

---

## Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

Las ideas fluyen de un lado para otro en el cerebro, no existen restricciones. Pero hay que concretar y optimizar esa idea concreta, Mientras el flujo se incrementa sin cesar generando nuevas ideas.

- Carlos Esparza

### 7.1 Conclusiones

De acuerdo al marco teórico presentado, así como al análisis y discusión realizado en este trabajo, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- De forma general se puede afirmar que el estudio efectuado aportó herramientas útiles, tanto en conceptos como en procedimientos para mejorar la metodología de la simulación de coladas.
- La metodología experimental que se presenta en este trabajo, para optimizar el diseño de una colada, es novedosa por la aplicación y acoplamiento de dos herramientas comerciales de simulación y optimización.
- Se logra optimizar el diseño geométrico de la colada de forma automática utilizando un simulador basado en el método de Volumen Finito.
- Hasta donde se tiene conocimiento, al momento de terminar este estudio, esta es la primera vez que se puede optimizar el diseño de una colada en 3 dimensiones. Para realizar la optimización se utilizó, también por primera vez, un programa basado en el método de Volumen Finito, FV, ya que en trabajos previos se habían utilizado únicamente simuladores basados en los métodos de Elementos Finitos, FEM.

- El simulador seleccionado y utilizado, Flow3D, es capaz de reproducir el comportamiento del aluminio líquido. Se ha demostrado que el utilizar un simulador basado en el método FV ayuda a capturar mejor el comportamiento de las superficies libres en comparación a los que utilizan el método FEM.
- Se logró simular el llenado por el proceso de gravedad, de una colada típica en un molde de arena. Con los datos del material y los parámetros del proceso requeridos, los resultados obtenidos concuerdan con los obtenidos experimentalmente.
- El planteamiento del problema de diseño óptimo, de una colada típica, requirió la selección de 2 variables de decisión o de diseño. Estas variables podrían variar en un rango fijo de valores pertenecientes al conjunto de soluciones factibles o prácticas en su implementación real. La profundidad del canal, ZL y la pendiente de la colita final de la colada CX, fueron identificadas como las variables de diseño, ya que por experiencia previa estas son las zonas del diseño que afectan en mayor medida el comportamiento del líquido a estudiar. Además se mantuvo el diseño de la parte de la caída del metal constante durante todos los experimentos y no se estudio su influencia.
- Se realizó con éxito el acoplamiento del simulador con el optimizador con la idea de optimizar el diseño de una colada típica de forma automática. Con base en una selección adecuada de las variables de diseño e imponiendo las restricciones tecnológicas requeridas, se obtuvieron diseños óptimos factibles.
- El resultado final óptimo del diseño, en cada uno de los análisis realizados, se vio influenciado por el punto inicial de diseño seleccionado. Lo cual implica que el método de optimización tiene que ser lo suficientemente robusto para realizar la búsqueda del punto óptimo. Pero también requiere que se inicie el proceso de optimización

con diversos puntos de diseño inicial para poder seleccionar de los valores óptimos locales finales el mejor, en este caso el que minimice en mayor medida la función objetivo.

- De acuerdo a las pruebas en 2D el mejor método de optimización numérica para aplicarse en el diseño de una colada fue el método de programación cuadrática secuencial, SQP. Fue el que mejor resultados dio, ya que consistentemente el algoritmo de búsqueda que utiliza logró obtener resultados que en su mayoría eran distintos al punto inicial de diseño y a la vez menores o iguales a los obtenidos con otros métodos, solo que los otros no fueron tan consistentes.
- El método SLP fue muy inestable a pesar de haber logrado algunos resultados de ZL y CX diferentes a los puntos iniciales del diseño. Entendiendo por inestabilidad que una gran cantidad de las pruebas realizadas se interrumpieron al fallar los análisis y esto interrumpió todo el proceso. Esto lo puso en segundo lugar después del método SQP.
- Los métodos MMFD y SUMT terminaron en casi todos los casos con puntos óptimos de diseño muy cercanos a los puntos iniciales. Esto los limita para aplicarse al diseño óptimo de la colada. El método SUMT fue el más estable y el que menos problemas tuvo para converger a una solución factible.
- Como resultado final de los DOE se observó la gran influencia de la profundidad del canal para minimizar la velocidad del metal en la entrada al molde, tanto en 2D como en 3D. El factor interno del optimizador, el incremento del paso, SS, no tuvo gran influencia para minimizar la función objetivo. Por lo tanto se puede utilizar cualquiera de los 3 valores de SS estudiados.
- La diferencia más importante entre los resultados de los diseños de experimentos realizados en 2D y en 3D fue que los resultados óptimos

en 2D se presentaron en diversas zonas dentro del conjunto de posibles soluciones o combinaciones de las variables de diseño, mientras que los resultados en 3D indicaron que la solución óptima se encontraba en una zona más pequeña y delimitada dentro de la región de diseño factible. Esto implica que la forma de la función objetivo en 2D tiene una forma muy irregular y muestra una gran cantidad de zonas con valores mínimos. Mientras que la forma de la función objetivo en 3D es más regular mostrando aquellas zonas con valores mínimos de forma más clara y en menor cantidad. Si se utilizan más puntos iniciales de diseño en 3D se tendría una idea más clara de la forma de la función objetivo.

- Los resultados del DOE en 3D, en 5 de 9 casos, finalizaron con el mismo punto óptimo de diseño a diferencia del realizado en 2D, donde sólo un punto de diseño fue exactamente igual a otro, entre los 27 experimentos realizados.
- Los análisis realizados en 2D fueron útiles para seleccionar el método de optimización a utilizar junto con los parámetros requeridos de forma más rápida por la cantidad de tiempo de computo requerida para realizar un análisis en 2D, que fue en promedio 6 veces más rápido que en 3D. Pero la simulación en 3D es la más cercana a la realidad y por lo tanto es la que se escoge para realizar un estudio metalúrgico de la colada óptima comparándolo con un diseño original no optimizado.
- La profundidad final del canal optimizada, para el problema estudiado en 3D, es de  $11.5 \text{ cm} - 10.9 \text{ cm} = 0.6 \text{ cm}$ , con una pendiente final de la colita de 1.72 que equivale a  $60^\circ$ . Con esto se obtiene una velocidad del aluminio en la entrada de  $35.72 \text{ cm/s}$ , sin tener aire en el canal principal al iniciar la entrada del material a la pieza.

## 7.2 Recomendaciones

Se presentan a continuación las sugerencias para futuros estudios:

- Efectuar *más simulaciones y optimizaciones con otras coladas de uso industrial en 3D, aplicando la metodología aquí descrita. Ya que se demostró que si contribuye a la optimización del diseño de la misma. Esta aplicación industrial dependerá del tipo de computadora utilizada en el proceso de simulación, de la complejidad del diseño y el número de elementos involucrados en la discretización del problema. El tiempo de cálculo podría ser prohibitivo si la aplicación de esta técnica para optimizar una colada requiere más de un mes para llegar a un diseño óptimo local. Se requiere evaluar el efecto real.*
- Seleccionar y utilizar más de dos variables de diseño para optimizar la forma geométrica de la colada. Esto con la idea de aprovechar el potencial que tiene el utilizar esta metodología, la cual no está limitada en el número de variables de diseño. La limitación está en el tiempo de cálculo que requiere cada uno de los análisis, dependiendo de la complejidad del problema y del tipo de computadora a utilizar.
- Continuar con el análisis de la colada típica utilizada en este estudio pero aplicando también algunas otras técnicas que permitan determinar el diseño óptimo global.
- Explorar y proponer otro objetivo de optimización, por ejemplo, minimizar el rebote del aluminio líquido en el corredor principal, sin mantener aire atrapado, manteniendo la velocidad en las entradas menor a 50 cm/s. En este caso la función objetivo se puede plantear con la relación entre el tiempo de activación de cada una de las celdas de la malla en cada una de las zonas de interés, por ejemplo, en el canal principal, la parte final del canal y las entradas, ecuación (7.1):

$$tChoke_i < tDifusser_j < tRunner_k < tEnd_l < tGate_m \quad (7.1)$$

Con esta expresión se indica que el tiempo de activación o llenado de las celdas en el “choke” ( $tChoke_i$ ) debe ser menor que en la zona del difusor ( $tDifusser_j$ ), que a su vez debe ser menor que en algunas zonas del canal principal ( $tRunner_k$ ), etc.

- Este proceso de optimización de coladas puede aplicarse con otro simulador y otro optimizador, dependiendo de las características y fortalezas de cada uno de los programas seleccionados. Ya que la metodología presentada y propuesta aquí es aplicable con otros simuladores que cuenten con el mismo tipo de archivos de entrada y salida en formato de texto. Existen en el mercado algunos otros programas de optimización que utilizan los mismos y otros métodos de optimización, trabajan de la misma forma que VisualDOC, permitiendo acoplarlos con los simuladores.
- Estudiar otros programas de optimización con diversos métodos de optimización, explorando otras técnicas basadas en variables discretas o combinación de variables continuas y discretas. Por ejemplo aproximaciones de respuesta de superficie, RSA “*Response Surface Approximation*” o algoritmos genéticos, GA “*Genetic Algorithms*”.
- Lograr el acoplamiento del simulador y el optimizador con un programa de CAD, donde se actualice la geometría por medio de parámetros de diseño. Esto permitirá la actualización directa de geometrías complejas y no depender de las herramientas de modelación del simulador que en muchas ocasiones es muy limitada. Se podría lograr por ejemplo que el optimizador modifique una base de datos, por ejemplo en MS Excel y que con estos datos se actualice el diseño en computadora o programas de CAD (por ej. Unigraphics, PRO-e, etc.) y luego se genere una nueva geometría a utilizar en el simulador. Debe buscarse que dicho proceso se haga de forma automática. Es decir que no

requiera la intervención de nadie durante el proceso de optimización, incluso ni para realizar el pre-procesamiento de datos en el simulador.

- Trabajar en conjunto con las empresas desarrolladoras de los programas de optimización y de simulación, para lograr un acoplamiento directo e interno. En ese caso, se utilizaría directamente la interfase del simulador. El diseño a optimizar se prepararía en menos pasos y por ende en menos tiempo.
- Aplicar esta misma técnica de optimización en la simulación y optimización de otros procesos en la fundición. Como la selección de la localización y el número óptimo de boquillas necesarias para llenar una caja de corazones con arena. Este proceso actualmente puede ser simulado con Flow3D. Para la optimización del número de boquillas y su localización, se puede hacer uso de métodos de optimización que utilicen variables discretas. Ya que de un conjunto de posibles localizaciones, tamaños y número de boquillas, el optimizador podría indicar cual es el mejor resultado que, por ejemplo, maximice la densidad de la arena en varias zonas seleccionadas de la caja de corazones al llenarla.
- Si se utiliza otro programa de simulación diferente a Flow3D, por ejemplo MAGMAsoft, se requiere de inicio adquirir un módulo especial para tener acceso a los resultados y a los archivos de entrada en formato de texto o ASCII, este módulo es llamado por el desarrollador MAGMAapi. Después, se tendrían que identificar aquellos archivos de MAGMA y variables internas a ser modificadas por el programa optimizador, después identificar los resultados finales que permitan realizar la evaluación por el optimizador. Al final, el proceso de optimización debe poder realizarse en forma automática.

---

## Índice de figuras

Figura 2.1 Diagrama de equilibrio Al-Si, mostrando los tipos de aleaciones.	10
Figura 2.2 Ejemplo de la microestructura de una aleación hipoeutéctica: aluminio tipo 319 vaciada en molde de arena.	11
Figura 2.3 Elementos básicos de un sistema de alimentación.	14
Figura 2.4 Caída libre del metal líquido desde una altura $h_2-h_1$ .	16
Figura 2.5 Cambios bruscos de dirección del flujo, con esquinas sin radios, que generan baja presión y aire atrapado. a. Incremento del área transversal del canal, b. Cambio en la dirección del canal y c. Decremento del área transversal del canal.	18
Figura 2.7 Elementos básicos de un sistema de alimentación. (a) copa, (b) bastón, (c) base del bastón o choke, (d) corredor principal, (e) entradas y (f) parte final de la colada.	23
Figura 2.8 Coeficientes de transferencia de calor en diferentes interfases encontradas entre una aleación de aluminio y un molde de acero.	27
Figura 2.9 Varios diseños de la base del bastón. El diseño c) de la base tipo pozo, "well", fue recomendado y usado por mucho tiempo, como una solución para resolver el problema mostrado en a) y b).	29
Figura 3.1 Representación de un volumen de control P.	35
Figura 3.2 Representación de una malla estructurada de volumen finito y un acercamiento al elemento típico i,j,k y sus vecinos.	51
Figura 3.3 (a) Discretización regular o estructura, (b) Discretización irregular o no estructurada.	52
Figura 3.4 Volumen de control P.	53
Figura 3.5 Dibujo del sistema de alimentación utilizado en el estudio de Sirrell y coautores.	56
Figura 3.6 a). Fluido estático en la parte izquierda del canal, b). Fluido en la parte derecha el canal después de moverse por gravedad y conservar la energía alcanzando la altura original.	59

Figura 3.7 Tratamiento de curvaturas en Flow3d con FAVOR a). Mallado grande, b). Mallado regular, c). Mallado fino.	60
Figura 4.1 Clasificación general de los diferentes métodos de optimización. (Traducción de la gráfica en inglés que se encuentra en “ <i>Neos guide optimization tree</i> ”, <a href="http://www.fp.mcs.anl.gov/otc/guide/optweb/index.html">www-fp.mcs.anl.gov/otc/guide/optweb/index.html</a> ).	71
Figura 4.2 El problema con restricciones aproximado linealmente.	73
Figura 4.3 Problemas al tener pocas restricciones con la aproximación lineal.	74
Figura 4.4 Representación de la dirección de búsqueda usable y factible.	75
Figura 4.5 Efecto de $\theta$ en la dirección de búsqueda.	77
Figura 5.1 Sistema de alimentación utilizado en el estudio de Campbell y coautores.	96
Figura 5.2 Diagrama del acoplamiento de Visualdoc y Flow3d para realizar el proceso de optimización.	98
Figura 5.3 En la colada de la Figura 5.1 se selecciona la profundidad del canal, ZL, y la pendiente de la parte final del canal, “colita”, CX como las 2 variables de diseño.	103
Figura 6.1 Comparación de resultados. (a) experimentales a 0.5 s y (b) simulados con Flow3d para 3 diferentes tiempos 0.50, 0.60 y 0.70 s.	113
Figura 6.2 Comparación de resultados. (a) experimentales a 0.75 s y (b) simulados con Flow3d para 3 diferentes tiempos 0.79, 0.90 y 1.00 s.	114
Figura 6.3 Comparación de resultados. (a) experimentales a 1.0 s y (b) simulados con Flow3d para 2 diferentes tiempos 1.10 y 1.20 s.	115
Figura 6.4 Influencia de los factores de diseño y el factor señal en la función objetivo. Los valores en el eje “x” muestran los valores iniciales de cada una de las variables de diseño y el factor SS.	131
Figura 6.5 Interacciones entre los factores de diseño y el factor señal y su influencia en la función objetivo.	131
Figura 6.6 Contorno de velocidad. Interacción entre el factor de diseño ZL y el factor señal SS y su influencia en la función objetivo.	133
Figura 6.7 Contorno de velocidad. Interacción entre los factores de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo.	133
Figura 6.8 Interacción entre los factores de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo.	134

Figura 6.9 Interacción entre el factor de diseño ZL y el factor señal SS y su influencia en la función objetivo.	134
Figura 6.10 Interacción entre el factor de diseño CX y el factor señal SS y su influencia en la función objetivo.	135
Figura 6.11 Valores resultantes de los factores de diseño ZL y CX, (ZL opt. Y CX opt.) Y su influencia en la función objetivo.	135
Tabla 6.13 Resultados del DOE con 2 factores de diseño. Resultados utilizando el algoritmo SQP y análisis realizado con colada en 3D.	137
Figura 6.12 Influencia de los factores de diseño en la función objetivo.	138
Figura 6.13 Interacciones entre los factores de diseño y su influencia en la función objetivo.	138
Figura 6.14 Contorno de velocidad en 2D. Interacción de los valores iniciales de los factores de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo.	140
Figura 6.15 Interacción de los valores iniciales de los factores de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo. Representación en 3D.	140
Figura 6.16 Contorno de velocidad. Interacción entre los valores optimizados de las variables de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo.	142
Figura 6.17 Valores óptimos de las variables de diseño ZL y CX y su influencia en la función objetivo.	142
Figura 6.18 Velocidad del aluminio al pasar por la entrada del molde en el caso 1 a los 0.55 s de haber iniciado el vaciado.	144
Figura 6.19 Velocidad del aluminio al pasar por la entrada del molde en el caso 2 a los 0.35 seg de haber iniciado el vaciado.	145
Figura 6.20 Velocidad a 1 s de iniciado el llenado para el Caso 1. Se marcan las trayectorias de 3 partículas. Coordenadas x, y, z de las partículas en cm: (A) 10, 4, 10; (B) 15, 4, 10; (C) 20, 4, 13.	146
Figura 6.21 Velocidad a 1 s de iniciado el llenado para el Caso 2. Se marcan las trayectorias de 3 partículas. Coordenadas x, y, z de las partículas en cm: (A) 10, 4, 11; (B) 15, 4, 11; (C) 20, 4, 13.	147
Figura 6.22 Masa total de defectos debidos al movimiento de las superficies libres para el Caso 1.	149
Figura 6.23 Masa total de defectos debidos al movimiento de las superficies libres para el Caso 2.	150

Figura 6.24 Tiempo requerido para llenar completamente cada uno de los elementos de la malla para el Caso1.	151
Figura 6.25 Tiempo requerido para llenar completamente cada uno de los elementos de la malla para el Caso 2.	152
Figura A1.1 Ilustración del problema de optimización.	168
Figura A1.2 Ilustración de la solución del problema de optimización planteado en la Figura A1.1.	170
Figura A1.3 Sistema de 2 resortes con 2 cargas aplicadas, P1 y P2. (a) sin de deformación y (b) deformado.	171
Figura A1.4 Espacio de diseño y solución del problema de la Figura A1.1. La energía potencial, EP, representada por valores constantes en función de X1 y X2.	172
Figura A1.5 Aplicación del método de pasos descendientes, "Steepest Descent Method".	175
Figura A1.6 Aplicación del método Fletcher-Reeves.	176

---

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades físicas más comunes del aluminio.	8
Tabla 2.2 Sistema de designación de las aleaciones de aluminio.	9
Tabla 3.1 Clasificación de las fuerzas actuando sobre el volumen.	38
Tabla 3.2 Coeficientes de varias ecuaciones de transporte.	50
Tabla 5.1 Variables de diseño ZL= profundidad de canal, 6 niveles y CX= pendiente de parte final del canal, se mantiene constante a 0.4444, que equivale a un ángulo de 23.96°.	105
Tabla 5.2 Variación del incremento de paso, SS, en 9 niveles de 1.0e-01 a 1.0e-09.	106
Tabla 5.3 Variación la pendiente CX de la parte final del canal en 6 niveles. ZL se mantiene constante. Se experimenta con los 4 algoritmos y con 2 niveles de SS.	106
Tabla 5.5 Matriz del diseño de experimentos DOE Taguchi L9.	108
Tabla 5.6 Matriz del diseño de experimentos DOE Taguchi L9, con 2 factores de diseño ZL = profundidad del canal, CX = pendiente de colita, a 3 niveles c/u.	109
Tabla 6.1 Resultados utilizando el algoritmo SQP. Variación de la variable de diseño ZL (profundidad del canal principal) manteniendo CX constante.	117
Tabla 6.2 Resultados utilizando el algoritmo MMFD. Variación de la variable de diseño ZL (profundidad del canal principal) manteniendo la pendiente CX constante.	118
Tabla 6.3 Resultados utilizando el algoritmo SLP. Variación de la variable de diseño ZL (profundidad del canal principal) manteniendo la pendiente CX constante.	118
Tabla 6.4 Resultados utilizando el algoritmo SUMT. Variación de la variable de diseño ZL (profundidad del canal principal) y manteniendo la pendiente CX constante.	119
Tabla 6.5 Variación del incremento de paso del algoritmo de optimización. Resultados utilizando el algoritmo SQP.	123
Tabla 6.6 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo SQP con un "step size" de 1.0e-02.	124
Tabla 6.7 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo SQP con un "step size" de 1.0e-07.	125

Tabla 6.8 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo MMFD con un "step size" de 1.0e-02.	126
Tabla 6.9 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo MMFD con un "step size" de 1.0e-07.	126
Tabla 6.10 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo SLP con un "step size" de 1.0e-02.	127
Tabla 6.11 Variación de la variable de diseño CX (pendiente de la parte final del canal). Resultados utilizando el algoritmo SLP con un "step size" de 1 0e-02.	128
Tabla 6.12 Resultados del DOE con 2 factores de diseño y un factor señal. Resultados utilizando el algoritmo SQP.	130
Tabla 6.13 Resultados del DOE con 2 factores de diseño. Resultados utilizando el algoritmo SQP y análisis realizado con colada en 3D.	137