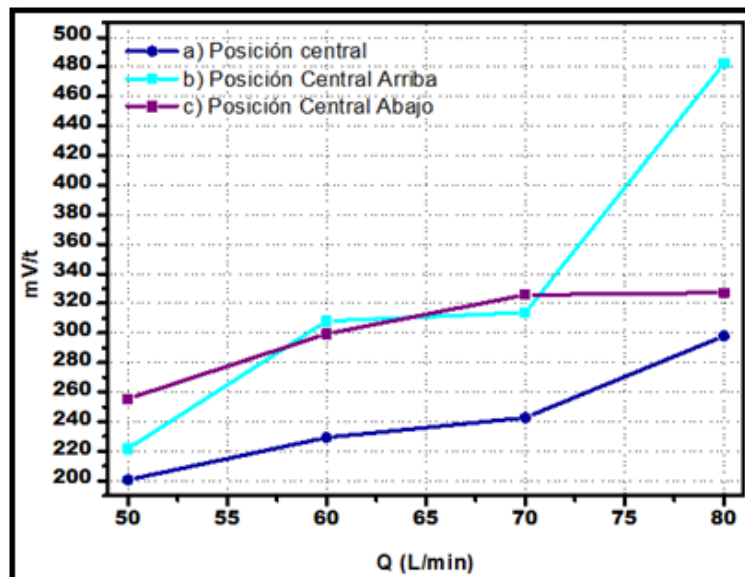


Figura 4.10. Relación de velocidad y nivel de energía en el modelo.

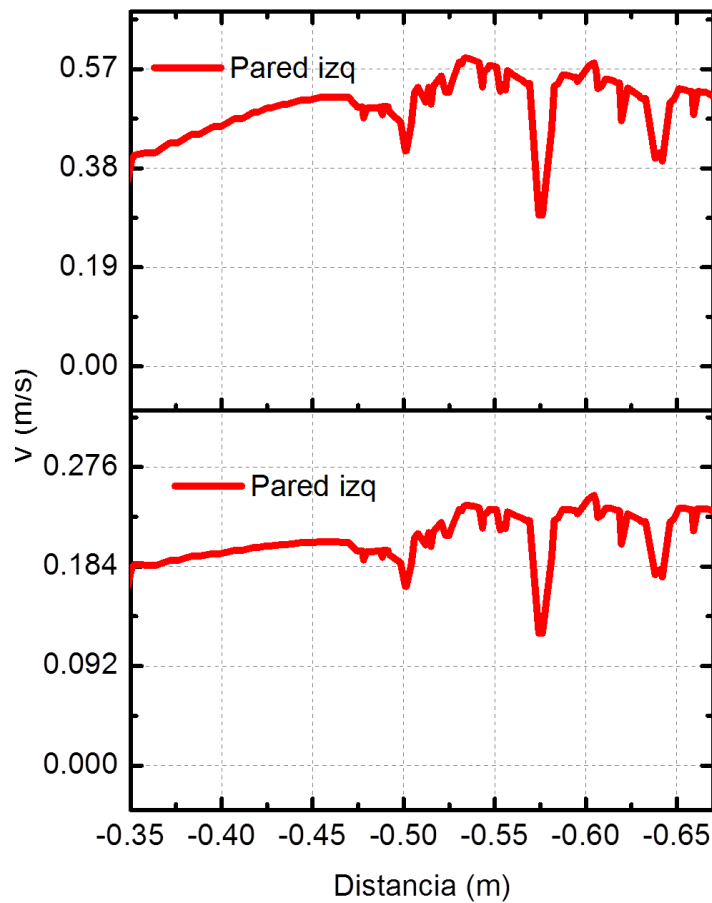


Figura 4.11. Relación de la velocidad con respecto a la pared del modelo.

En la Fig. 4.11 se hace un comparativo de cómo se comporta el fluido en las paredes del modelo, la primera gráfica a velocidad de colada 8 L/min y la de abajo a de 4 L/min. Como es de esperarse para una mayor velocidad de colada hay una mayor velocidad del fluido en las paredes del molde que puede ser traducido como una mayor intensidad de las vibraciones que se manifiestan en una mayor energía de disipación en el modelo.

Basados en los puntos que anteriormente se habían mencionado en el apartado referente a la digitalización de las señales del acelerómetro, se obtuvieron diferentes niveles de vibraciones para las tres diferentes velocidades de colada. En la Fig. 4.12 se muestra las señales del acelerómetro en los cuatro puntos seleccionados en el molde.

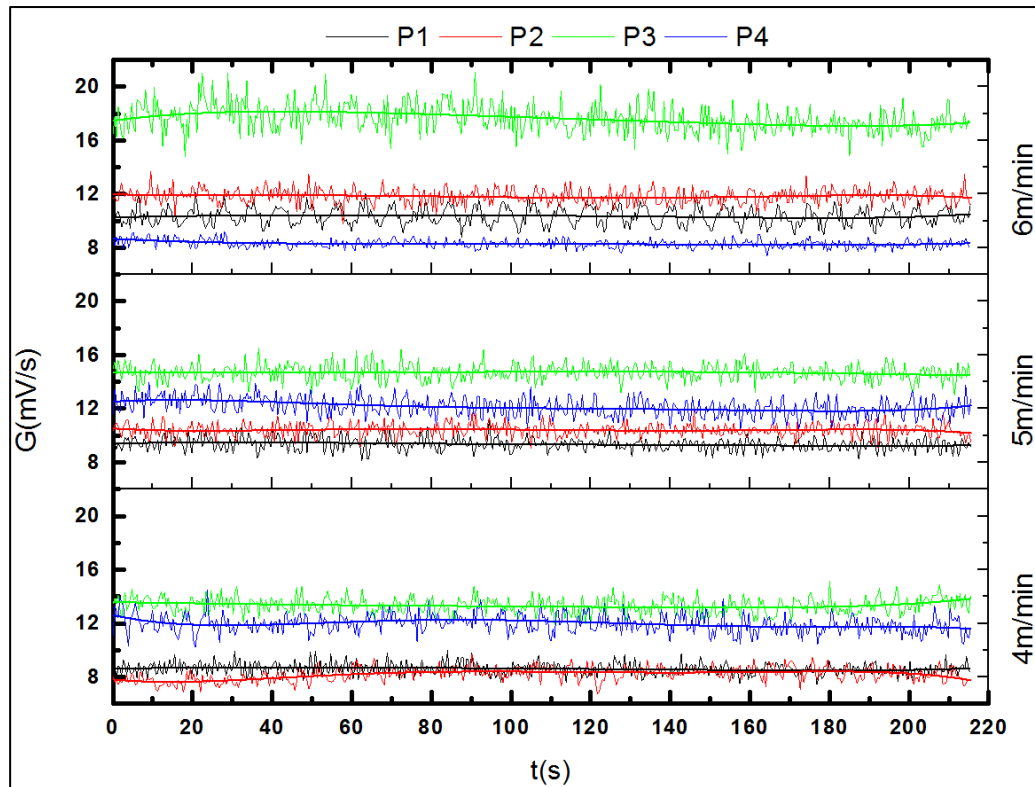


Figura 4.12. Comparación de los niveles de vibraciones a las diferentes velocidades de colada continua.

Como se puede observar, a la mayor velocidad de colada se obtienen los valores más altos de vibraciones y esto hace alusión a la alta actividad fluidinámica que se presenta en molde. Otro de los aspectos importantes para analizar es que la lógica indicaría que el punto uno, Fig. 4.12, es donde se esperaría que se presentara la mayor intensidad de las vibraciones (zona donde impacta directamente el chorro) y lo que se aprecia es la formación de una zona de muy baja velocidad y de “colchón” donde realmente los vectores del fluido no chocan aquí, si no el chorro toma dos vertientes: la recirculación inferior y superior; en esta última parte el flujo en vez de disipar su velocidad la aumenta debido al régimen de mezclado que se presenta para mantener el equilibrio mecánico. Notoriamente el punto tres es el que presenta una mayor intensidad de vibraciones.

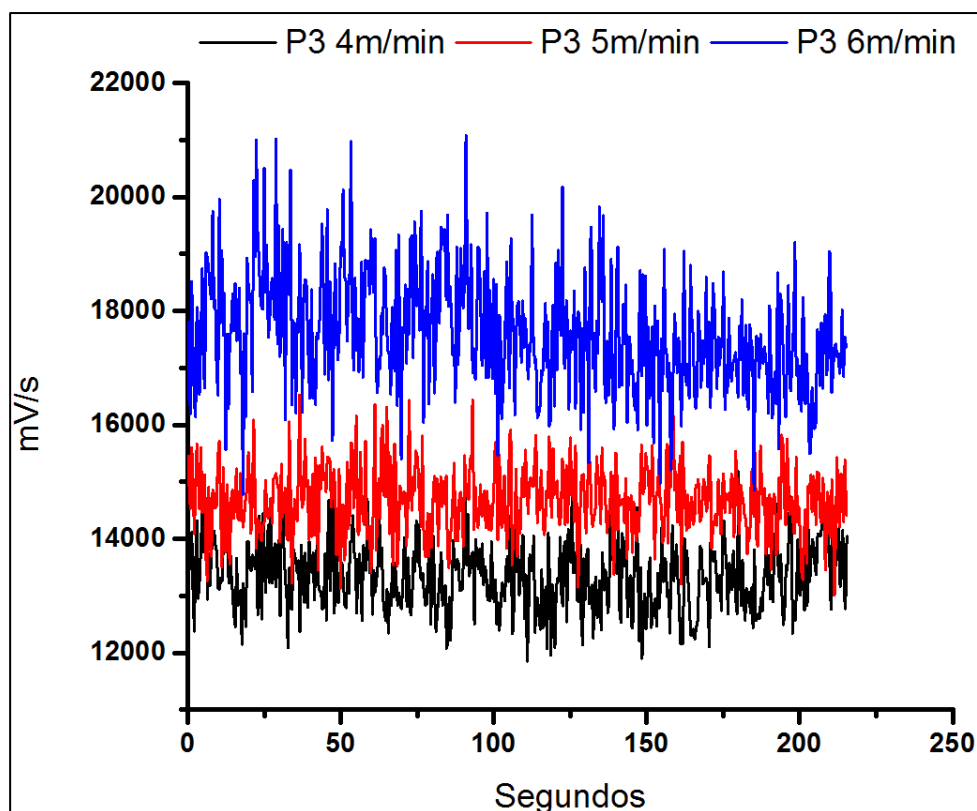


Figura 4.13. Comparación de los niveles de vibraciones en el punto tres a 6 m/min.

De lo mostrado en la Fig. 4.13 se puede argumentar que en el punto tres a una velocidad de colada de 6 m/min se obtienen los más altos niveles de vibraciones. De aquí parte la relación que existe entre la eliminación de inclusiones con las vibraciones, hecho que se analizará en una sección posterior.

4.3 Simulación física

Se llevaron a cabo varios experimentos en los que se modificó tanto la velocidad de colada como la profundidad de la buza. En las siguientes figuras se describe el comportamiento de las inclusiones bajo la influencia de dichas variables.

Las inclusiones deben estar previamente preparadas con dispersante para que no se aglomeren al momento de ser introducidas a la buza. Una vez que el flujo esta nivelado y no hay burbujas en la buza, se inyectan las partículas. En la Fig. 4.14 se puede observar como salen las inclusiones por los puertos de la buza a una velocidad de colada 5 m/min.

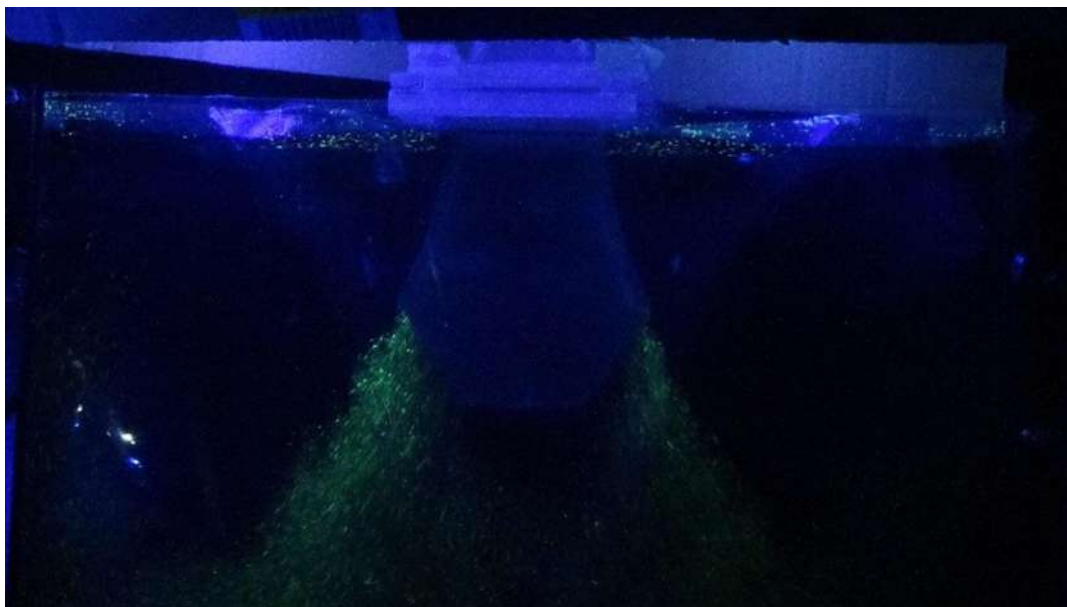


Figura 4.14. Inclusiones de 250 μ m (modelo) a un tiempo de 1.5 segundos.

En la Fig. 4.15 se puede observar que a un tiempo de 4 segundos las partículas son arrastradas por el patrón de flujo que se presenta en el molde provocado por las recirculaciones superiores, lo cual es debido a la transferencia de movimiento del chorro principal proveniente de los puertos de la buza. Esto a su vez provoca que una cantidad de inclusiones, al momento de que el chorro impacta la pared delgada, sean arrastradas por la recirculaciones inferiores provocando que una parte de ellas queden atrapadas en el cambio de fase del acero líquido (zona pastosa o frente de solidificación) y otras en la pared donde se está formando la costra de acero solidificado.

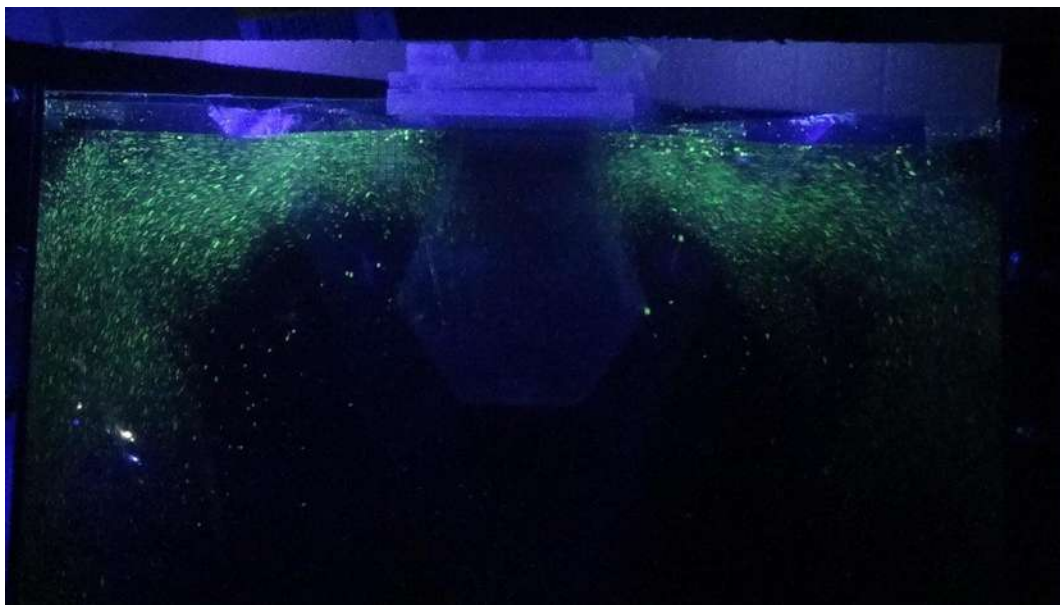


Figura 4.15. Inclusiones de $250\mu\text{m}$ (modelo) a un tiempo de 4 segundos.

En la Fig. 4.16 se puede ver que aunque una gran cantidad de las inclusiones han sido arrastradas por la recirculación inferior, una gran parte de estas pueden ser capturadas por la capa de polvo lubricante (escoria) que se encuentra en la superficie del molde.

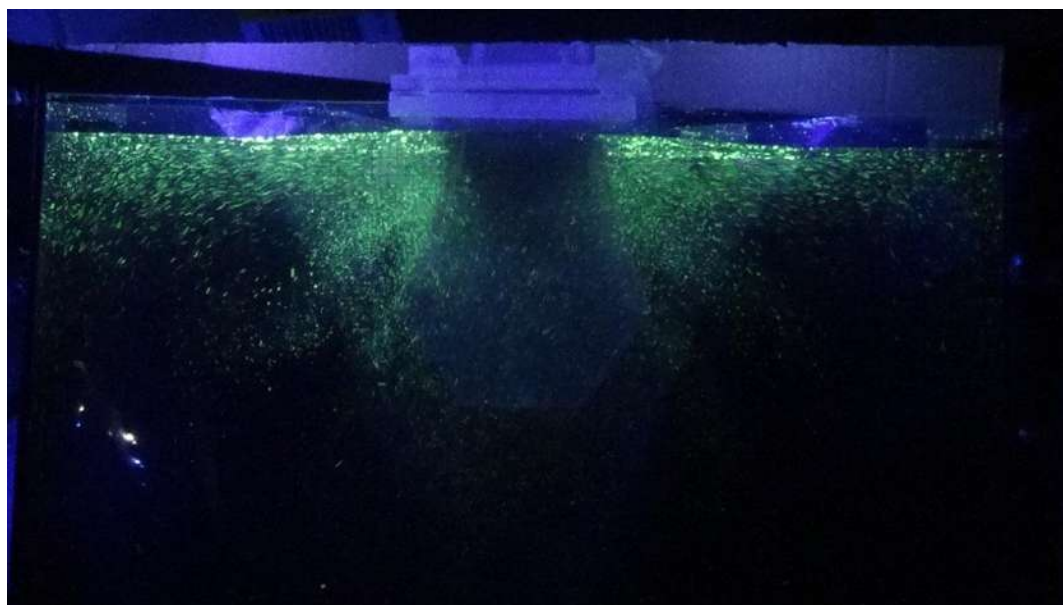


Figura 4.16. Inclusiones de $250\mu\text{m}$ (modelo) a un tiempo de 9 segundos.

El análisis de la Fig. 4.17 se observa que muchas de estas partículas entran en una zona de baja velocidad lo cual se debe el cambio de área por la forma cónica del molde. Esto da una

oportunidad que las inclusiones que quedan en esta zona puedan ser flotadas o reintroducidas al patrón fluidinámico. Como también se observa que pueden ser arrancadas muchas partículas de la capa de escoria debido a las fuerzas de arrastre que provocan los vórtices, los cuales son inducidos por los choques de los flujos con la buza ocasionando cambios de velocidad y presión. Muchas de esas inclusiones son muy pequeñas y al no alcanzar la masa crítica no son eliminadas por la capa de escoria. Además dichas inclusiones al ser tan pequeñas no disminuyen la calidad de los planchones.

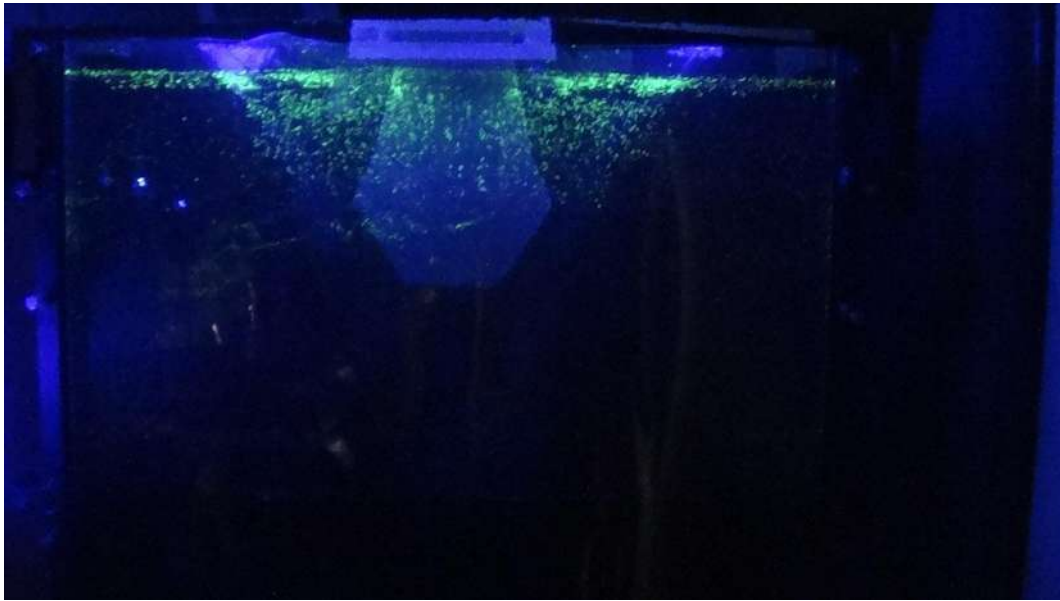


Figura 4.17. Inclusiones de 250 μ m (modelo) a un tiempo de 20 segundos.

En la Fig. 4.18 se muestra la gran cantidad de partículas que son atrapadas por la capa de polvo lubricante cercana a la zona de la buza por el fenómeno que previamente ya se había mencionado, la zona de baja velocidad. Es importante recalcar que muchas de estas inclusiones se encuentran aglomeradas y que por lo tanto aumentan su probabilidad de flotación debido a que alcanzan el radio crítico que les permite llegar a la interfase metal-escoria más fácilmente en comparación a radios de partículas más pequeños.



Figura 4.18. Inclusiones de 250 μ m (modelo) a un tiempo de 40 segundos.

En la Fig. 4.19 se observa partículas más pequeñas, que son las que no se aglomeraron y que por los efectos de la recirculación del flujo se arrastraron a la capa de polvos lubricantes (escoria). Se vuelve a hacer evidente la gran cantidad de partículas cercanas a la zona de la buza.



Figura 4.19. Inclusiones de 250 μ m (modelo) atrapadas en la capa de escoria.

Otro de los fenómenos observados en los experimentos es que debido al adelgazamiento la capa de escoria por el arrastre generado por el flujo recirculante, hay una menor cantidad de

partículas atrapadas en la zona de la escoria cercana a las paredes del molde. Este fenómeno se observa en la Fig. 4.20 y 4.21.

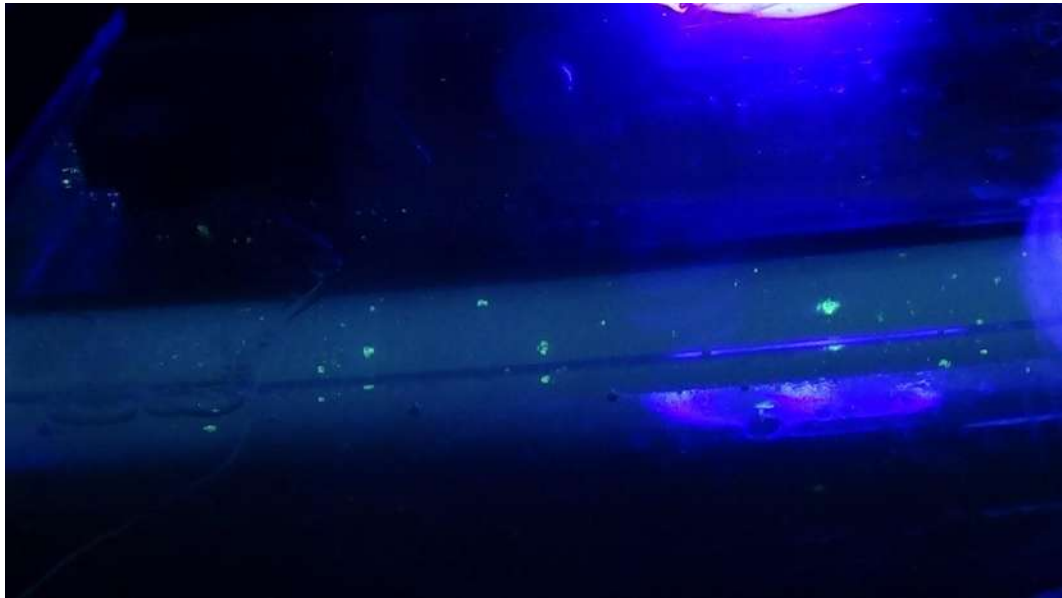


Figura 4.20. Inclusiones de 250µm (modelo) atrapadas en la zona cercana a la pared del molde.

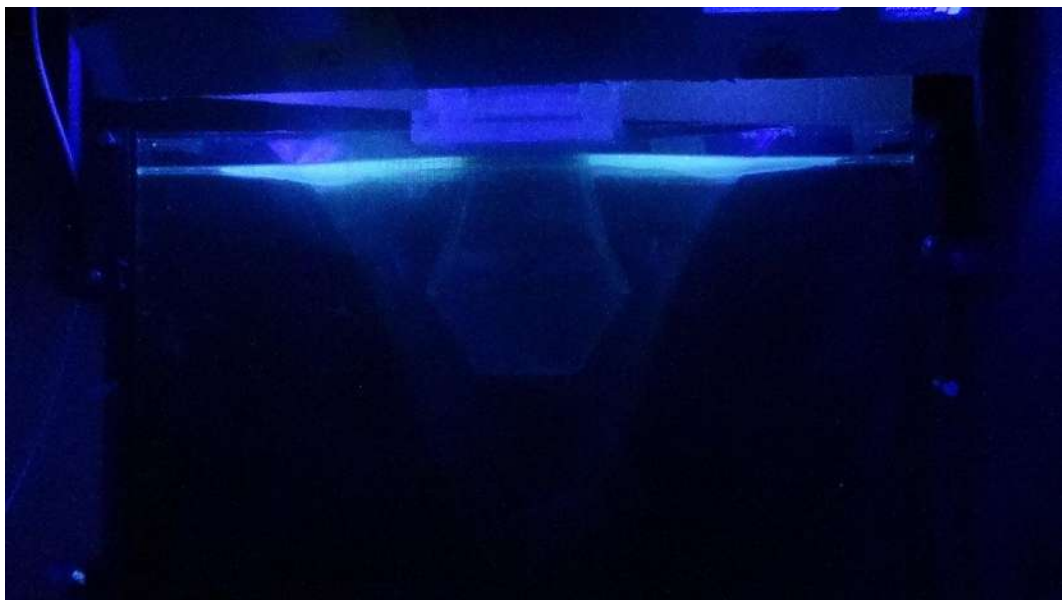


Figura 4.21. Adelgazamiento de la capa de escoria cercana a las paredes del molde.

En cuanto a la cantidad de partículas atrapadas por la capa de escoria se obtuvieron los siguientes resultados:

Para los experimentos con velocidades de colada de 4,5 y 6 m/min a una profundidad de buza de 22 cm, se observa en la Fig. 4.22 los porcentajes de eliminación de inclusiones. Es importante recalcar que los resultados obtenidos de la simulación matemática solo se pudieron realizar para la buza original a los dos profundidades de inmersión de buza.

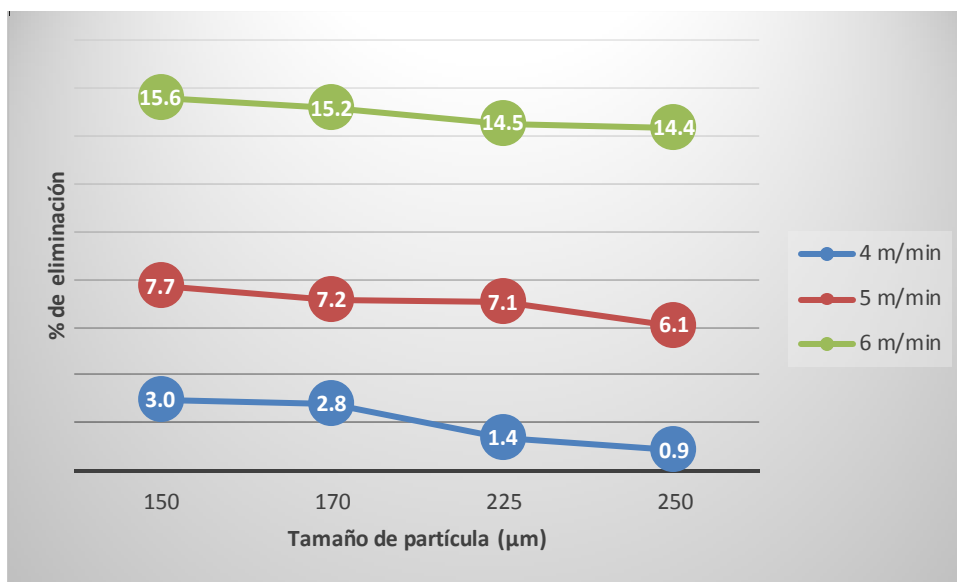


Figura 4.22. Comparación del porcentaje de eliminación de inclusiones a 22 cm de inmersión de buza.

De la Fig. 4.22 se puede ver lo que ya se había mencionado antes de que a la más alta velocidad de colada se obtiene el mayor porcentaje de eliminación de inclusiones. Y esto se explica porque a que a altas velocidades de colada el arrastre generado por la recirculación superior del fluido permite incrustar una gran cantidad de inclusiones en la capa de escoria, hecho que también está relacionado con el menor tiempo de residencia de las partículas en el molde.

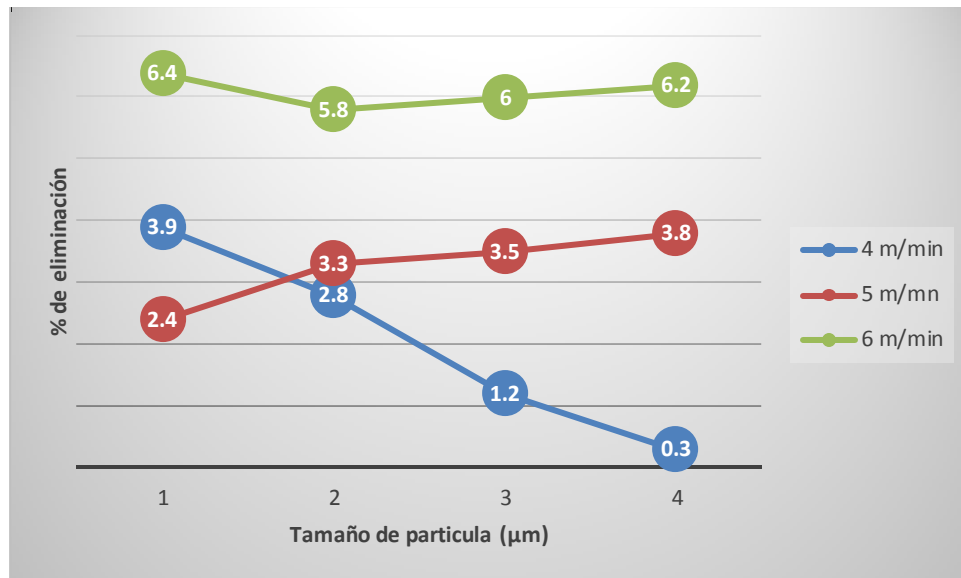


Figura 4.23. Comparación del porcentaje de eliminación de inclusiones a 34 cm de inmersión de buza.

De igual forma en la Fig. 4.23 se puede ver que a la velocidad de colada de 6 m/min se presenta una mayor eliminación de inclusiones.

4.1.3 Simulación matemática

En la fase de la simulación matemática se llevó a cabo para las dos geometrías de buza, así como para las dos profundidades de buza y las tres velocidades de colada. Todos los casos se resolvieron con los mismos tiempos e iteraciones de simulación. Otro aspecto importante a mencionar es que en todos los casos resueltos se simulaban 100 partículas en el seno del metal líquido entrante, esto se hace debido a que los tiempos de procesamiento matemáticos en el ordenador son muy altos a medida que se incrementan las cantidades de partículas. Sin embargo para la obtención del número de inclusiones atrapadas se hicieron bajo el criterio de tomar en cuenta 14, 000 partículas.

Una vez que se introduce al software (Fluent®) la cantidad de partículas a ser inyectadas se genera una capa por la cual todas las inclusiones que lleguen a ella son atrapadas. Con base a esta premisa se muestran los siguientes resultados:

En la Fig 4.24 se hace un comparativo del comportamiento de las inclusiones dentro del molde a una velocidad de colada de 4 m/min, es decir, se generan las trayectorias de las partículas en donde se puede ver las que son llevadas a la zona pastosa (interfase líquido-sólido) donde no

podrán ser recuperadas. En el inciso a y b se hace la comparación de las trayectorias de las partículas a una profundidad de buza (modificada y original respectivamente) de 34 cm, se puede observar en el inciso “a” la simetría de los chorros la cual indica una menor oscilación de la superficie evitando que la capa de escoria se abra y reingresen partículas al molde o se da una reoxidación del acero. Los incisos c y d, que se encuentra a una inmersión de buza de 22 cm, similarmente a los ya mencionados tienen la peculiaridad de que la penetración de los chorros es menor, esto se ve reflejado en los menores tiempos de residencia de las partículas dentro del molde.

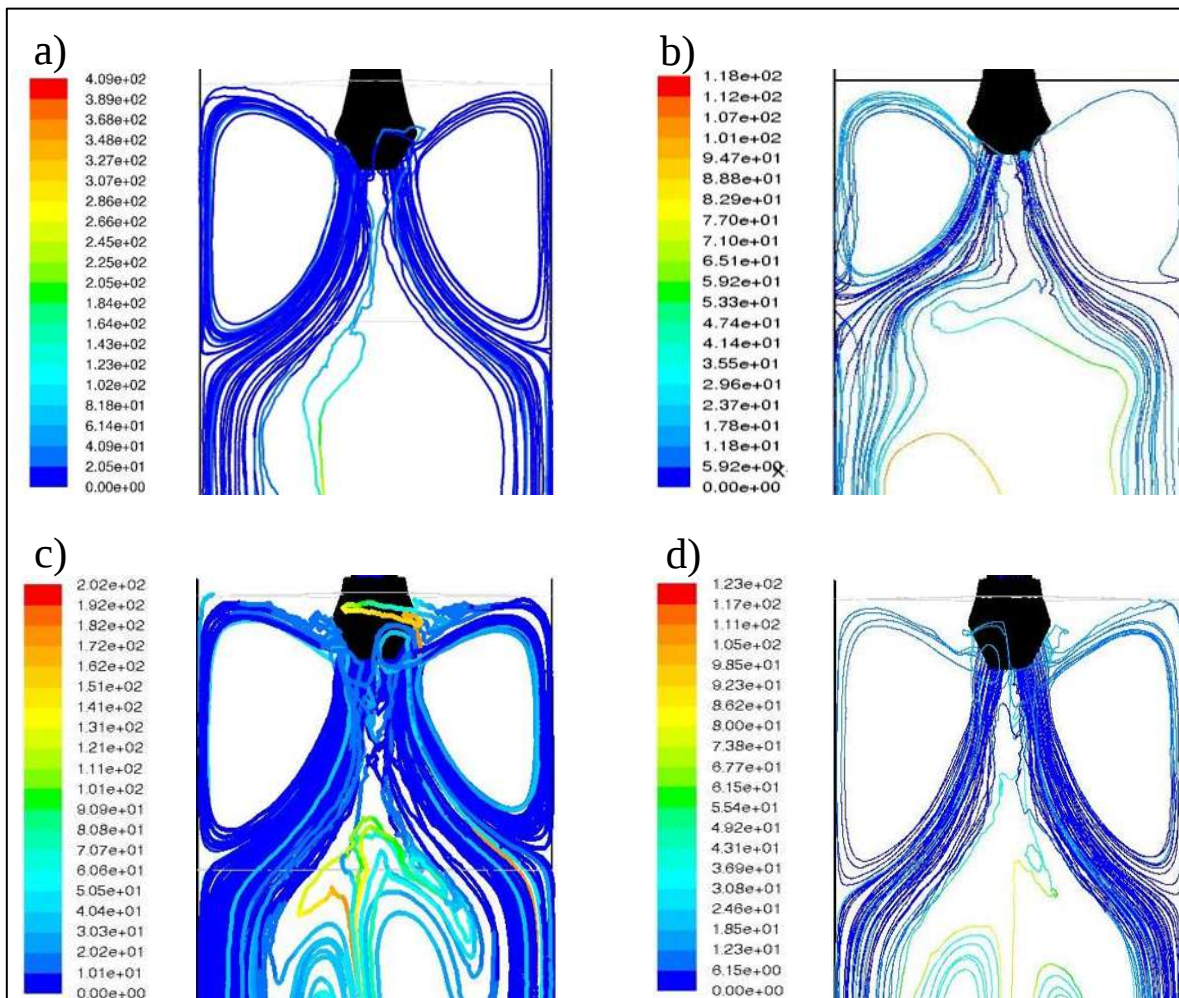


Figura 4.24. Trayectoria de partículas de 150 μm donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 4 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.

De la Fig. 4.24 también se puede analizar y observar una tendencia a cargarse más el flujo y la cantidad de inclusiones que salen por el puerto izquierdo de la buza, esto puede ser explicado debido a los cambios de presión que se dan debido a la geometría interna de la buza; provocando oscilaciones en los chorros. De otra manera se puede entender que las presiones provocadas por el choque del flujo con la división de la buza, genera oscilaciones o fluctuaciones en los puertos generando el efecto de que hay más flujo en la salida de un puerto respecto a la otra. Aunado asimismo al hecho de que las imágenes están tomadas en tiempo de simulación de 300 segundos, por lo que no se puede controlar el hecho de que en ese tiempo hacia donde se van a cargar los chorros.

En la Fig. 4.25 se puede ver un comparativo del comportamiento de las inclusiones dentro del molde a una velocidad de colada de 5 m/min. En el inciso a y b se hace la comparación de las trayectorias de las partículas a una profundidad de buza (modificada y original respectivamente) de 34 cm, la diferencia entre estos dos incisos se ve en el primero que genera, durante la recirculación, que varias de las partículas lleguen a la superficie, esta misma recirculación arrastra y vuelve a arrastrar partículas generando grandes tiempos de residencia. Los incisos c y d, que se encuentra a una inmersión de buza de 22 cm, generan impactos de los chorros en zonas más arriba con respecto a los incisos anteriores lo cual puede ser entendido como un generador de oscilaciones en la superficie. Otro aspecto a destacar es la gran cantidad de partículas que en estos dos últimos incisos arrastran a profundidades donde las inclusiones no pueden ser recuperadas o eliminadas.

De igual forma en la Fig. 4.25 se puede observar el fenómeno que previamente se había explicado, a una profundidad de buza de 34 cm se analiza claramente que hay mayor concentración de partículas por la salida del puerto izquierdo de la buza.

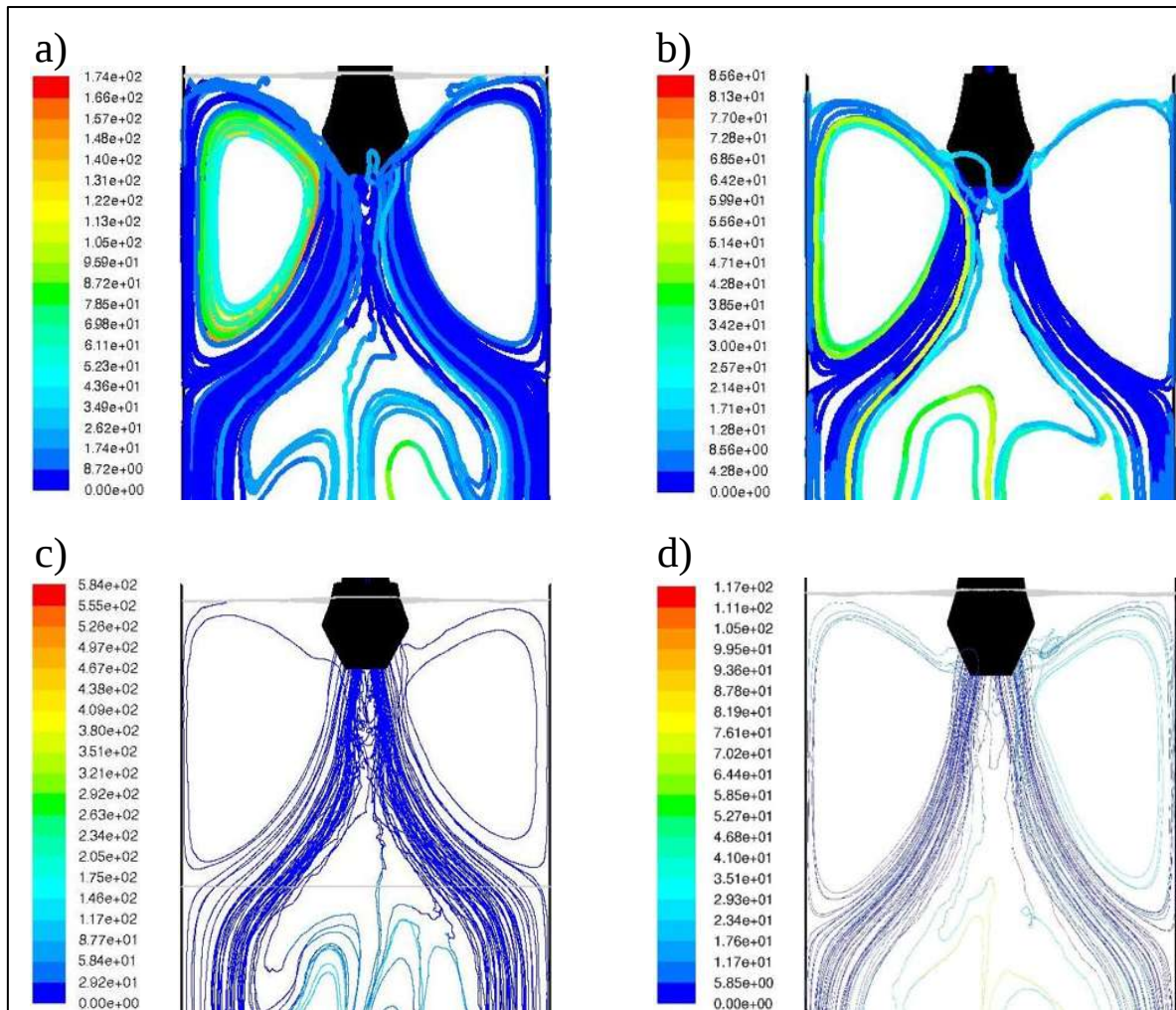


Figura 4.25. Trayectoria de partículas de 150 μm donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 5 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.

En la Fig. 4.26 en los cuatro incisos se muestra que la más alta velocidad de colada es la que provoca la mayor eliminación de inclusiones, sin embargo para la inmersión de buza de 34 cm y modificada se obtiene el mejor rendimiento respecto a las demás. Por lo tanto a menores tiempos de residencia de las partículas tienen la mayor probabilidad de ser eliminadas en la primer recirculación, que es cuando se genera el mayor arrastre de partículas a la capa de polvo lubricante.

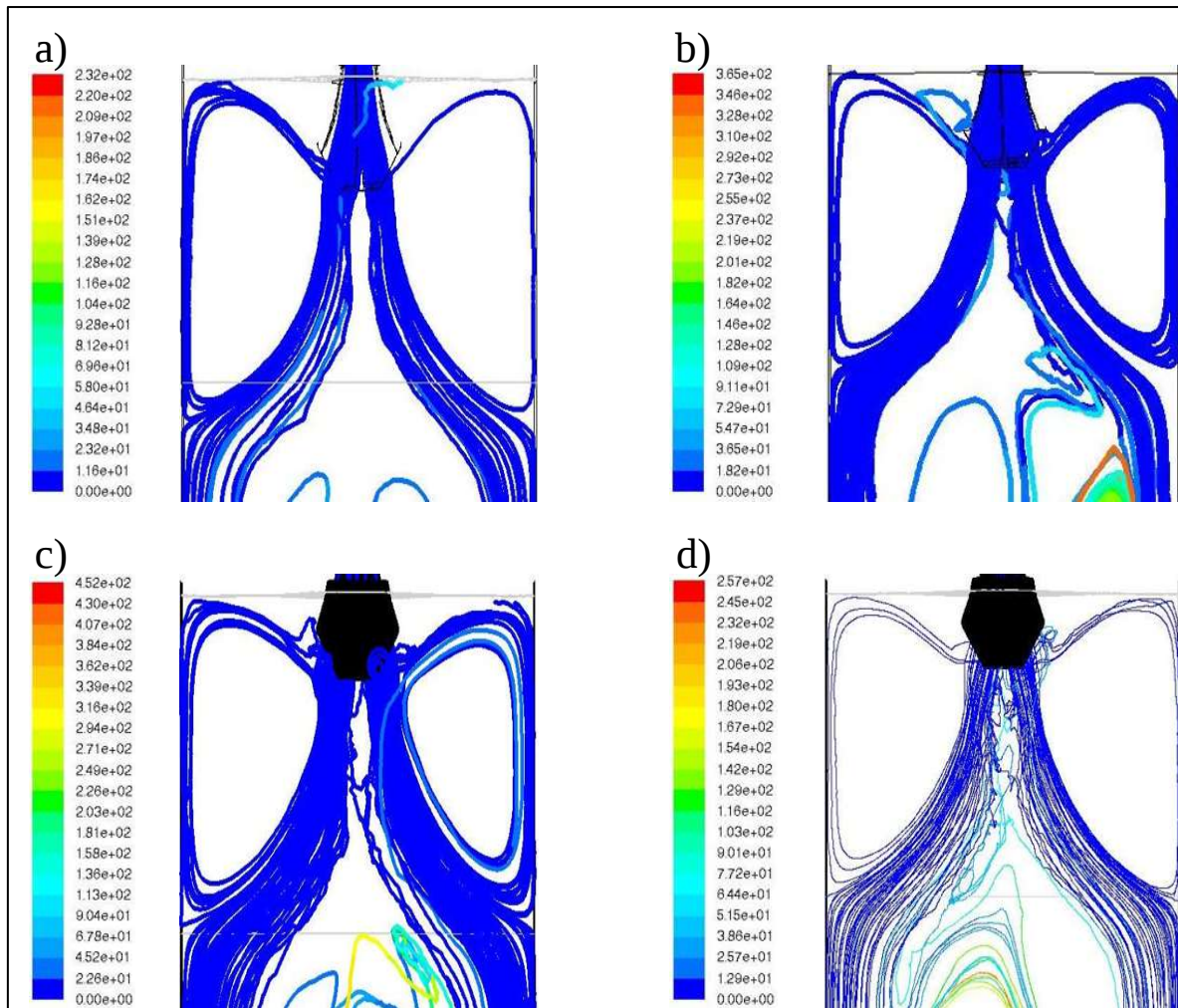


Figura 4.26. Trayectoria de partículas de $150\ \mu\text{m}$ donde a) y b) pertenecen a una profundidad de buza de 34 cm modificada y original respectivamente; c) y d) pertenecen a una profundidad de buza de 22 cm modificada y original respectivamente, a una velocidad de colada 6 m/min respecto a un tiempo de residencia de las inclusiones.

En cuanto a la comparación de las eficiencias de eliminación de las inclusiones de las dos diferentes geometrías de buzas se obtuvieron los siguientes resultados para una profundidad de 22 cm; tomando en cuenta que para cada uno de los experimentos se inyectaron 14,000 partículas:

En la Fig. 4.27 se muestran los porcentajes de inclusiones atrapadas en la capa de polvo lubricante (escoria) para las dos diferentes geometrías de buza, el análisis indica un mayor porcentaje de eliminación de partículas por parte de la buza modificada con respecto a la original, esto se observó en a los resultados previamente obtenidos de la simulaciones matemáticas [15] las cuales mostraban una mejora en el patrón de flujo reduciendo las

oscilaciones de chorro, fluctuación de la interfase y efecto de la geometría interna de la buza sobre estos. Contrario a lo que dicta el sentido común, en el sentido de que a medida que aumenta el tamaño de partícula debería de ser más fácil de ser llevada a la superficie y debido a que logra el tamaño crítico de flotación, sin embargo en este caso no se presenta así y esto puede ser debido a la baja velocidad de colada. Al ser baja la recirculación no tiene la suficiente fuerza de flotación para acarrear las partículas más pesadas a la zona de captura.

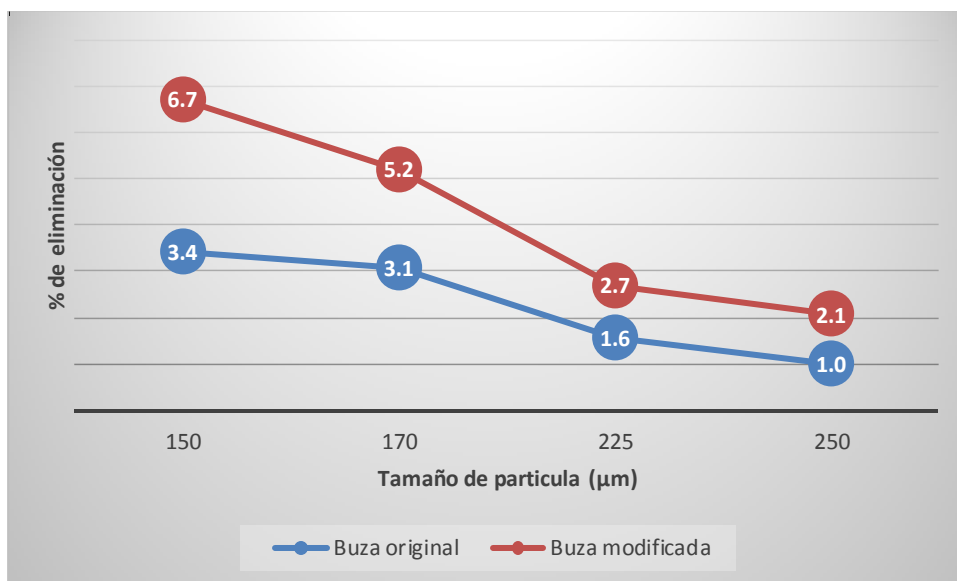


Figura 4.27. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 4 m/min.

El mismo caso se presenta para la velocidad de colada de 5 m/min, a diferencia de que el aumento de velocidad genera más arrastre en las recirculaciones superiores lo cual genera un incremento de eliminación con respecto a la velocidad anteriormente analizada. Esto se puede observar en la Fig. 4.28.

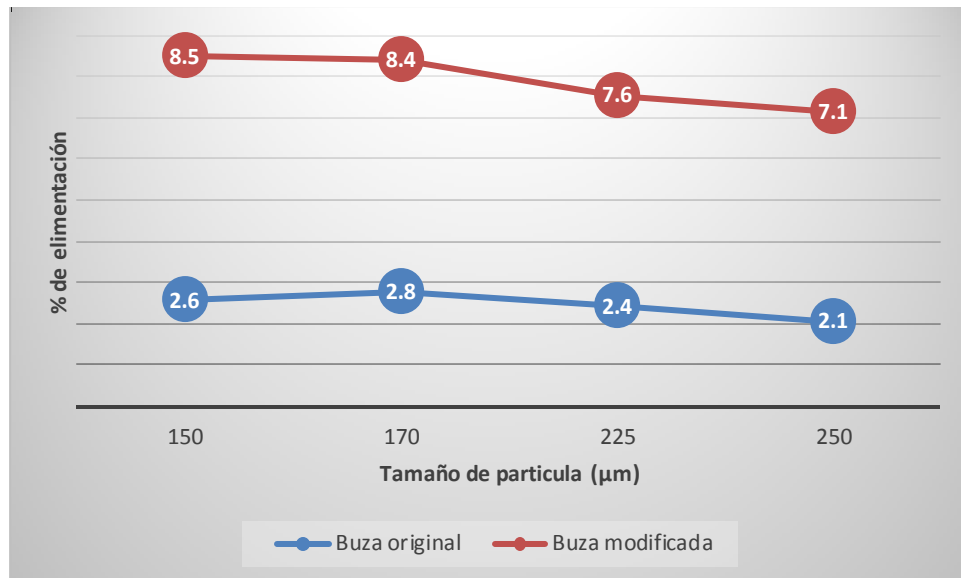


Figura 4.28. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.

En la figura 4.29 se puede observar un gran incremento en el porcentaje de eliminación de inclusiones. Por otra parte se puede ver que al contrario de lo que pasa con el caso de una velocidad de 5 m/min el porcentaje de eliminación aumenta con relación al incremento del tamaño de partícula. Esto es debido a que las partículas más grandes alcanzan la velocidad de flotación de Stokes más fácilmente. Esto también se fundamenta con el hecho de que al aumentar la velocidad de colada se incrementa la velocidad de arrastre llevando las partículas al frente de solidificación o a la interfase metal-escoria donde son atrapadas.

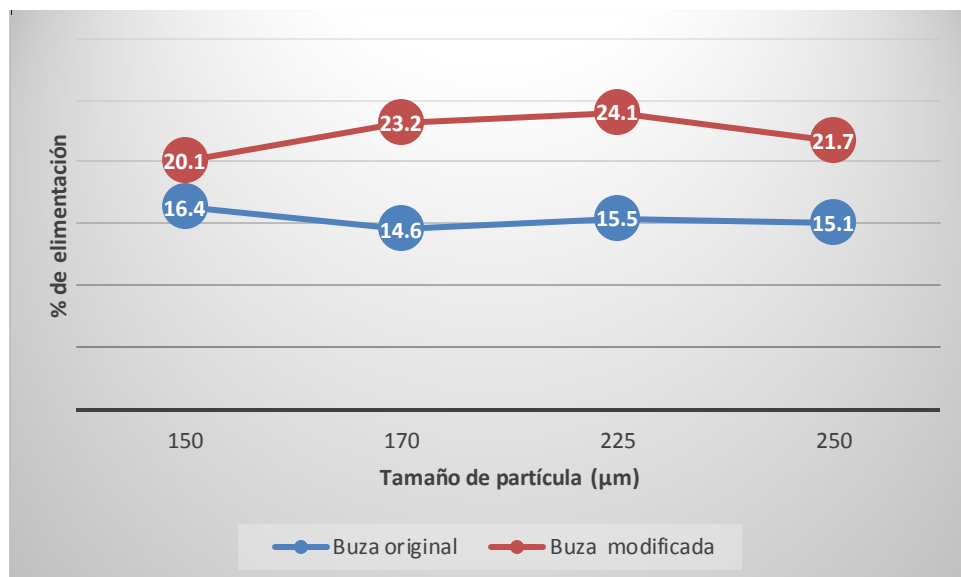


Figura 4.29. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 6 m/min.

Posteriormente se hicieron las simulaciones matemáticas para profundidades de buza de 34 cm y con las tres velocidades de colada que se habían estado manejando. De igual forma se simularon para cada uno de los casos 14,000 partículas.

Como es de entenderse simular a altas velocidades de colada implica el riesgo de acarrear más inclusiones a la zona baja del planchón lo que haría prácticamente imposible su remoción. Sin embargo, la posibilidad de eliminar más partículas está relacionada con la configuración de la geometría de la buza que conlleva al mejoramiento de los patrones de flujo del metal líquido en el molde de colada.

En la Fig. 4.30 se observa un mayor porcentaje de eliminación de inclusiones de la buza modificada con respecto a la original. Sin embargo, la disminución de este porcentaje (ambas buzas) debido al incremento de tamaño de partícula es explicado por el bajo arrastre que se genera a una velocidad de 4 m/min, aunado a la profundidad de la buza. Esto implica que disminuyan las posibilidades de remoción de las inclusiones.

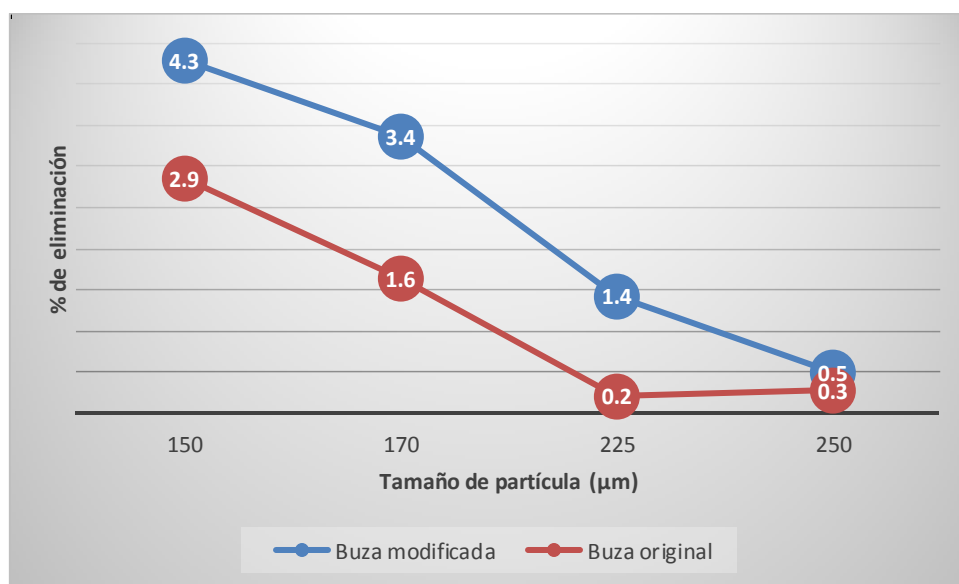


Figura 4.30. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 6 m/min.

Para la Fig. 4.31 se observa no solo el incremento de la remoción de las partículas con el aumento de la velocidad, sino que también el tamaño de inclusión ayuda a su eliminación.

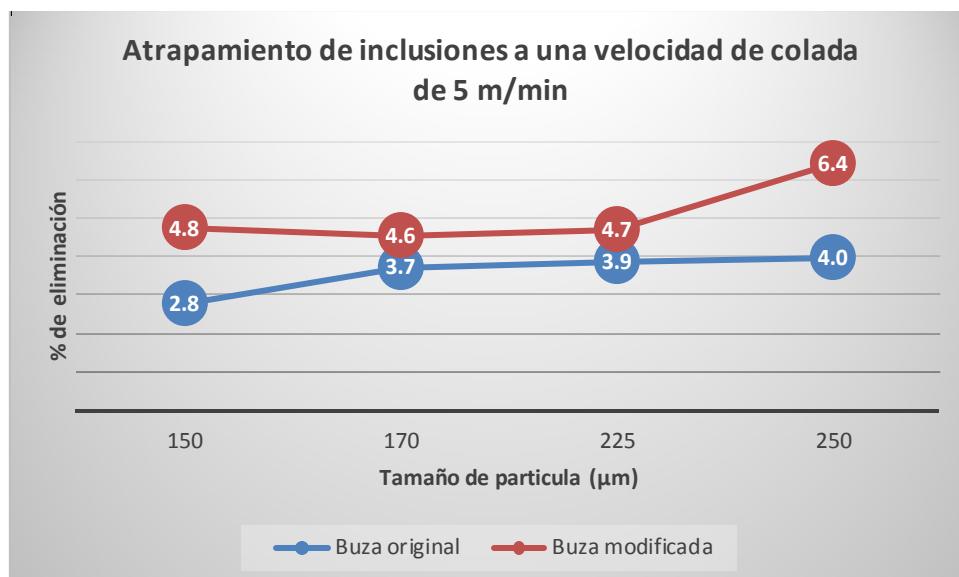


Figura 4.31. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.

Por último en la Fig. 4.31 se puede establecer, por el análisis llevado a cabo, que efectivamente el aumento de la velocidad de colada juega un papel importante en el arrastre de partículas, incrementándose con esto la probabilidad de remoción de las inclusiones al tener mayor contacto con la interfase metal-escoria.

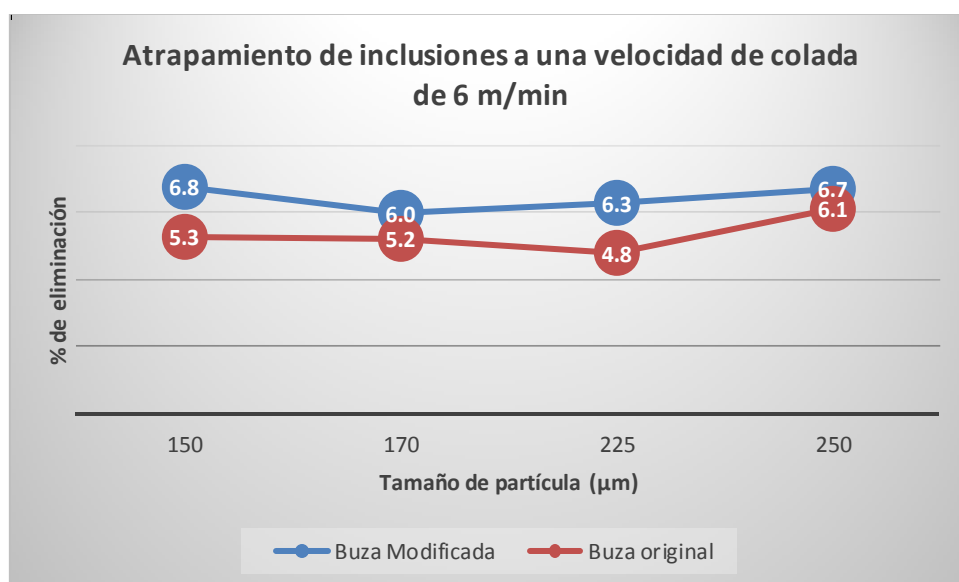


Figura 4.32. Comparativa del porcentaje de atrapamiento de las dos diferentes geometrías de buza a una velocidad de colada de 5 m/min.

4.1.5 Validación del modelado matemático

Finalmente, la importancia de la validación de los resultados obtenidos en las dos tipos de simulaciones es fundamental para garantizar reproducibilidad de los experimentos realizados y la confianza que se debe tener o no del modelado matemático. A continuación se mostraran los resultados que pueden ser comparables debido a que en la simulación física solo se pudieron llevar a cabo con la buza original.

En la Fig. 4.33 se muestra un comparativo de los porcentajes de eliminación para una profundidad de buza de 22 cm y velocidad de colada de 4 m/min, se observa claramente la tendencia de los datos a ser similares entre las dos simulaciones, sin embargo puede considerarse difícil saber a ciencia cierta cuantas partículas se recuperaron del modelo físico debido a que hay un cierto porcentaje de error en el tratamiento de las inclusiones al sacarlas de la capa de escoria, secarlas y posteriormente pesarlas.

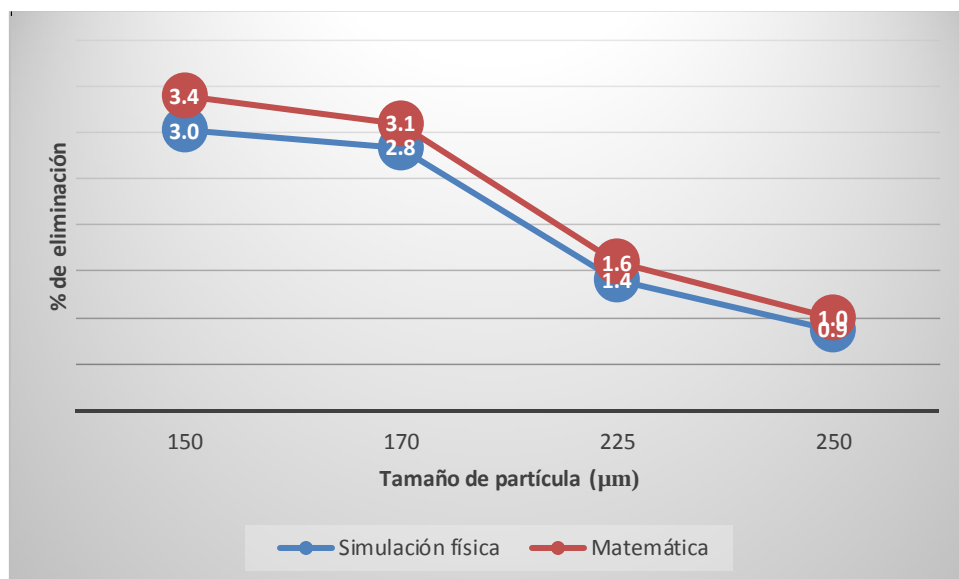


Figura 4.33. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 4 m/min.

Esta misma tendencia de similitud en los porcentajes de eliminación de partículas se muestra en las figuras 4.34 y 4.35. Para velocidades de colada de 5 y 6 m/min respectivamente, ambas para inmersiones de buza de 22 cm.

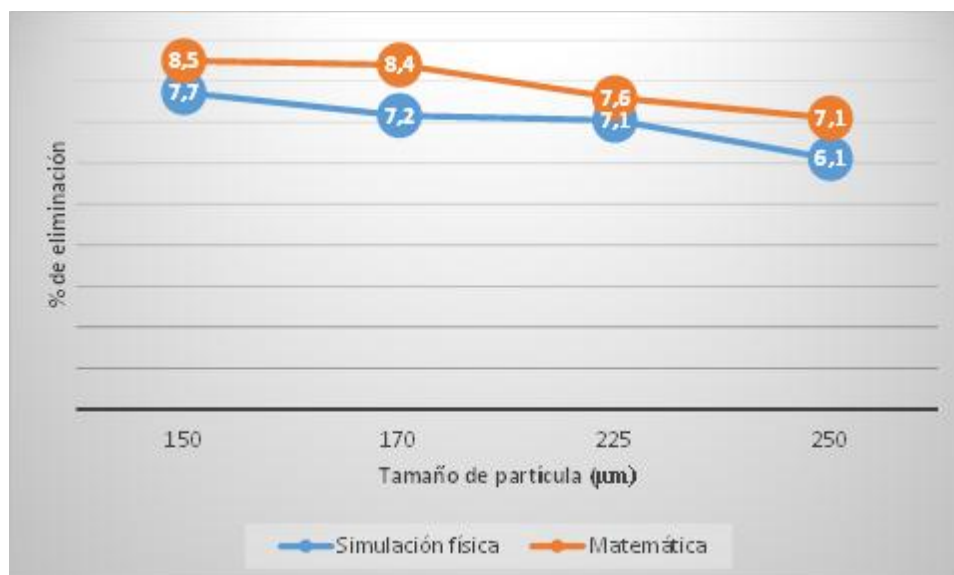


Figura 4.34. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 5 m/min.

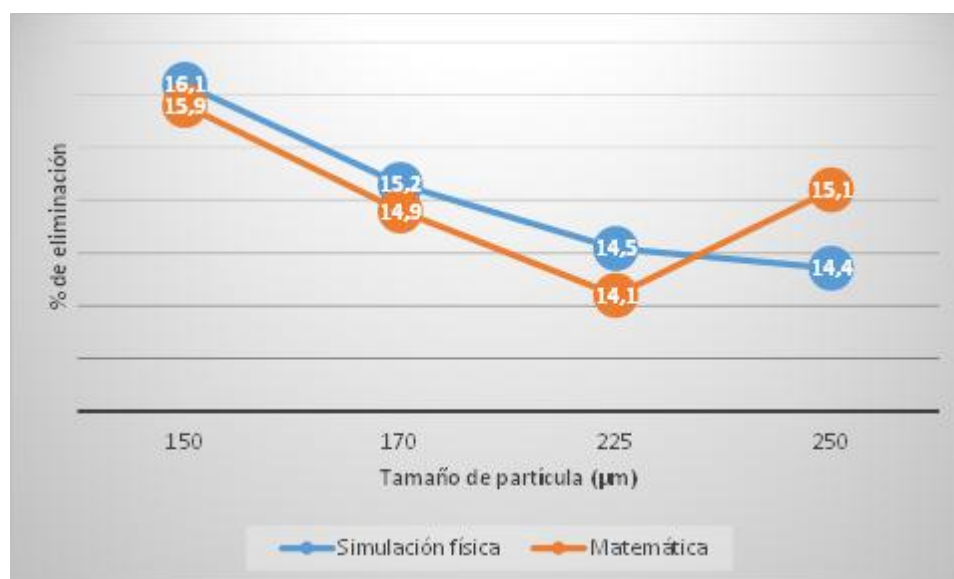


Figura 4.35. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 6 m/min.

De igual forma en las figuras 4.36, 4.37 y 4.38 se pueden ver los porcentajes de eliminación de inclusiones para las dos diferentes simulaciones. Fueron llevadas a cabo a velocidades de 4, 5 y 6 m/min respectivamente con una profundidad de buza de 34 cm para todos los experimentos.

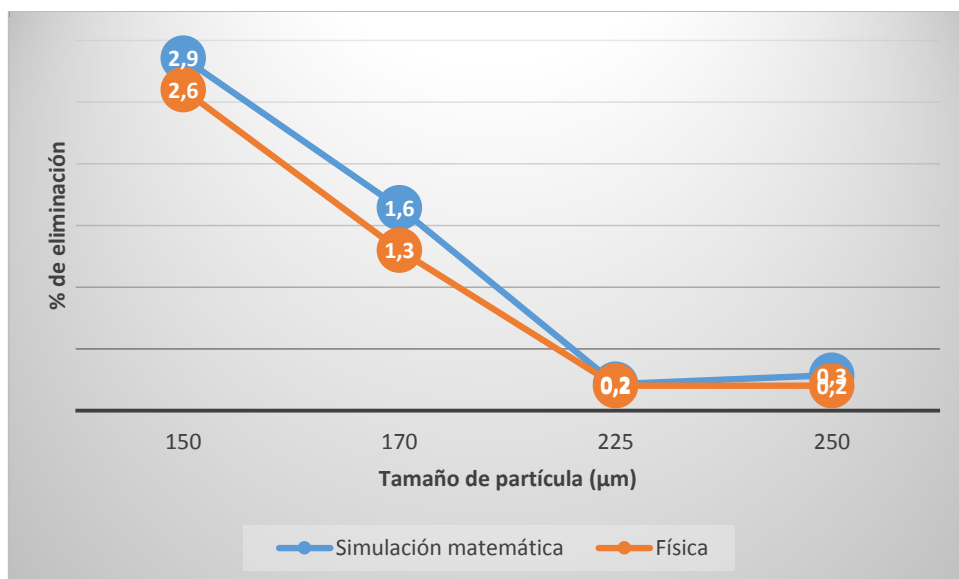


Figura 4.36. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 4 m/min y 34 cm de inmersión de buza.

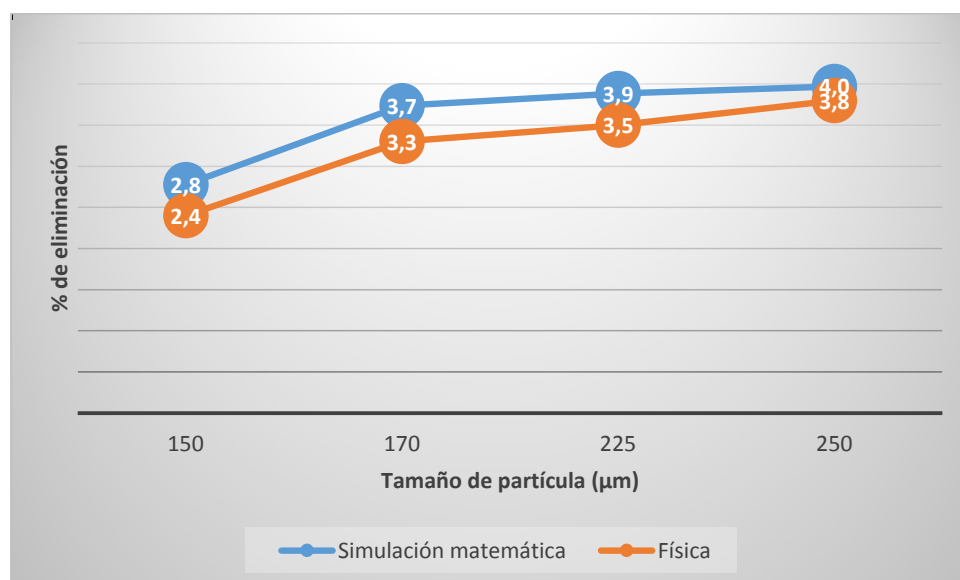


Figura 4.37. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 5 m/min y 34 cm de inmersión de buza.

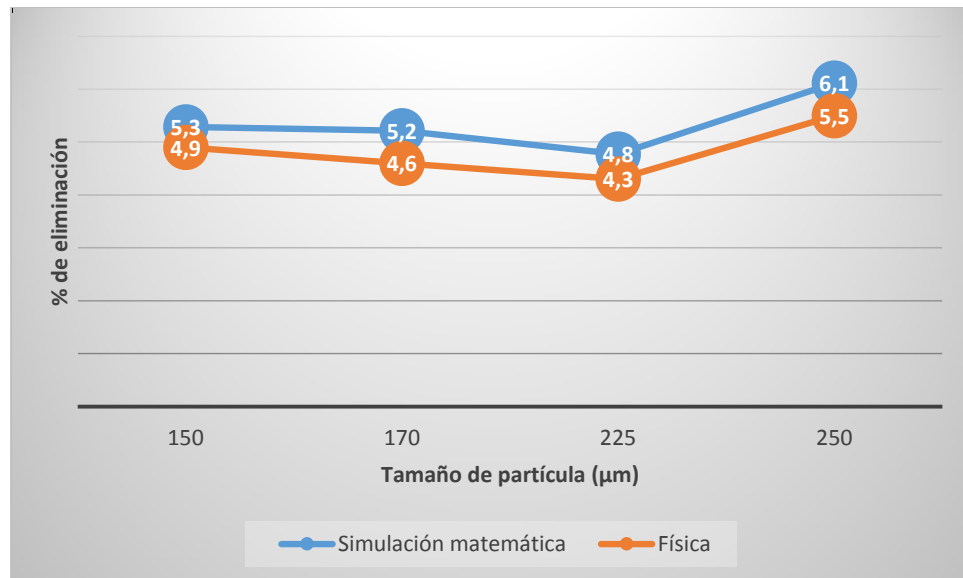


Figura 4.38. Comparación de los porcentajes de eliminación entre la simulación física y matemática para velocidad de 6 m/min y 34 cm de inmersión de buza.

4.1.6 Correlación de los niveles de vibraciones con la eliminación de inclusiones

Se hicieron los experimentos en el modelo físico de colada continua de plancho delgado, tipo embudo, para validar la utilidad y sensibilidad del acelerómetro y mostrar que puede ser usado para medir los niveles de energía de agitación del metal dentro del molde de colada continua. Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones, tanto matemática como física, se pudo analizar y determinar que hay una relación que es directamente proporcional en el incremento del movimiento de las inclusiones con el aumento de la velocidad de colada continua y esto a su vez con el incremento de la remoción de inclusiones del molde de colada.

En la Fig. 4.39 se observa la relación de los niveles de vibraciones a las tres diferentes velocidades de colada en el punto tres, ya analizado, a las diferentes profundidades de buza. En evidente y determinante que la velocidad de colada a 6 m/min y una profundidad de buza de 34 cm muestra el mayor nivel de vibraciones. Para cada una de las señales se muestra su aproximación lineal.

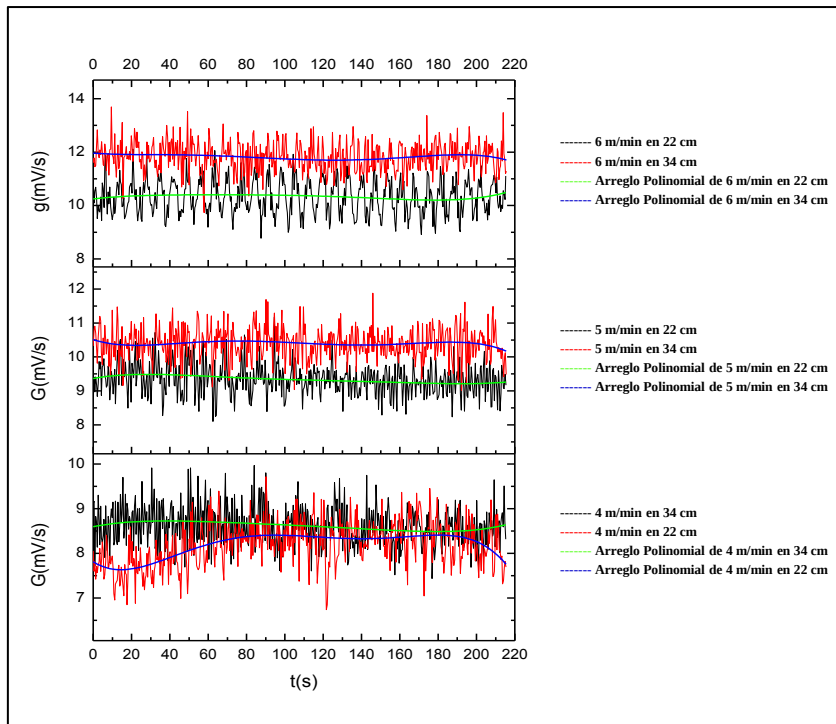


Figura 4.39. Comparación de los niveles de vibraciones a 4,5 y 6 m/min.

Por otra parte, en la Fig. 4.40 se puede ver el comparativo de todos los experimentos hechos para obtener el porcentaje de eliminación para el modelo físico, los cuales muestran los resultados esperados, a las velocidades de colada de 6 m/min para ambas profundidades de buza y una inclusive de 22 cm a 5 m/min en las que se obtienen las mayores remociones de inclusiones.

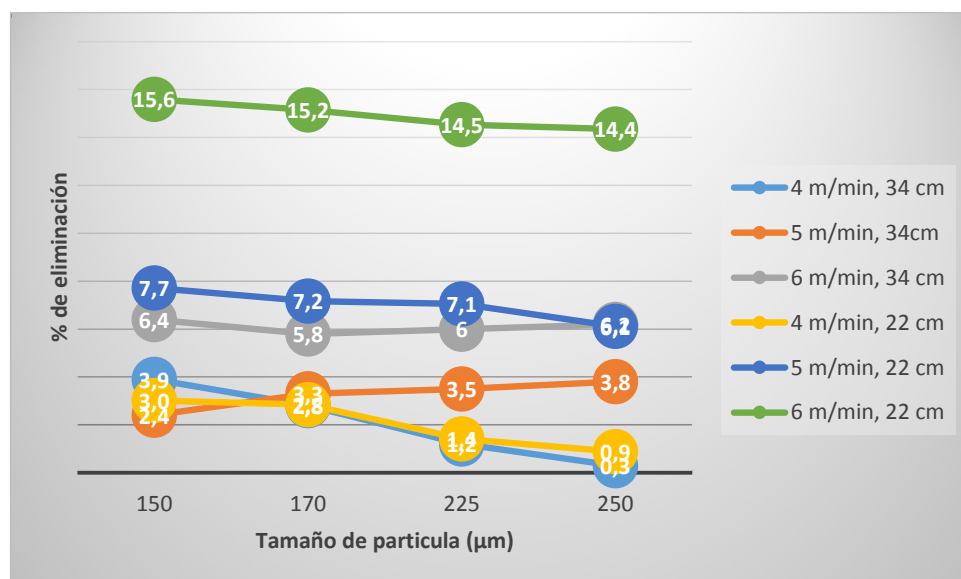


Figura 4.40. Comparación de los niveles de vibraciones a 4,5 y 6 m/min.

Esto muestra la mayor actividad dinámica provocada por las altas velocidades de colada y el acelerómetro lo traduce como altos niveles de vibraciones dentro del molde de colada continua que se ve reflejado en mayor eliminación o remoción de inclusiones. Esto demuestra que el acelerómetro es un dispositivo capaz de detectar, a través del procesamiento digital de su señal, la energía generada en el molde de colada continua de planchón delgado y relacionarla con la eliminación o remoción de inclusiones en el mismo.

4.2 Aportaciones y originalidad del trabajo

Como ya se ha mencionado, la importancia del trabajo radica en buscar la posibilidad, modificando la geometría de la buza, de eliminar la mayor cantidad de inclusiones del molde de colada continua de planchón delgado aunque su función no sea ésta. Se encontró que en la actualidad prácticamente no se ha hecho investigación del comportamiento de las inclusiones en el planchón delgado tipo embudo. Por lo que hace de este trabajo de investigación una gran aportación en la industria siderúrgica.

La incorporación de las técnicas de coloración de las partículas con líquidos penetrantes (fluorescentes) aunado a la iluminación con luz ultravioleta (luz oscura) para estudiar el comportamiento de las inclusiones dentro del molde de colada, es otra de las innovaciones que se incorporaron al campo de la modelación o simulación física.

Finalmente la utilización e incorporación de la instrumentación, en este caso en particular del acelerómetro demostró ser una herramienta prometedora para obtener mejores resultados y ayudar en la comprensión de los fenómenos que ocurren en este tipo de procesos.

5. Conclusiones

1. Debido al gran impedimento que se presenta al analizar la remoción de inclusiones en el acero a altas temperaturas en el proceso de colada continua y la imposibilidad de colocar sensores dentro del molde. La simulación matemática y física así como el análisis de vibraciones demostraron ser herramientas muy útiles que pueden entregar un valor real y medible de la cantidad de energía en el molde y ser un indicativo de la forma en que son eliminadas las inclusiones.
2. Se encontró que el acelerómetro puede ser un transductor capaz de relacionar el nivel de vibraciones con el comportamiento de las inclusiones en un molde de colada continua. Mostrando que a mayores niveles de vibraciones mayores serán las inclusiones eliminadas.
3. En cuanto al análisis del comportamiento de las inclusiones, se observó que la tendencia de las partículas es ser llevadas al fondo del molde cuando se aumenta la velocidad de colada, esto debido a la oscilación de los chorros que presenta la buza original ocasionando que la interfase (escoria-metal) fluctúe de manera consistente.
4. La geometría de la buza original sirvió de base para mejorar y hacer las modificaciones pertinentes en la buza propuesta para mejorar el atrapamiento de inclusiones, así como para mejorar el patrón de flujo, disminuyendo la oscilación de los chorros provenientes de los puertos de la buza y así provocar una menor fluctuación de la superficie, esto aunado al mejoramiento del patrón del flujo al interior del molde. Trayendo como consecuencia una mayor eliminación de inclusiones en la capa de escoria (capa de polvo lubricante).
5. Así mismo como ya se había visto en las simulaciones matemáticas [15], la zona cercana a la buza presenta una mayor concentración de partículas, lo cual es debido a la baja velocidad del metal líquido en dicha zona.
6. Se ha encontrado que la velocidad de colada y que el tamaño de partícula son factores trascendentales para la remoción de éstas.

7. El incremento en la velocidad de colada genera una mayor fuerza de arrastre y por lo tanto mayor porcentaje de eliminación de inclusiones, siendo el arrastre la fuerza fundamental en la remoción de partículas.

8. La modificación de la geometría interna de la buza mejora el patrón de flujo y en consecuencia una mayor eliminación de inclusiones.

RECOMENDACIONES VI

1. Llevar a cabo en un lugar completamente oscuro las simulaciones de colada continua con las inclusiones impregnadas con líquidos penetrantes para que se pueda observar su comportamiento haciendo uso de lámparas de luz oscura.
2. Aumentar la capacidad de los tinacos, encargados de suministrar agua al modelo, para poder llevar a cabo simulaciones físicas con velocidades de colada de 7 m/min.
3. Utilizar una cámara de video con visión nocturna para observar las ventajas posibles que nos daría esta herramienta al momento de grabar las simulaciones en el modelo físico.
4. Elaborar un método factible para remover las partículas que son atrapadas por el aceite para posteriormente ser cuantificadas y hacer la comparación con las que son inyectadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS VII

- [1] B.G. Thomas y L. Zhang, "Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting", ISIJ International, 2001, Vol. 41, No. 10, pp 1181-1193.
- [2] C. Real, R. Miranda, C. Vilchis, M. Barrón , L. Hoyos, J. Gonzalez, "Transient Internal Flow Characterization of a Bifurcated Submerged Entry Nozzle", ISIJ International, 2006, Vol. 46, No. 8, pp. 1183-1191.
- [3] B. G. Thomas, "Continuous Casting of Steel", Modeling for Casting and Solidification Processing, Chapter 15, 2001, pp 499-540.
- [4] D. F. Wu and S. S. Cheng, "Effect of SEN Design on Surface Fluctuation and Solidifying Shell in Slab Mold and its Optimization", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008, Vol. 21, No. 5, pp 341-350.
- [5] Raúl Miranda, Miguel Ángel Barrón, José J. Barreto, Luis Hoyos and Jesús Gonzales, "Experimental and Numerical Analysis of the Free Surface in a Water Model of the Slab Continuous Casting Mold", ISIJ International, 2005, Vol. 45, No. 11, pp. 1626-1635.
- [6] L. Zhang, S. Yang, K. Cai and B. G. Thomas, "Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Strand", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 38B, No. 1, 2007, pp. 63-83.
- [7] Fady M. Najjar, Brian G. Thomas, and Donald E. Hershey, "Numerical Study of Steady Turbulent Flow Through Bifurcated Nozzles in Continuous Casting" Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 38B, No. 1, 2007, pp. 63-83.
- [8] A. Hajari and M. Meratian, "Surface Turbulence in a Physical Model of a Steel Thin Slab Continuous Caster" International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Volume 17, Number 6, December 2010, pp 697-703.
- [9] M. Meratian y A. Hadjari. "Physical modeling of steel delivery during thin slab continuous casting". International Journal of ISSI, Vol. 5 (2008), No. 1, pp. 41-46.
- [10] W. Chiapparoli, S. Sylvestre, J. Madias y G. Di Grecia. "Estudio en molde de agua del efecto del ancho de molde, velocidad de colada y profundidad de inmersión de buza".
- [11] Y. Murakata , M.G. Sung, K. Sassa y S. Asai. "Visualization of collision behavior of particles simulating inclusions in a turbulent molten steel flow and its theoretical analysis". ISIJ International, Vol. 47 (2007), No.5, pp. 663-637.
- [12] Sahai Y. y Emi T. "Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes". ISIJ International, Vol. 36 (1996), No.9, pp. 1166-1173.
- [13] Tooru Matsumiya. "Recent topics of research and development in continuous casting". ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 12, pp. 1800–1804.

- [14] Kwon Y., Zhang J. y Lee H.G. “Water model and CFD studies of bubble dispersion and inclusions removal in continuous casting mold of steel”. ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 2, pp. 257–266.
- [15] H. Arcos y G. Barrera (2012) Simulación física y matemática para la optimización del diseño de una buza para el molde de colada continua de planchón delgado. Documento de trabajo No. 5, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO.
- [16] Q. Yuan, B.G. Thomas y S.P. Vanka “Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: Part II. Particle transport”. Vol. 35B (2004), pp. 703–714.
- [17] L. Zhang, Y. Wang y X. Zuo “Flow transport and inclusion motion in steel continuous-casting mold under submerged entry nozzle clogging condition”. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2008, Vol. 39B (2008), pp 534-549.