

Evaluando la Calidad de Técnicas de Optimización para un Problema de Diseño de Sistemas de Alimentación por Gravedad

C. E. Esparza Garcés¹, R. Z. Ríos Mercado², M. P. Guerrero Mata²

¹NEMAK S.A. de C.V., Libramiento Arco Vial Km. 3.8,
García, N.L., México, C.P. 66000
cesparza@nepak.com

²FIME, UANL, Pedro de Alba S/N, Cd. Universitaria,
San Nicolas de los Garza, N.L., México
roger@uanl.mx
mguerre@gama.fime.uanl.mx

Abstract

In this paper, an optimal design problem arising from a typical gating system in the production of aluminum parts is addressed. This problem is extremely important for the automotive industry. The main methodology consists of coupling optimization techniques within a foundry process simulator. The simulator applies the finite volume method and the VOF algorithm for fluid analysis. The goal of this paper is to assess the impact on design quality when applying four of the most popular optimization techniques. An extensive computational evaluation on a two-dimensional problem with two design variables is presented. It is observed first the positive impact of the optimization techniques on guiding the search for better designs. Second, Sequential Quadratic Programming was observed to outperform the other techniques tested.

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de diseño óptimo de un sistema de alimentación (colada) típica utilizada en el proceso de gravedad de piezas de aluminio, el cual tiene una importantísima aplicación en la industria automotriz. La metodología principal consiste en acoplar técnicas con un programa de simulación del proceso de fundición por gravedad. El simulador está basado en el método de volumen finito y aplica la técnica VOF para el análisis de fluidos. El objetivo del presente trabajo es el de evaluar el impacto que se tiene en la calidad del diseño final al aplicar cuatro de las más populares técnicas de optimización. La extensa experimentación se lleva a cabo en un problema de dos dimensiones con dos variables de diseño. Los resultados muestran en primera instancia la valía de aplicar una metodología de optimización en este proceso de formado y, en segunda instancia, la superioridad de uno de los cuatro métodos probados (programación cuadrática secuencial)

1. Introducción

En el proceso de gravedad con molde de arena o con molde semi-permanente (acero y arena), el diseño del sistema de alimentación o colada se vuelve crucial. Ya que este conjunto de canales o conductos por donde viaja el metal líquido pueden ser los responsables del daño que puede llegar a tener el material [5]. Adicionalmente, si el material utilizado para la fabricación de piezas es considerado sensible al daño, entonces el proceso se vuelve más crítico. Esto sucede con el aluminio y sus aleaciones utilizadas en el proceso de fundición [7,16,20,21]. Por lo tanto, para evitar el daño sobre el aluminio líquido, el diseño de la colada debe ser tal que no acumule aire atrapado en el canal detrás del frente principal del metal y que la velocidad del fluido no sea mayor a 0.50 m/s [9,11,16].

Durante la década de los noventas, se desarrollaron poderosamente los programas de simulación de los fenómenos intrínsecos de la fundición [6,8,10]. Un paso lógico en el desarrollo del diseño de la colada, es automatizar el proceso de optimización contando con dos programas, uno de análisis, que sea capaz de reproducir el fenómeno de llenado, y el otro de optimización, que en base a técnicas numéricas sea capaz de evaluar los resultados obtenidos por el programa de análisis y realizar un proceso iterativo de búsqueda del punto óptimo.

El objetivo de este trabajo es demostrar que la aplicación específica de las técnicas numéricas de optimización tiene un impacto positivo en el problema de diseño de una colada típica. El trabajo incluye una extensa evaluación computacional de cuatro de las técnicas de optimización de mayor popularidad en este tipo de problemas.

2. Antecedentes

Se ha comprobado [17,18,19] que varios programas de simulación, son capaces de reproducir adecuadamente el comportamiento real del aluminio líquido en movimiento. Por otro lado, el primer trabajo que se tiene registrado como un esfuerzo para la optimización numérica del diseño de coladas fue presentado en 1993 por Bradley y Heinemann [4], quienes usaron modelos hidráulicos simples para simular el llenado del molde. Sin embargo, al parecer esta técnica nunca se implementó [13].

El segundo trabajo relacionado con la optimización de coladas, y hasta donde se sabe el último a la fecha, fue realizado por McDavid y Dantzig en 1997 [13,14]. En este trabajo no se aplican restricciones de velocidad en las entradas. Una limitante que tiene la aplicación de esta técnica al diseño de coladas, es la manera en la que el canal o corredor se adapta a la forma que lleva el flujo principal, ya que sugiere cambios en la geometría con formas caprichosas. Esto no es práctico al momento de fabricar el molde real. El trabajo por entero se desarrolló con geometría en 2 dimensiones en lugar de 3.

3. Simulación del Llenado del Molde

3.1 Modelo Matemático

Las ecuaciones gobernantes que describen el fenómeno físico y metalúrgico, pueden ser escritas de la siguiente forma genérica [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S^\phi \quad (1)$$

Las ecuaciones diferenciales gobernantes de continuidad, momento, energía, VOF, etc., difieren entre si por el valor que tome la variable ϕ que los gobierna, el coeficiente de difusión Γ^ϕ y la expresión del término de fuente de generación de energía S^ϕ . La tabla I muestra los coeficientes de las ecuaciones diferenciales gobernantes y que pueden obtenerse de (1).

Tabla III. Coeficientes de varias ecuaciones de transporte [3].

Nombre de la Ecuación	ϕ	Γ^ϕ	S^ϕ
Continuidad	1	0	0
Momento	u_i	μ	$-\frac{\partial P}{\partial t} + \rho g_i + S_i^\mu + S_i^d + X_i$
Energía	T	$\frac{k}{C_p}$	$\frac{1}{C_p} \left(\mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \right)$
Fracción de Volumen (VOF)	$\frac{f}{\rho}$	0	0

Por ejemplo, tenemos que al sustituir los valores de ϕ, Γ^ϕ y S^ϕ en (1) obtenemos la ecuación de fracción de volumen, VOF:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

F es igual a 0.0 para elementos vacíos, 1.0 para elementos completamente llenos, y entre 0.0 y 1.0 para los elementos conteniendo superficies libres.

2.2 Técnica Numérica de Simulación

Para la solución de las ecuaciones gobernantes que describen el fenómeno del llenado del molde se deben aplicar técnicas numéricas. Para tal efecto se utiliza el programa Flow3D el cual aplica el algoritmo genérico SOLA-VOF [12].

4. Aplicación de Técnicas Numéricas de Optimización

La optimización numérica ha sido tradicionalmente desarrollada en la comunidad de la investigación de operaciones [22]. De forma general, los métodos de optimización se enfocan en tratar de encontrar el valor del vector de variables de decisión X que minimice o maximice una función objetivo $F(X)$, la cual “mide” la calidad del sistema, y que cumpla con las restricciones tecnológicas establecidas en el problema. En el presente estudio comparamos y evaluamos empíricamente cuatro de los métodos de optimización más utilizados en este tipo de problemas: el Método de Programación Lineal Secuencial (SLP, por sus siglas en inglés, *Sequential Linear Programming*), Método Modificado de Direcciones Factibles (MMFD, *Modified Method Feasible Directions*), Programación Cuadrática Secuencial (SQP, *Sequential Quadratic Programming*) y un método basado en Técnicas de Minimización Secuencial sin Restricciones (SUMT, *Sequential Unconstrained Minimization Technique*). Estas técnicas se describen más ampliamente en [22].

5. Técnicas experimentales

En 1995, Sirrel, Holliday y Campbell [18,19] realizaron un estudio experimental del llenado con aluminio tipo 319 de una colada típica usando el proceso de gravedad, el cual fue filmado con equipo de Rayos-X. Se manejó una geometría estándar de la colada, con una altura suficientemente grande para que el comportamiento del aluminio fuera de tipo turbulento, ver Figura 1. Esta información, junto con todos los datos iniciales requeridos, fue tomada por cada uno de los grupos de investigación (entre los cuales destacamos el de Xu et al [23], Barkhudarov et al [2] y Ohnaka et al [15]), quienes aceptaron participar y sin tener acceso previo a los resultados finales, realizaron una predicción muy cercana de lo que se obtuvo experimentalmente.

Flow3D [2], fue uno de los que mejor predijeron el comportamiento cualitativo del aluminio líquido en movimiento. En este trabajo se utiliza el mismo programa como simulador.

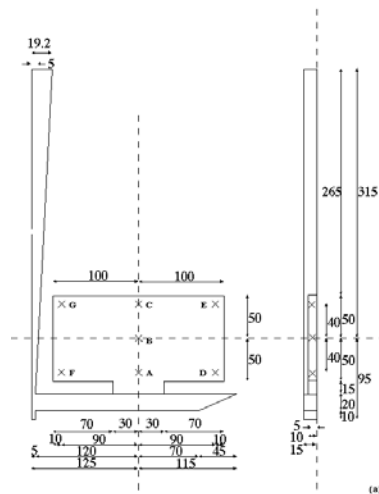


Figura 1. Dibujo del sistema de alimentación estudiado por Campbell et al [19]. Unidades en mm.

Para efectos del análisis preliminar y poder medir el efecto de los diferentes factores de diseño, se proyecta la colada en 3D pero con solo un volumen de control de profundidad. Se plantea entonces el problema de optimización a resolver, de la siguiente manera:

- Objetivo. Minimizar la velocidad del metal $f(X)$ en la entrada a la cavidad del molde (figura de la pieza a fabricar), donde X representa a las variables de diseño. Las variables de diseño seleccionadas se muestran en la Figura 2, siendo éstas:

$ZL =$ Profundidad del canal principal
 $CX =$ Pendiente de la parte final del canal principal

- Restricciones de las variables de diseño. Cada una de las variables de diseño tiene una variación finita conocida y delimitada por los límites inferior (ZL_i, CX_i) y superior (ZL_u, CX_u) siguientes.

$$ZL_i \leq ZL \leq ZL_u$$

$$CX_i \leq CX \leq CX_u$$

- Restricciones de entrapamiento de aire. No mantener aire atrapado en el sistema de alimentación al momento de la activación de la entrada. Esto se puede expresar utilizando la ecuación 3.

$$tc_i \leq te_j \quad (3)$$

donde tc_i es el tiempo de llenado del i -ésimo elemento del canal principal, te_j es el tiempo de llenado del j -ésimo elemento de la entrada a la cavidad; $i = 1, \dots, n$ y $j = 1, \dots, m$, con m y n representando el número de elementos de la malla del canal principal y de la entrada a la cavidad, respectivamente.

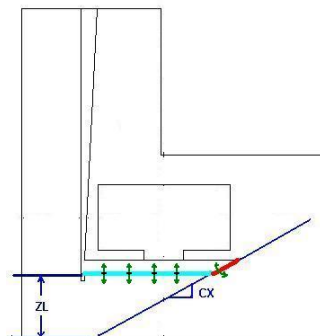


Figura 2. De la colada de la Figura 1 se selecciona la profundidad del canal ZL y la pendiente CX al final del canal, “colita”, como las 2 variables de diseño.

Se seleccionó como optimizador el programa VisualDOC [1], el cual está basado en una arquitectura abierta que permite acoplarlo con diversos programas de simulación, de

cualquier tipo de procesos, que también estén basados en una arquitectura abierta. En la Figura 3 se describe el proceso de optimización y acoplamiento de ambos programas.

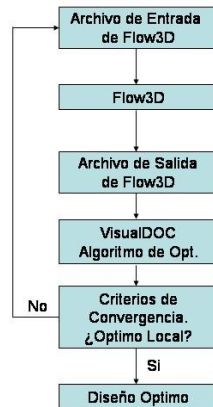


Figura 3. Diagrama del acoplamiento de VisualDOC y Flow3D para realizar el proceso de optimización.

Se realiza una serie de corridas bajo las mismas condiciones con cada uno de los métodos mencionados en el punto anterior. Esto permite seleccionar el mejor de los cuatro métodos o algoritmos de optimización a utilizar. El estudio se realiza variando una de las dos variables de diseño a la vez mientras se fija la otra.

Para el primer análisis, etapa 1, los valores de las variables de diseño se muestran en la Tabla IV. Para el segundo análisis, etapa 2, los valores de las variables de diseño se muestran en la Tabla V. En el primer estudio mostrado en la Tabla IV, ZL se hace variar en 6 diferentes niveles, mientras CX permanece constante. En el segundo estudio mostrado en la Tabla V, CX se hace variar en 6 diferentes niveles, mientras ZL permanece constante.

Tabla IV. Variables de diseño ZL y CX del primer experimento

# PRUEBA	ZL (cm)	CX
1	9.50	0.44444
2	9.75	0.44444
3	10.00	0.44444
4	10.25	0.44444
5	10.50	0.44444
6	10.75	0.44444

Tabla V. Variación la pendiente CX y ZL del segundo experimento.

# PRUEBA	ZL (cm)	CX
1	10.25	0.30
2	10.25	0.44444
3	10.25	0.60
4	10.25	0.90
5	10.25	1.25
6	10.25	1.5

6. Resultados y Discusión

Como primer paso, se valida que el simulador pueda reproducir el fenómeno de llenado. En la Figura 4(a) se observan los resultados a 0.75 segundos, de haber iniciado el vaciado, del experimento realizado en [18]. Los resultados de la simulación a 0.9 seg muestran una alta correlación con la primera fotografía de izquierda a derecha del experimento real, ver Figura 4(b). El tiempo exacto en que se presenta este mismo comportamiento está desfasado en 0.3 seg.

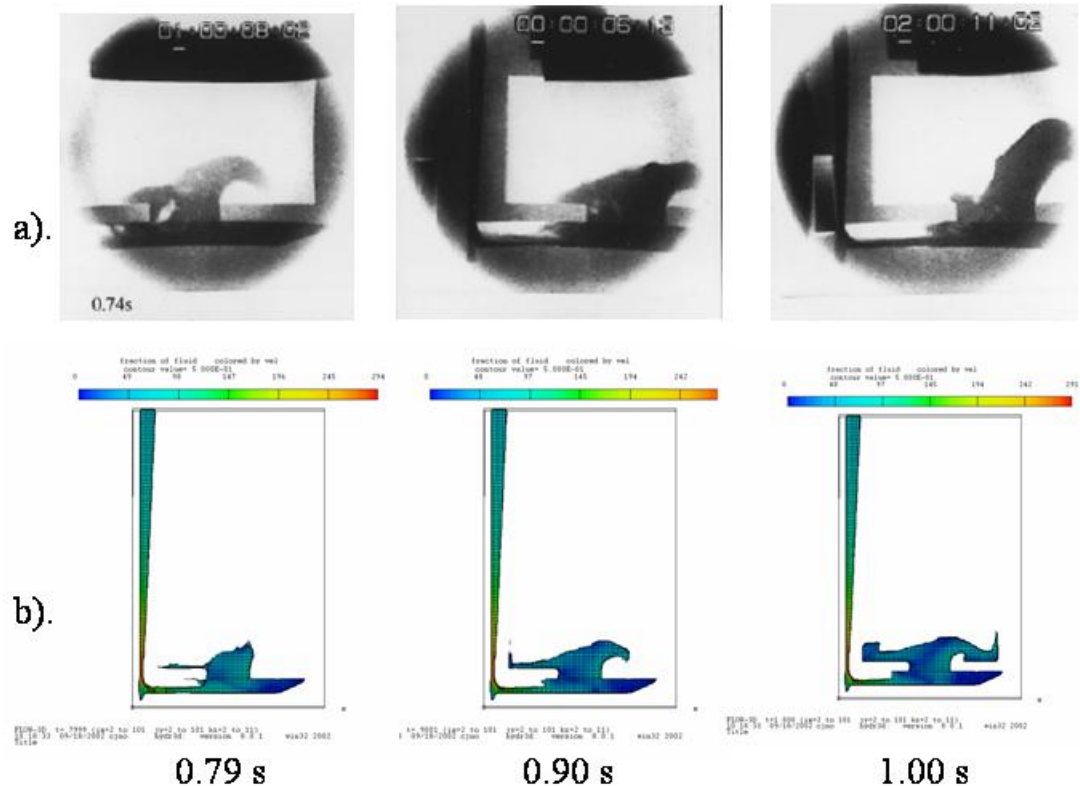


Figura 4. Comparacion de resultados. a). Experimentales a 0.75 seg [19] y b). Simulados con Flow3D para 3 diferentes tiempos 0.79, 0.90 y 1.00 seg.

Por lo tanto se concluye que el uso de Flow3D para simular el proceso de llenado por gravedad es aceptable puesto que captura el comportamiento turbulento y el de las superficies libres con alta precisión.

Después de esto se realiza el estudio de optimización según se explicó en el punto anterior. En las Tablas VI a la IX se muestran los resultados de los análisis mencionados en el experimento 1. Adicionalmente a las variables de diseño ZL y CX se incluye en el estudio una variable de control interna del optimizador llamada incremento de paso, SS, (por sus siglas en inglés “*Step Size*”, e indica los incrementos mínimos a utilizar en la búsqueda.

Tabla VI. Resultados utilizando el algoritmo SQP para el experimento 1.

METODO SQP									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CÁLCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGENCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-05	9.5	0.44444	9.500527	0.4442806	2622.88	40.7648	1 (3)	Dirección de búsqueda nula
2	1.E-05	9.75	0.44444	9.75	0.4448844	-----	31.16843	1(1)	Error de Cálculo
3	1.E-05	10	0.44444	10	0.4448844	-----	26.82279	1(2)	Error de Cálculo
4	1.E-05	10.25	0.44444	10.83669	0.7925688	20813.27	26.85961	11(33)	Dirección de búsqueda nula
5	1.E-05	10.5	0.44444	10.70307	0.4089986	46083.14	26.30527	3(8)	Dirección de búsqueda nula
6	1.E-05	10.75	0.44444	10.76075	0.44444	6688.53	26.93816	1(1)	Dirección de búsqueda nula

Tabla VII. Resultados utilizando el algoritmo MMFD para el experimento 1.

METODO MMFD									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CÁLCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGENCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-05	9.5	0.44444	9.5	0.44444	6044.91	41.09748	0 (0)	Convergencia relativa
2	1.E-05	9.75	0.44444	9.749513	0.4458533	18220.66	26.71209	6 (19)	Convergencia relativa
3	1.E-05	10	0.44444	10.00166	0.4454219	10686.09	26.15662	1 (4)	Error en DOT
4	1.E-05	10.25	0.44444	10.25	0.4448844	8426.16	27.95061	1 (1)	Error en DOT
5	1.E-05	10.5	0.44444	10.5102	0.4438647	9697.85	34.48964	3 (8)	Convergencia relativa
6	1.E-05	10.75	0.44444	10.74972	0.4460724	12161.76	26.25568	4 (12)	Convergencia relativa

Tabla VIII. Resultados utilizando el algoritmo SLP para el experimento 1.

METODO SLP									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CÁLCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGENCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-05	9.5	0.44444	10.8891	0.3597404	----	27.76004	3 (3)	Error de cálculo
2	1.E-05	9.75	0.44444	10.9	1.65857	----	27.23426	5 (6)	Error de cálculo
3	1.E-05	10	0.44444	10.67663	1.618008	211572.63	25.42672	40 (1)	Máximo # de iteraciones
4	1.E-05	10.25	0.44444	10.25	0.4448844	903.85	27.95061	1 (1)	Condiciones Kuhn-Tucker
5	1.E-05	10.5	0.44444	10.5105	0.44444	824.83	30.9065	1 (1)	No hay solución factible
6	1.E-05	10.75	0.44444	10.76075	0.44444	62732.41	26.93816	1(1)	Máximo # de iteraciones

Tabla IX. Resultados utilizando el algoritmo SUMT para el experimento 1.

METODO SUMT									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CÁLCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGENCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-05	9.5	0.44444	9.5	0.44444	43045.89	41.09748	0 (0)	Condiciones Kuhn-Tucker
2	1.E-05	9.75	0.44444	9.732241	0.443949	59576.46	25.7725	1 (17)	Condiciones Kuhn-Tucker
3	1.E-05	10	0.44444	9.995151	0.4470814	58129.65	26.0161	2 (36)	Condiciones Kuhn-Tucker
4	1.E-05	10.25	0.44444	10.25	0.4448844	903.85	27.95061	1 (1)	Condiciones Kuhn-Tucker
5	1.E-05	10.5	0.44444	10.49614	0.4421668	46083.14	31.24892	1 (17)	Normal
6	1.E-05	10.75	0.44444	10.75	0.44444	6688.53	49.63463	0 (0)	Normal

Los resultados de la Tabla VI, utilizando el método SQP, muestran 4 pruebas que pudieron terminar y llegar a un punto donde ya no se tuvo una dirección de búsqueda (pruebas 1, 4, 5 y 6). Solo en las pruebas 4 y 5 los valores finales de ZL y CX son bastante diferentes que los iniciales, al igual que son las que tomaron mayor tiempo de cálculo. Las otras cuatro pruebas terminan con un punto óptimo prácticamente igual al mismo con el que iniciaron. El valor mínimo de velocidad se obtiene en la prueba 5, con un valor de 26.30 cm/seg. En la prueba 4 es cuando se obtiene el valor óptimo en el mayor punto de diseño comparado con los otros 5, es decir el punto 33.

Los resultados obtenidos con el método, MMFD, Tabla VII, muestran también dos pruebas con problemas de convergencia y cuatro que pudieron llegar a un cierto criterio

de terminaci3n (pruebas 1, 2, 5 y 6). En las seis pruebas se observa observamos que los resultados finales de ZL y CX son pr3cticamente los mismos que los iniciales.

En la Tabla VIII, se presentan los resultados utilizando el m3todo SLP. Nuevamente, dos pruebas terminan con error en el simulador (1 y 2). En la prueba 5 se no se puede llegar a una soluci3n factible que cumpla con las restricciones. Y de las otras 3 pruebas, 2 de ellas terminan con los mismos puntos de dise1o inicial, 4 y 6. Solo el an3lisis 3 muestra un punto final de dise1o diferente al inicial y un valor 3ptimo de velocidad aceptable, 25.42 cm/seg.

Por ultimo, en la Tabla IX, tenemos los resultados obtenidos utilizando el m3todo SUMT. Las 6 pruebas terminan sin error de c3lculo, es decir, observ3 mayor estabilidad. En 4 de las pruebas se satisfacen las condiciones de optimalidad local (condiciones Kuhn Tucker [22]). En el an3lisis 2 se obtiene la velocidad m3nima de las 6, 25.77 cm/seg. En promedio se utiliza una mayor cantidad de tiempo de calculo con respecto a los otros 3 m3todos. Pero en todos los casos los puntos finales de dise1o son pr3cticamente los mismos que los iniciales.

En resumen, solo 2 m3todos, SQP y SLP mostraron resultados 3ptimos finales diferentes a los puntos iniciales de dise1o de ZL y CX. El SUMT mostr3 mayor estabilidad.

De los resultados de la etapa 2, de acuerdo a la Tabla V, se muestran a continuaci3n solo aquellos de los m3todos SLP y SQP, por ser los que mejor se comportaron en la etapa 1, aunque se realizaron todas las pruebas con los 4 algoritmos. Ver Tablas X y XI.

Tabla X. Resultados utilizando el algoritmo SLP en experimento 2.

METODO SLP									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CALCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGANCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-07	10.25	0.3	10.25	0.3	----	27.76059	0(0)	Error de calculo
2	1.E-07	10.25	0.44444	10.25	0.4448844	836.16	27.95061	1(1)	Condiciones Kuhn Tucker
3	1.E-07	10.25	0.6	10.25	0.6006	848.56	32.40244	1(1)	Condiciones Kuhn Tucker
4	1.E-07	10.25	0.9	10.26025	0.9	60226.44	27.8391	1(1)	Maximo num. iteraciones
5	1.E-07	10.25	1.25	10.25	1.25125	888.48	29.27797	1(1)	Condiciones Kuhn Tucker
6	1.E-07	10.25	1.5	10.25	1.5	----	27.68404	0(0)	Error de calculo

Tabla XI. Resultados utilizando el algoritmo SQP en experimento 2.

METODO SQP									
	SS	VALORES INICIALES		VALORES FINALES		TIEMPO DE CALCULO	VEL. OBJ.	ITER. OBJ. (PUNTO OPTIMO)	CRITERIO DE CONVERGANCIA
		ZL (cm)	CX	ZL (cm)	CX	(seg)	(cm/seg)		
1	1.E-07	10.25	0.3	10.07774	0.9834808	22780.9	24.62152	9(24)	Direcci3n de b3squeda nula
2	1.E-07	10.25	0.44444	10.12903	1.274805	20920.38	27.16548	10(31)	Direcci3n de b3squeda nula
3	1.E-07	10.25	0.6	10.67473	1.012648	----	26.30067	3(8)	Error de calculo
4	1.E-07	10.25	0.9	10.67938	0.9358793	21304.54	25.41307	10(34)	Direcci3n de b3squeda nula
5	1.E-07	10.25	1.25	10.68077	1.23073	11944.72	26.3883	5(14)	Direcci3n de b3squeda nula
6	1.E-07	10.25	1.5	10.12694	0.7622476	5319.9	25.20413	2(5)	Direcci3n de b3squeda nula

Al observar los resultados de las Tabla X, podemos ver como en pr3cticamente las seis pruebas, los valores finales de las variables de dise1o son casi los mismos que los iniciales. Esto indica que el m3todo interno de b3squeda del algoritmo SLP, aplicado al presente dise1o de colada, no es capaz de encontrar un valor 3ptimo muy alejado del

punto inicial de diseño. Y los valores óptimos de velocidad, en promedio no bajan de 27 cm/seg. Se presentaron 2 errores de cálculo.

Por otra parte, en la Tabla XI al aplicar el método SQP se observa que los seis análisis terminan en un punto del diseño óptimo diferente con el que iniciaron. Y solo la prueba 3 termino con un error de cálculo. Se observan valores promedio de la velocidad objetivo por debajo de 25 cm/seg.

7. Conclusiones

Los resultados muestran que si es factible obtener una colada optimizada aplicando el método descrito en el presente trabajo, de acuerdo al diagrama de flujo mostrado en la Figura 3. El método de optimización que mejor apoya al diseño del sistema de alimentación es el Programación Cuadrática Secuencial, SQP. Al aplicar este método se obtienen valores de las variables de diseño diferentes a los puntos de inicio y que minimizan la velocidad en la entrada. En prácticamente todas las pruebas con todos los métodos analizados, se cumple la restricción impuesta de no mantener aire en el canal principal antes de que empiece a entrar metal al molde.

Como siguiente paso del presente estudio se desea realizar un diseño de experimentos aplicando exclusivamente el método SQP, con las variables de diseño y algunos otros parámetro algorítmicos del método. Esto es motivado por el hecho de que los métodos de optimización son sensibles a estos parámetros, los cuales pueden llegar a influir significativamente en el “costo” de la función objetivo y en su desempeño computacional.

8. Agradecimientos

Se agradece el apoyo de NEMAK S.A. de C.V. en la realización de este trabajo sin el cual no habría sido posible su realización.

9. Referencias

[1] V. Balabanov, D. Ghosh, G. Vanderplaats. VisualDOC: A software system for general-purpose integration and design optimization. En *Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, Septiembre 2002, Atlanta, Georgia, EUA.

[2] M.R. Barkhudarov y C.W. Hirt. Casting simulation: Mold filling and solidification-benchmark calculations using FLOW-3D. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, MCWASP VII, editores M. Cross y J. Campbell, pp. 935-946, Warrendale, PA, EUA, 1995.

[3] F. Bonollo y S. Odorizzi. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. Servizi Grafici Editoriali, Padova, Italia, 2001.

[4] F. Bradley y S. Heinemann. A hydraulics-based:optimization methodology for gating design. *Applied Mathematical Modelling*, 17(8), 406-414, 1993, EUA.

- [5] J. Campbell. *Castings*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Reino Unido, 1991.
- [6] J. Campbell. Solidification modeling: current limitations y future potential. *Material Science and Technology*, 7(Oct), 885-894, 1991, Reino Unido.
- [7] J. Campbell. Invisible macrodefects in castings. *Journal de Physique IV*, 3, 861-872, 1993.
- [8] J. Campbell. Review of computer simulation versus casting reality. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, MCWASP VII, editores M. Cross y J. Campbell, 907-913, 1995, Reino Unido.
- [9] J. Campbell. The ten castings rules guidelines for the reliable production of reliable castings - A draft process specification. *Proceedings of Materials Solutions Conference '98 on Aluminum Casting Technology*. Chicago, Illinois, EUA, 1998.
- [10] M. Cross, "Casting simulation - Hardware developments, software algorithms and modern developments", *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes IX*, MCWASP IX. Editores P. Sahn, P. Hansen y J. Conley, Keynote, pp XXV, Aachen, Alemania., 2000.
- [11] N. R. Green y J. Campbell. Influence of oxide film filling defects on the strength of Al-7Si-Mg alloy castings. *Transactions of the AFS*, 102(1994), 341-347, 1994.
- [12] C. W. Hirt y B. D. Nichols. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225, 1981.
- [13] R.M. McDavid y J.A. Dantzig. Design sensitivity and finite element analysis of free surface flows with application to optimal design of casting rigging systems. *International Journal For Numerical Methods In Fluids*. 28, pp 419-442, 1998.
- [14] R.M. McDavid y J.A. Dantzig. Experimental y numerical investigation of mold filling. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII*, pp 59-66, 1998.
- [15] I. Ohnaka y J.D. Zhu. Computer simulation of fluid flow and heat transfer of the benchmark test by 'DFDM/3DFLOW'. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, MCWASP VII, ed. M. Cross y J. Campbell, pp. 971-974, Warrendale, PA, EUA, 1995.
- [16] J. Runyoro, S.M.A. Boutorabi y J. Campbell. Critical gate velocities for film-forming castings alloys: a basis for process specification. *Transactions of the AFS*. 92-37, 1992.
- [17] R. Schuhmann, J. Carrig, T. Nguyen y A. Dahle. Comparison of water analogue modelling y numerical simulation using real-time x-ray flow data in gravity die casting. Paper 22 of CRC for Cast Metals Manufacturing (CAST), Australia, 1994.
- [18] B. Sirrell, M. Holliday y J. Campbell. The benchmark test 1995. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, MCWASP VII, ed. M. Cross y J. Campbell, 915-933, 1995.
- [19] B. Sirrell, M. Holliday y J. Campbell. Benchmark testing the flow y solidification modeling of al castings. *Journal of Materials*, JOM, 48 (3), 20-23 1996.
- [20] S. Strobl. Good gatings leads to good castings. *Modern Casting*, 1992.
- [21] J. M. Svoboda. *Basics Principles of Gating & Riserling*. American Foundry men's Society Cast Metals Institute AFS-CMI, Chicago, Illinois, EUA, 1995.

[22] G. N. Vanderplaats. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design - With Applications*. McGraw-Hill, New York, NY, EUA, 1984.

[23] Z.A. Xu y F. Mampaey. Mold filling and solidification simulation of the bench mark casting. *Proceedings of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, MCWASP VII, ed. M. Cross y J. Campbell, pp. 963-970, Warrendale, PA, EUA, 1995.