

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION
PARA EL LLENADO DE MOLDES CON ALEACIONES
DE ALUMINIO

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERIA DE MATERIALES

PRESENTA
Carlos Evaristo Esparza Garcés

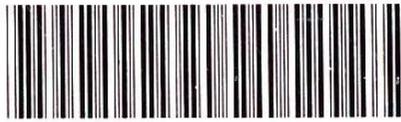
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. NOVIEMBRE 2003

OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION
PARA EL LLENADO DE MOLDES CON ALIACACIONES
DE ALUMINIO

C.F.E.G.

2003

TD
Z5853
.M2
FIME
2003
.E7

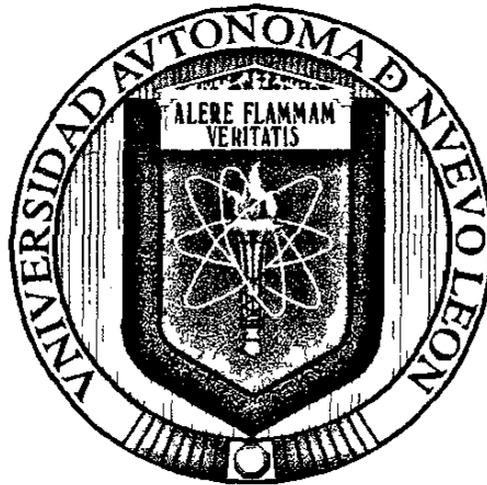


1020150649

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION PARA EL LLENADO DE
MOLDES CON ALEACIONES DE ALUMINIO**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES**

PRESENTA

Carlos Evaristo Esparza Garcés

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

NOVIEMBRE DEL 2003

989 d'2

TD
ZSYSC
.H.
F1110
2003
.E7

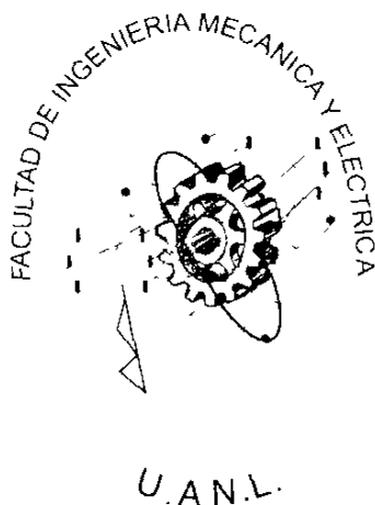


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACION PARA EL LLENADO DE MOLDES
CON ALEACIONES DE ALUMINIO**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN
INGENIERÍA DE MATERIALES**

PRESENTA

Carlos Evaristo Esparza Garcés

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

NOVIEMBRE DEL 2003

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Optimización de un Sistema de Alimentación para el Llenado de Moldes con Aleaciones de Aluminio" realizada por el M.C. Carlos Evaristo Esparza Garcés sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El comité de tesis



Asesor

Dra. Martha Patricia Guerrero Mata



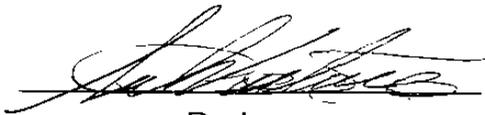
Asesor

Dr. Roger Z. Ríos Mercado



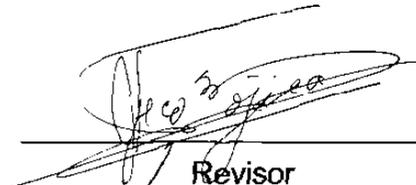
Revisor

Dr. Rafael Colás Ortiz



Revisor

Dr. Salvador Valtierra Gallardo



Revisor

Dr. Juan Francisco Mojica Briseño



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Noviembre 2003

DEDICATORIA

Cuando te inspira un objetivo importante, un proyecto extraordinario, todos tus pensamientos rompen sus ataduras: tu mente supera los límites, tu conciencia se expande en todas direcciones y tú te ves en un mundo nuevo y maravilloso. Las fuerzas, facultades y talentos ocultos cobran vida, y descubres que eres una persona mejor de lo que habías soñado ser.

- Patanjali

A Dios, por permitirme ser un instrumento de tu amor, poniendo mis talentos a tu servicio y deseando hacer tu voluntad y no la mía.

A mi caracola, mi esposa, por tu amor, comprensión e impulso para que terminara mis estudios. Sin tu apoyo hubiera sido imposible terminar. El tiempo se hubiera diluido en las actividades diarias sin tu oportuno recordatorio. Pero sobretodo por el amor que me has brindado. "Soy un arroyo tranquilo y tú uno turbulento, los dos unidos formamos un río con la fuerza para vencer los obstáculos que se presenten, pero con la prudencia para llegar al océano de la felicidad, disfrutando el viaje".

A mi padre, Q.E.P.D., porque me diste la vida y las primeras enseñanzas al caminar por este mundo. Estuviste esperando con ansía el día de mi examen para obtener el grado de Doctor y acompañarme. Siempre estuviste orgulloso de tus hijos. Dios te llevó a su lado y junto con él estarás presente durante mi examen y en el transcurso de mi vida hasta que nos volvamos a ver y decirte que: "No viviste en vano".

A mi madre, porque inspiraste en mí la vocación de estudiar y perseverar a pesar de las dificultades y obstáculos que juntos vivimos. Gracias por todo tú amor. A mis hermanos, por cada una de las cosas que hemos vivido juntos, los amo.

A mis hijas, Carolina y (Maria José) y algunos mas que Dios nos permita tener. Este esfuerzo solo tiene sentido si se orienta para darles a ustedes un mejor futuro, en todos los aspectos y nos disfrutemos mutuamente como familia.

Cuando naciste el mundo se alegró mientras tú llorabas. Tu misión consiste en vivir de manera que cuando mueras el mundo lllore y tú te alegres.

- Anónimo

Abiba, abiba, abiba. ¡Abiba Papá!

- Carolina Esparza, 2 años de edad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León que a través del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica me dio muchas enseñanzas y apoyos durante todas las etapas del desarrollo de este trabajo.

A NEMAK S.A. de C.V. por su apoyo, de principio a fin, en la realización de este trabajo.

A la Dra. Martha Guerrero Mata, por su paciencia y apoyo total, pero sobretodo por haber depositado en mí su confianza.

Al Dr. Roger Z. Ríos Mercado, por sus enseñanzas tan valiosas y necesarias para el desarrollo conceptual y practico de este trabajo.

Al Ing. Alejandro Valdez Valdez, por su amistad, apoyo y comprensión en la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colas Ortiz, por su apoyo total en mis actividades académicas y su invaluable amistad.

Al Dr. Salvador Valtierra Gallardo, por su apoyo y ejemplo como *profesor, investigador, compañero de trabajo y amigo*, pero sobretodo por ser un mentor en mi vida.

Al Dr. Juan Francisco Mojica Briseño, por su apoyo en la realización de estos estudios.

Al Ing. Rogelio Lozano, por su apoyo en la realización de estos estudios y su ejemplo en el ejercicio de su profesión, sobretodo por el interés y tiempo dedicado al diseño de coladas.

A todos mis amigos, compañeros y colegas que de algún modo me impulsaron a seguir adelante y terminar este trabajo, en especial al Dr. Eulogio Velasco Santés.

A todos los catedráticos y cuerpo docente del PDIM de la FIME de la UANL por compartir sus conocimientos y experiencias.

A mis compañeros de trabajo en NEMAK por su apoyo y comprensión durante la realización de este trabajo, en especial a Luz del Carmen Ramírez, Alejandro Escudero y Jesús Vargas.

A mis amigos, a quienes no he podido atender como yo quisiera, para poder terminar estos estudios.

A mi familia por su apoyo, comprensión y confianza, a quién debo el tiempo utilizado para poder terminar estos estudios. En especial a mi esposa: María Te Amo de aquí a aquí para siempre.

A Dios por darme esta vida con todos sus ingredientes y que me permita ser un instrumento de su amor, poniendo mis talentos a su servicio y deseando hacer su voluntad y no la mía.

Índice

ÍNDICE.....	VI
RESUMEN	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO 2. EL ALUMINIO Y SU DINÁMICA.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Propiedades del aluminio.....	7
2.3 Áreas de aplicación	8
2.4 Clasificación de las aleaciones de aluminio.....	9
2.5 Procesos de Vaciado.....	11
2.6 Dinámica del aluminio líquido.....	12
2.6.1 Teorema de Bernoulli	13
2.6.2 Ley de continuidad	15
2.6.3 Efectos del momento.....	16
2.6.4 Pérdidas por fricción.....	18
2.6.5 Número de Reynolds.....	19
2.6.6 Llenado controlado por tensión superficial	20
2.6.7 Fluidéz máxima L_f	20
2.6.8 Longitud de fluidéz continua L_c	22
2.7 Conceptos básicos en el diseño de coladas.....	22
2.7.1 Elementos del sistema de alimentación	23
2.7.2 Rapidez y tiempo de llenado	25
2.7.3 Clasificación de las coladas.....	25
2.8 Recientes contribuciones en el diseño de coladas	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DEL ALUMINIO LÍQUIDO	34
3.1 Introducción	34
3.2 Ecuaciones básicas de conservación.....	34
3.2.1 Conservación de masa.....	35
3.2.2 Conservación del momento.....	37
3.2.3 Conservación de la energía.....	40
3.3 Modelación del flujo de llenado	40
3.3.1 Modelación de la superficie libre	41
3.3.1.1 Método de malla Lagrangiano	42
3.3.1.2 Métodos de malla Euleriana	43

3.4 Selección del método numérico a utilizar.....	49
3.4.1 Resumen de las ecuaciones diferenciales gobernantes	49
3.4.2 Aplicación del método de Volumen de Control y su discretización.....	50
3.5 Recientes aplicaciones de la simulación numérica en el diseño de coladas	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN DE UN DISEÑO	65
4.1 Introducción	65
4.2 Conceptos básicos de optimización numérica.....	66
4.3 Ventajas y limitaciones del uso de la optimización numérica.....	68
4.3.1 Ventajas	68
4.3.2 Limitaciones.....	69
4.4 Resumen del desarrollo de las técnicas de optimización.....	70
4.4.1 Orígenes.....	70
4.4.2 Clasificación de los algoritmos utilizados en optimización.....	70
4.5 Descripción de los algoritmos de optimización de interés en el presente estudio.....	72
4.5.1 Programación Lineal Secuencial con Restricciones (SLP).....	72
4.5.2 Método Modificado de Direcciones Factibles con Restricciones (MMFD).....	74
4.5.3 Programación Cuadrática Secuencial con Restricciones (SQP).....	77
4.5.4 Técnicas de Minimización Secuencial sin Restricciones (SUMT)	79
4.6 Criterios de convergencia	80
4.6.1 Número máximo de iteraciones.....	80
4.6.2 Cambio absoluto o relativo en la función objetivo.....	81
4.6.3 Condiciones de Kuhn Tucker	81
4.7 Aplicación de las técnicas de optimización en la solución de problemas de ingeniería	83
4.7.1 Aplicación de las técnicas de optimización en el diseño de coladas	83
4.7.2 Otras aplicaciones de las técnicas de optimización en el diseño	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	93
5.1 Introducción	93
5.2 Etapa 1. Selección del simulador de llenado.....	94
5.2.1 Corroboración del simulador con la realidad	95
5.3 Etapa 2. Selección del optimizador	97
5.3.1 Parte I. Selección del optimizador	97
5.3.2 Parte II. Acoplamiento del optimizador y el simulador.....	100
5.3.3 Parte III. Selección del algoritmo de optimización	104
5.4 Etapa 3. Selección de los parámetros del algoritmo optimizador.....	107
5.5 Etapa 4. Aplicación del método de optimización a un problema en 3D.....	108
5.5.1 Parte I. Diseño de experimentos	109

5.5.2 Parte II. Análisis de los diseños óptimos	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	112
6.1 Introducción	112
6.2 Etapa 1. Correlación de resultados en colada real y virtual.....	112
6.3 Etapa 2. Evaluación de 4 métodos de optimización en colada en 2D.....	116
6.3.1 Parte I. Selección del optimizador	116
6.3.2 Parte II. Acoplamiento del optimizador y el simulador	116
6.3.3 Parte III. Selección del algoritmo de optimización	117
6.4 Etapa 3. Uso de SQP para optimización de colada 2D	129
6.5 Etapa 4. Optimización de diseño de coladas en 3D.....	136
6.5.1 Parte I. Resultados y discusión del diseño de experimentos.....	136
6.5.2 Parte II. Análisis de los resultados óptimos de diseño.....	143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	154
7.1 Conclusiones.....	154
7.2 Recomendaciones	158
ÍNDICE DE FIGURAS.....	161
ÍNDICE DE TABLAS	165
ANEXO 1.....	167
A1.1 Conceptos básicos de optimización	167
A1.2 Minimizar la energía potencial de un sistema de resortes con cargas	170
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	177
RESUMEN AUTOBIOGRAFICO	178

Resumen

Al diseñar cualquier componente de ingeniería, se desea producir el mejor producto posible con los recursos disponibles. Para tal efecto se utilizan las herramientas de diseño que den el resultado deseado en un tiempo y a un costo aceptable. En un problema de diseño típico, existe una función que mide el desempeño de éste, dependiendo de ciertas variables de diseño y lo que se lleva a cabo es una evaluación de la función para uno o varios puntos previamente especificados. Esta asignación es básicamente vía prueba y error, lo cual a la larga resulta sumamente costoso y sin garantía científica de que sea el mejor de los diseños posibles.

En contraste, el problema de diseño óptimo, puede definirse como el proceso de encontrar el valor o valores de las variables de diseño que reditúan en el mejor valor de la función de desempeño del sistema, sujeto desde luego a las restricciones tecnológicas que definen diseños factibles. Este proceso es científicamente apoyado por las técnicas de optimización que de forma estructurada guían la búsqueda del diseño óptimo hasta encontrarlo.

En el presente estudio se utilizan técnicas numéricas de optimización para obtener el diseño óptimo de un sistema de alimentación (colada) utilizado en el proceso de fundición por gravedad. Esta es una aplicación novedosa al acoplar dichas técnicas con un programa de simulación del proceso de fundición. El simulador está basado en el método de volumen finito y aplica la técnica VOF para el análisis de fluidos. Se presentan resultados de la aplicación de 4 métodos distintos de optimización directa por gradientes aplicados a un problema de colada en 2 y 3 dimensiones con diversas variables de diseño. Los resultados muestran contundentemente la superioridad de las técnicas de optimización en cuanto a la calidad de la solución sobre el proceso actual de prueba y error.