



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.  
DPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS  
DE FABRICACIÓN.



**“SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN  
DEL ALUMINIO EN LA COLADA CONTÍNUA PARA  
UN ESPESOR DE 6 mm”**

Elaborado por:

Cordovéz Claudia C.I: 16.338.675

Valencia, Mayo del 2008.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.  
DPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS  
DE FABRICACIÓN.



**“SIMULACIÓN DEL PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN DEL  
ALUMINIO EN LA COLADA CONTÍNUA PARA UN ESPESOR  
DE 6 mm”**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENADO ANTE LA  
ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

Elaborado por:

Cordovéz Claudia C.I: 16.338.675

Valencia, Mayo del 2008.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el trabajo especial de grado titulado “Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6 mm”, realizado por la bachiller Cordovéz F. Claudia C, CI: 16338675; hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

Prof. Romanello Donato  
Tutor

---

Prof. Valles Luis  
Jurado

---

Prof. Díaz Eleazar  
Jurado



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

**DEDICATORIA**

A **Dios**, por escuchar todas mis plegaria y ayudarme en este camino tan difícil de recorrer y, aunque no soy tu mejor discípula, sabes que creo plenamente en ti.

A la persona más importante y que he querido en este mundo y aunque físicamente no estés, siempre lo has estado en mi mente y en mi corazón. ¡No sabes cuanta falta me haces **Abuelito!** Todo esto es para ti.

A mi **Abuela**, por ser mi segunda madre, por siempre haber estado ahí para ayudarme y enseñarme a crecer. Me duele que no estés conmigo en este momento pero te llevare a todos lados en mi corazón. Espero estés orgullosa de mi, Mita.

A mi querida **Ali McBil**, por haber estado en todo momento brindándome su apoyo, cariño y sobre todo su comprensión, por ser partícipe de mis alegrías y mis tristezas. A ti madre, ¡Gracias!

A mi **Tía Enid**, por haberme ayudado en toda la carrera. ¡Gracias, por nunca dejarme caer y por sobre todo creer en que si podía!

A ti mi **Papisíto**, por haber sido fuente de inspiración y ayuda en todo momento. ¡Gracias por formar parte de mi vida y por nunca dejarme desmayar en las situaciones más difíciles! Este logro es de los dos y por eso te lo dedico amor. **Te amo Henrique.**

A mi **Prima y Hermana**, por haber compartido todos los momentos difíciles y gratos de la carrera. A ti que sabes cuánto he querido esto, Gracias Deymarí.

A toda mi familia por ser parte de mi crecimiento, por darme apoyo y saber escucharme; en especial a mi Tía Nilsy y mi primo José Luis. ¡Gracias!



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

A mis **amigos**, Nelson Teixeira, Roberto, Minerva, Celeste, Jesús (Cubito), Juan Carlos, Rayner Godoy, José miguel, Luis, Rainer Trejo, Raúl, kevin y Alejandro que estuvieron en todas las etapas de la universidad, que todos sabemos son muchas, y a todos aquellos que de alguna u otra forma estuvieron presentes. ¡Gracias!



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **RESUMEN**

Actualmente las empresas procesadoras del aluminio presentan inconvenientes en sus líneas de producción debido a la aparición de defectos en el material una vez solidificado, provocando esto una mayor cantidad de desperdicios, disminución de la calidad del producto, retrasos en los planes de trabajo y, en consecuencia demora en los plazos de entrega y un gran porcentaje de devoluciones. Esta situación es agravante, ya que las pérdidas laborales, productivas y de materia prima son innumerables. Dado que la mayor parte de los defectos se presentan durante el proceso de solidificación, es de suma importancia lograr descubrir los aspectos que influyen en la aparición de estos, por lo que, la propuesta de realizar la simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm, adquiere un aporte invaluable para el estudio de la aparición de los defectos y así, controlar el proceso de forma óptima virtualmente.

Antes de iniciar se seleccionan las variables (en un estudio completo de lo que ocurre en el proceso de solidificación del aluminio se analizan las influencias de las variables trayendo en estudio las más perturbadoras) para observar su comportamiento en función de la Calidad, las cuales son: Titanio-Boro (Coadyuvante de la eliminación dendrítica dentro del aluminio, causante principal de que el material se debilite, provocando así rupturas), Flujo de Argón (Ayuda a minimizar la presencia de hidrógeno dentro del aluminio, causante principal de poros), Temperatura de caja (seleccionada por su importancia de mantener el aluminio fundido a no muy altas temperaturas para aumentar la ausencia de hidrógeno), Corona de banda y Espesor promedio de la lámina (Características principales del producto).

La modelación matemática fue construida a partir de la data estadística con ayuda de los software Spss y el Matlab; los cuales permitieron realizar un estudio detallado hasta lograr la ecuación que define al modelo en dos estudios:  **$Y(\text{Calidad}) = -391.931$**



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

+ (-114.293\*Titanio\_Boro) + (-16.3615\*Flujo\_Argón) + (0.496515\*Temp) + (100.963\*Corona) + (25.7644\*Espesor) permitiendo observar como el Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de caja, Corona de banda y Espesor promedio afectan a la Calidad en la aparición de defectos. El software Matlab permitió la simulación, puesto que este programa va conectado directamente al proceso, leyendo cada valor de cada parámetro y mandándolo directo al computador, permitiéndole así al operador observar y controlar virtualmente estos parámetros.

Haciendo referencia directamente a ALUCASA CVG (dado que fue la que otorgó la data estadística con la que se llevó a cabo el estudio), se puede indicar que los rangos para cada variable son:

- Flujo de Argón: 0.8 m<sup>3</sup>/h – 1 m<sup>3</sup>/h.
- El Titanio-Boro: 0.023% - 0.042%.
- Temperatura de caja: 698°C – 701°C.
- Corona de banda: 0.04 mm – 0,07 mm.
- Espesor promedio: 5.90 mm – 6.30 mm.

Es necesario tomar las previsiones necesarias, puesto que éstas son las causantes de la aparición de defectos en el aluminio, como lo son: grietas, rechupes, poros y problemas a nivel molecular.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

### AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por darme la fortaleza y la ayuda para lograr concluir esta meta.

A mi **Mamá**, por todos los sacrificios (que se que fueron muchos), ayuda y comprensión en todo momento, ¡A ti **Ali McBil**, Gracias!

A mi **Tía Enid**, por ayudarme en todo momento, aún en las situaciones más difíciles y adversas, ¡Gracias Hijita!

A mi **Novio**, por haberme dado su apoyo y ayuda para lograr concluir esta meta. ¡Gracias **Henrique!**

A la ilustre **UNIVERSIDAD DE CARABOBO**, en especial a la Facultad de Ingeniería, por brindarme los conocimientos que hoy me permiten alcanzar esta meta.

A mi Tutor el **Prof. Donato Romanello**, por haberme brindado su ayuda, amistad, colaboración importante y desinteresada en todo momento para concluir este Trabajo Especial de Grado.

A mis amigas y hermanas, Deymarí y Minerva, por ser piezas fundamentales para mi y esta meta. ¡Gracias por haber estado en todo momento e incondicionalmente pese a sus responsabilidades! Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma formaron parte de esta obra.

**Gracias y que Dios los bendiga.**





*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
<b>FIG.1</b> Diagrama esquemático de una parte de un laminador con una extremidad para la entrega del metal fundido y de un par de rodillos	40
<b>FIG.2</b> Diagrama esquemático ampliado, seccionado transversalmente, de los rodillos, y la entrega del metal fundido demostrados en Fig. 1. Funciona según la fig.1	40
<b>FIG.3</b> Diagrama esquemático ampliado, seccionado transversalmente, de los rodillos, y la entrega del metal fundido demostrados en Fig. 1. Funciona según la fig.1	44
<b>FIG.4</b> Programa Matlab	60
<b>FIG. 5</b> Comportamiento del hidrógeno en función de la temperatura	60
<b>FIG.6</b> Descripción del proceso de colada del aluminio	61
<b>FIG.7</b> Introducción de la matriz en el software	68
<b>FIG.8</b> Solicitud de ejecución en el software	69
<b>FIG.9</b> Llenado de la casilla de regresión múltiple	70
<b>FIG.10</b> Resultados del software	71



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

	<b>Pág.</b>
<b>FIG.11</b> Resultados del software	72
<b>FIG.12</b> Resultados del software	73
<b>FIG.13</b> Código en el software Matlab	74
<b>FIG.14</b> Continuación del código en el software Matlab	75
<b>FIG.15</b> Continuación del código en el software Matlab	76
<b>FIG.16</b> Continuación del código en el software Matlab	77
<b>FIG.17</b> Corrida del software Matlab	78
<b>FIG.18</b> Menú de solicitud de ejecución en el software Matlab	79
<b>FIG.19</b> Hiperplano de regresión (Ecuación)	80
<b>FIG.20</b> Anova (Análisis estadístico)	81
<b>FIG.21</b> Gráfica de residuos	82
<b>FIG.22</b> Pronóstico de la Calidad	83
<b>FIG.23</b> Intervalos de confianza	84



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	15
<b>CAPÍTULO I. EL PROBLEMA</b>	17
<b>I.1.- Planteamiento del problema</b>	18
<b>I.2.- Objetivos</b>	19
<b>I.2.1.- Objetivo General</b>	19
<b>I.2.2.- Objetivos Específicos</b>	19
<b>I.3.- Justificación del problema</b>	19
<b>I.4.- Delimitaciones</b>	20
<b>I.5.- Limitaciones</b>	20
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	21
<b>II.1.- Antecedentes</b>	21
<b>II.2.- Bases teóricas</b>	23
<b>II.2.1.- Historia</b>	23
<b>II.2.2.- Características del aluminio</b>	24
<b>II.2.2.1.- Características físicas</b>	24
<b>II.2.2.2.- Características Mecánicas</b>	24
<b>II.2.2.3.- Características Químicas</b>	25
<b>II.2.3.- Moldeo por gravedad de las aleaciones de aluminio</b>	28
<b>II.2.3.1.- La fusión del aluminio</b>	28
<b>II.2.3.2.- La oxidación</b>	29
<b>II.2.3.3.- Reglas generales de la fusión</b>	31
<b>II.2.3.4.- Absorción de gases</b>	32
<b>II.2.4.- Defectos en la colada</b>	35



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

	<b>Pág</b>
<b>II.2.5.-</b> Laminación	38
<b>II.2.6.-</b> Matlab	46
<b>II.2.6.1.-</b> Matlab	46
<b>II.2.6.2.-</b> Características Dominantes	46
<b>II.2.7.-</b> Estadística.	47
<b>II.2.7.1.-</b> Estadística	47
<b>II.2.7.2.-</b> Tipos de estadística	48
<b>II.2.7.3.-</b> Análisis de regresión	48
<b>II.2.7.4.-</b> Análisis de varianza	49
<b>II.2.8.-</b> Sistema de programación y análisis estadístico (Spss)	51
<b>II.2.8.1.-</b> Spss	51
<b>II.2.8.2.-</b> Historia	52
<b>II.2.8.3.-</b> Módulos del Spss	53
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>55</b>
<b>III.1.-</b> Nivel de la investigación	56
<b>III.2.-</b> Diseño de la investigación	56
<b>III.2.1.-</b> Descripción del proceso	58
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>66</b>
<b>IV.1.-</b> Resultados	67
<b>IV.1.1.-</b> Software Spss	68
<b>IV.1.2.-</b> Software Matlab	74
<b>IV.2.-</b> Análisis de resultados	85
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

	<b>Pág.</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	91
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	92



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

## ÍNDICE DE SIMBOLOS

**Si:** Silicio

**Fe:** Hierro

**m:** Metros

**min:** Minutos

**ton:** Toneladas

**h:** Hora

**T:** Temperatura

**A/P:** Aluminio primario

**Spss:** Sistema de programación y análisis estadístico



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

	<b>Pág</b>
<b>TABLA N°1.</b> Características del aluminio.	28
<b>TABLA N°2.</b> Reporte de Producción y Proceso de La Máquina de Colada.	64
<b>TABLA N°3.</b> Reporte de Producción y Proceso de la Máquina de Colada (2).	67
<b>TABLA N°4.</b> Resultados de la simulación.	88



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

### INTRODUCCIÓN

La elaboración de un sistema asistido por computadora, surge como una necesidad para la resolución de un problema presente en la actualidad para la solidificación del aluminio en la colada continua. La intención de tener este sistema es poder corregir y controlar variables como la temperatura, distancia y velocidad con anticipación, y las posibles causas que ocasionan la formación de imperfecciones en el laminado. El laminado se realiza mediante laminadoras de rodillo gemelas o morochas, que son tradicionalmente una técnica combinada de solidificación y deformación, que implica la alimentación del metal fundido entre un par de rodillos de laminación en frío.

El trabajo que se presenta a continuación, fue estructurado siguiendo una metodología, la cual será presentada a continuación:

El capítulo I (El problema), explica de forma precisa y sistemática la situación problemática o planteamiento del problema con la intención que el lector se percate de la condición actual por la cual pasan las empresas procesadoras del aluminio. En este mismo capítulo se plantean los objetivos a cumplir, para presentar alternativas de solución al problema presente.

El capítulo II (Marco Teórico), recopila la información necesaria para estar al tanto de todo lo referente al proceso, desde el estudio del material de trabajo (aluminio 8011) hasta los posibles problemas o defectos que estos puedan presentar en el proceso de colada continua por rodillos gemelos, para tener la capacidad de distinguir y seleccionar todas y cada una de las variables fundamentales dignas de estudio que forman parte del proceso, como por ejemplo: la temperatura de la fundición, la velocidad rotacional de los rodillos y la distancia entre los mismos tanto de forma individual como en conjunto.





## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

En el capítulo III (Marco metodológico), se define primeramente el nivel de investigación que presenta la monografía y por último el procedimiento a seguir en el cual se explica detalladamente como se realizó el proyecto hasta alcanzar al final los objetivos trazados.

El capítulo IV (Resultados y Análisis de resultados), muestra detalladamente el procedimiento que se siguió para llevar a cabo el trabajo de investigación, siendo éste de gran ayuda para descubrir cuán influyentes son las variables de estudio seleccionadas en el proceso.

# CAPÍTULO I

## 'EL PROBLEMA'



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **EL PROBLEMA**

### **CAPÍTULO I**

#### **I.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente las empresas procesadoras del aluminio presentan inconvenientes en sus líneas de producción debido a la aparición de defectos en el material una vez solidificado, provocando esto una mayor cantidad de desperdicios, disminución de la calidad del producto, retrasos en los planes de trabajo y, en consecuencia, demora en los plazos de entrega y un gran porcentaje de devoluciones. Esta situación es agravante, ya que las pérdidas laborales, productivas y de materia prima son innumerables.

A fin de solucionar estos problemas se han realizado una serie de estudios que han determinado un conjunto de recomendaciones, con el propósito de evitar los distintos defectos que pueda presentar el material solidificado y los aspectos que deben tomarse en cuenta durante el proceso. Por todo esto, se ha iniciado una búsqueda de soluciones, pagando las empresas un alto valor económico por ello; pero los esfuerzos no han sido efectivos, porque los resultados esperados no han podido alcanzarse.

Dado que la mayor parte de los defectos se presentan durante el proceso de solidificación, es de suma importancia lograr descubrir los aspectos que influyen en la aparición de éstos, por lo que, la propuesta de realizar la simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm, adquiere un aporte invaluable para el estudio de la aparición de los defectos y así, controlar el proceso de forma óptima, virtualmente.



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **EL PROBLEMA**

### **CAPÍTULO I**

#### **I.2.- OBJETIVOS**

##### **I.2.1.- Objetivo General:**

Simular el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.

##### **I.2.2.- Objetivos Específicos:**

- Definir una modelación matemática del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua.
- Simular el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua por medio del software Matlab.
- Presentar por medio de la simulación los factores determinantes en la aparición de algunos defectos en el aluminio durante el proceso de solidificación en la colada continua.

#### **I.3.- JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Debido a que la mayor parte de las pérdidas que presentan las empresas procesadoras del aluminio, están relacionadas con la aparición de los defectos una vez solidificado el material y los estudios realizados no han sido muy efectivos, es de gran relevancia descubrir cómo surgen; por ello, nace la idea de realizar la simulación de un proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**EL PROBLEMA**

**CAPÍTULO I**

6mm, y, de esta forma estudiar y controlar los parámetros que intervienen en la aparición de los defectos.

**I.4.- DELIMITACIONES**

- El estudio de la investigación se basa en la simulación de un proceso de solidificación del aluminio en colada continua, por lo que se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:
  1. Material de estudio: Aluminio 8011.
  2. Movimiento de las partículas del fluido en régimen laminar.
- Buen manejo del software Matlab para llevar a cabo el proceso de simulación.

**I.5.- LIMITACIONES**

- El proceso de solidificación del aluminio en la colada continua es un proceso complicado que, su realización, conlleva altos costos y una gran capacidad de disponibilidad, por lo que dependerá de la empresa, que trabaje con dicho proceso, el estudio detallado del mismo.

# CAPÍTULO II

## 'MARCO TEÓRICO'



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**

**III.1.- NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

En este punto se debe clasificar, según el nivel de conocimiento que se busque alcanzar con la investigación; el rango o nivel en el cual se encuentra la monografía. Estos niveles pueden ser de cuatro tipos: Exploratorio, Descriptivo, Explicativo, o la combinación de ellos.

Teniendo claro lo que significa cada renglón clasificatorio, se puede decir que, en un comienzo, se encontró en un nivel exploratorio o en una Investigación Exploratoria; debido a que, se enrumbo en la búsqueda de un conocimiento general o aproximado de la realidad, tratando de buscar tópicos que amplíen la visión del proceso real, ya que la información sobre la materia ha sido muy limitada y se desea alcanzar una mayor profundidad sobre el tema. Después de esa búsqueda de información, para llegar a cumplir los objetivos planteados, la investigación se sumerge en el nivel explicativo, es decir, en una Investigación Explicativa, ya que se estudian las causas y/o efectos de la ocurrencia del fenómeno, de las variables o características que se presentan y de como se interrelacionan entre si.

En resumen, la monografía pasa por dos fases, la primera fase es la exploratoria y luego por la segunda fase que es la explicativa, por lo cual su nivel vendría a ser EXPLORATORIA-EXPLICATIVA.

**III.2.- DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

En esta parte del trabajo se plantea un procedimiento guía el cual fue seguido durante la investigación. Este procedimiento consiste en establecer cómo se lograron los objetivos planteados.



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO METODOLÓGICO**

### **CAPÍTULO III**

Como fue mencionado con anterioridad, el objetivo general de esta presentación es simular el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm, con el cual se desea mostrar los factores determinantes en la aparición de algunos defectos en el aluminio durante el proceso de solidificación. Para ello se planteará el siguiente procedimiento a seguir:

Como primer paso, se procedió a buscar la información necesaria para estar al tanto de todo lo referente al proceso, desde el estudio del material de trabajo (aluminio) hasta los posibles problemas o defectos que éstos puedan presentar en el proceso de colada continua por rodillos gemelos; luego, se distinguió y seleccionó todas y cada una de las variables fundamentales dignas de estudio que forman parte del proceso.

Posteriormente, se seleccionaron las variables y valores de entrada que requiere el sistema, igualmente los resultados que se quieren obtener del proceso.

El siguiente paso fue definir una modelación matemática del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua, con ayuda del software Statgraphics Plus y Spss, se analizó estadísticamente el comportamiento de las variables seleccionadas; para continuar con la simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua por medio del software Matlab.

Por último, se presentan por medio de la simulación, los factores determinantes en la aparición de algunos defectos en el aluminio durante el proceso de solidificación en la colada continua.





*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**

**III.2.1.- Descripción del proceso:**

El proceso definido a continuación tiene su origen en ALUCASA CVG, debido a que fue donde se realizó este estudio y será presentado a continuación:

La materia prima con la que se lleva a cabo el proceso está constituida de la siguiente manera:

- Aluminio Primario (A/P): 70%  
Con una pureza del (99,5% - 99.8%)
- Chatarra (Material reciclable extraído exclusivamente de la empresa):  
30%

Inicialmente las pailas de aluminio (A/P) son precalentadas, esto, como sistema de seguridad, ya que en el medio de transporte pueden recibir humedad (rocío de la mañana, lluvia, etc.) y al entrar en contacto con el baño de aluminio en el horno de fusión causar una explosión. Una vez precalentadas, entran al horno de fusión para pasar de un estado sólido a líquido, junto con la chatarra (este horno tiene una capacidad de fusión de 30 ton y una  $T=830^{\circ}\text{C}$ ), durante la fundición se le agrega:

- Si.
- Fe: En forma de pastillas con una pureza del 75% - 90%. Es importante destacar que el hierro funde a  $1535^{\circ}\text{C}$ , por ello es importante dejarlo dentro de la fundición hasta que diluya por completo.
- Sales fundentes: Ayudan a eliminar la escoria dentro del material.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO METODOLÓGICO

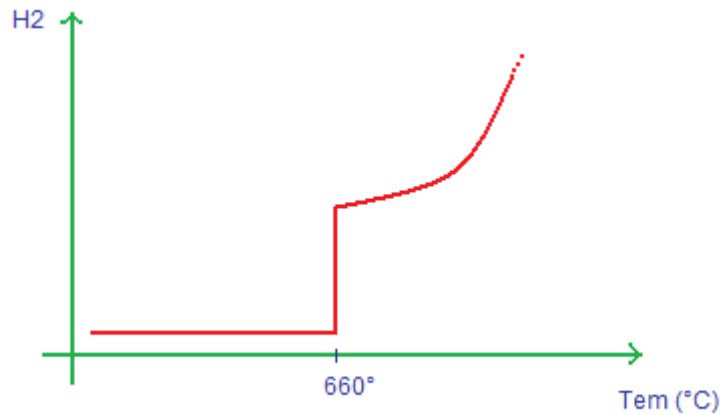
## CAPÍTULO III

Luego por gravedad es trasladado a un horno de retención. Este horno tiene una capacidad de 20 ton (10 ton menos para garantizar el baño de aluminio en el horno de fusión) y permite el trasvase hasta su fase final (el cual debe llegar con una  $T=700^{\circ}\text{C}$ ), haciendo un recorrido de 3 m y con una descarga de 1.5 ton/h. El horno de retención cuenta con un pivote el cual le permite, valga la redundancia, pivotear sobre su eje para cargar y vaciar cuando así se requiera. Una vez iniciada la descarga se le inyecta en forma de alambrón:

- Titanio-Boro: Es un coadyuvante de la eliminación dendrítica dentro del aluminio. (Las dendritas hacen que el material se debilite, provocando así rupturas y/o rasgaduras una vez que se ha iniciado el proceso de laminación).

Posteriormente el material continúa su recorrido hasta llegar a un tanque donde es calentado nuevamente por medio de una resistencia, y movido por un rotor. En este momento se le suministra:

- Flujo de Argón: Es suministrado en forma de burbujas permitiendo minimizar la presencia de hidrógeno dentro del aluminio. (El hidrógeno es imposible eliminarlo por completo, ya que está presente en el ambiente. Este es el causante de la existencia de poros en el aluminio, por eso es de vital importancia maximizar su ausencia).



**FIG.5** Comportamiento del hidrógeno en función de la temperatura.

Fuente: Alucasa CVG.

Luego, de salir de este tanque sigue el trayecto hasta llegar a un filtro cerámico de espuma (Font filter) que ayuda a eliminar las partículas en suspensión. Una vez que concluye su recorrido llega a una boquilla que determina el ancho de la lámina que se desea colar (la dispersión del material dentro de la boquilla es controlada por un flotante). Los rodillos donde ocurre el proceso de laminación son enfriados con agua y se le coloca una capa de grafito para que la lámina (metal fundido) no se adhiera al rodillo.

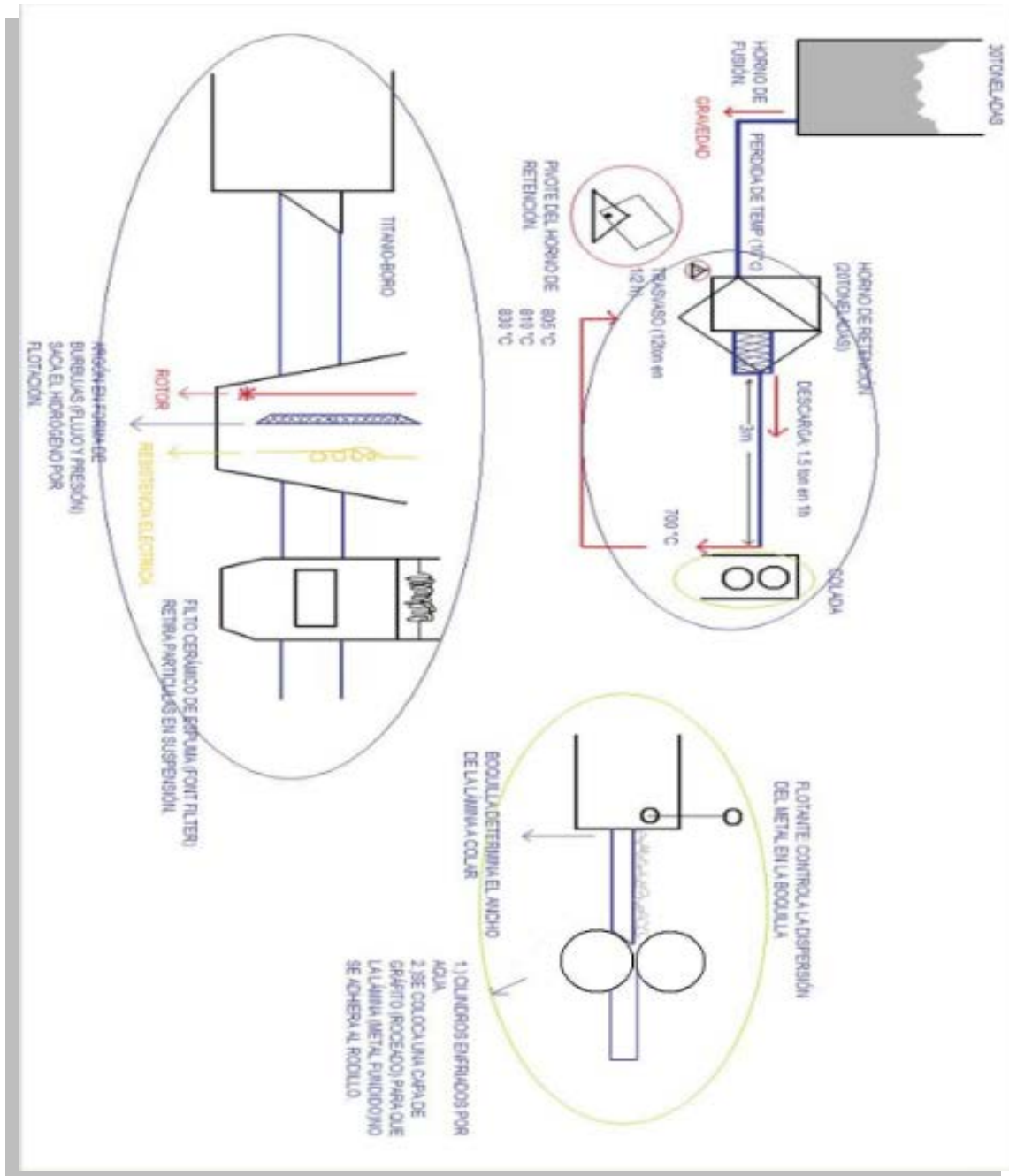
Para mayor comprensión de la descripción del proceso se mostrará gráficamente en la figura 13:



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**



**FIG.6** Descripción del proceso de colada del aluminio.

Fuente: Alucasa CVG.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO METODOLÓGICO

## CAPÍTULO III

Dentro del proceso de solidificación se hace un estudio minucioso del material producido, donde se estudian variables como:

### 1. Parámetros de proceso:

- Temperatura de desgasificación (°C).
- Presión de Argón (Psi).
- Flujo de Argón (m<sup>3</sup>/h).
- Temperatura de retención (°C).
- Velocidad del Titanio-Boro (cm/min).
- Temperatura de caja (°C).
- Velocidad de la banda (m/min).
- Temperatura de entrada del agua (°C).
- Precarga del motor (Ton).
- Calidad (%)

### 2. Características Físicas y Químicas:

- Silicio.
- Hierro.
- Titanio-Boro
- Aluminio.
- Espesor promedio.
- Corona de banda.

Los parámetros de proceso permiten un estudio detallado de los aspectos influyentes



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**

durante la elaboración de la lámina y de las variables que afectan su fabricación, mientras que las características físicas y químicas dan un estudio más minucioso de las composiciones involucradas, así como, la forma final de la lámina.

Para cumplir con los objetivos específicos de este proyecto se realiza un estudio detallado de las variables seleccionadas (Titanio -Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda, Espesor promedio) con el fin de estudiar como afectan a la **Calidad** (variable aleatoria o dependiente) haciendo uso del software Spss, permitiendo avanzar antes de iniciar la simulación en el software Matlab.

La modelación matemática fue construida a partir de la data estadística donde se estudian los parámetros de proceso y producto que influyen en el mismo, en este caso, Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio; donde se analiza la influencia directa de estos en la Calidad. El Spss permite el análisis del comportamiento de las variables para luego dar paso al estudio en el software Matlab donde se lleva a cabo un estudio similar. Este software arroja el comportamiento de las variables Titanio-Boro, Flujo de Argón, Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio, en función de la Calidad permitiendo así obtener la modelación matemática del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua en forma puntual. El software Matlab permite la simulación, puesto que este programa va conectado directamente al proceso, permitiéndole así al operador observar y controlar virtualmente estos parámetros.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**

Los resultados obtenidos permitirán hacer mejoras en la Calidad, disminuyendo los defectos y controlándolos antes de la culminación de la bobina, trayendo como beneficio reducción en pérdidas laborales, productivas y de materia prima.

La **Calidad** es evaluada en porcentaje, es decir, es medida tomando como referencia el peso total de la bobina lo cual equivale al 100% de la misma, durante el proceso de laminación aguas abajo es donde ocurre la aparición de defectos; cuando la lámina comienza a presentar defectos es retirado y pesado para luego ser restado al peso total de la bobina, representando a la Calidad el material total utilizable en forma porcentual. Para mayor comprensión se mostrará con un ejemplo:

Titanio. Boro (%)	Flujo de Argón (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura de caja (°C)	Corona de banda (mm)	Espesor promedio (mm)	Peso de la bobina (Kg)	Material descartado por Defectos (Kg)	Calidad (%)
0.023	0.9	700	0.05	5.72	7206	1800	75
0.032	0.9	700	0.06	5.73	7201	122	98
0.021	0.9	701	0.06	5.74	7268	1086	85
0.033	0.8	699	0.04	5.71	7302	450	94
0.014	0.8	702	0.05	5.70	7282	0	100
0.024	0.9	699	0.03	5.84	7178	150	98
0.031	0.9	700	0.06	5.82	7207	0	100
0.035	0.8	698	0.05	5.83	7155	899	87
0.024	0.8	696	0.05	5.82	7290	492	93
0.023	0.8	699	0.05	5.82	7176	0	100
0.034	0.8	699	0.05	5.91	7315	0	100
0.039	0.7	699	0.04	5.86	7472	446	94
0.028	0.7	699	0.05	5.85	7280	246	97
0.033	0.7	695	0.04	5.83	7222	845	88
0.028	0.9	701	0.04	5.84	7203	0	100
0.025	0.9	700	0.05	5.92	7213	1244	83
0.025	0.7	699	0.05	5.93	7341	0	100
0.043	0.7	701	0.04	5.69	7129	1542	78
0.042	0.8	700	0.05	5.69	7289	240	97
0.034	0.7	698	0.05	5.72	7358	150	98

**TABLA N°2.** Reporte de Producción y Proceso de La Máquina de Colada



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO METODOLÓGICO**

**CAPÍTULO III**

- Titanio-Boro = 0.023%
- Flujo de Argón = 0.9 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura de caja = 700°C
- Corona de banda = 0.05 mm
- Espesor promedio = 5.72 mm
- Peso total de la bobina = 7206 Kg
- Material descartado por defectos = 1800Kg

Si 7206 Kg ----- 100% Bobina  
 1800 Kg ----- X ..... X = 24.97%

Entonces: 100% - 24.97% = 75.03% ..... 75%

Los valores son redondeados hacia abajo ya que representan el total de material utilizable sin defectos (Calidad).

En este ejemplo la **Calidad** es representada por el 75% (material neto aprovechable); por lo tanto, el programa de simulación permitirá controlar los parámetros de proceso con la finalidad de obtener el 100% de **Calidad**, es decir, utilizar durante el proceso toda la bobina.

Para el estudio de este Trabajo Especial de Grado se han tomado las lecturas de 20 bobinas, provenientes de la colada continua de la empresa ALUCASA CVG, Planta Guacara.



# CAPÍTULO III

## 'MARCO METODOLÓGICO'



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

#### **II.1.- ANTECEDENTES**

ANTECEDENTE NRO.1: “Simulación del Moldeado para prever la formación de porosidades en pistones de aluminio usando redes neuronales”. Tesis de Pre- Grado. Autores: Alvaro Gómez y Carlos Triana. Universidad de Carabobo. Marzo de 1999. Entre sus objetivos se encuentran aplicar y desarrollar un programa de computación capaz de asistir el proceso de fundición del aluminio, y emitir una tendencia de formación de porosidades en el moldeado durante la solidificación. Se obtuvo como resultado un software con Matlab, al cual se introducen algunas condiciones del proceso de fabricación del pistón, y comparando dichas condiciones con una amplia base de datos. Se predice la situación final del pistón en cuanto a defectos. Además, se estableció que la formación de porosidades se reducía al aplicar una pintura térmica a los moldes para la fabricación del pistón.

ANTECEDENTE NRO.2: “Simulación del proceso de formación de porosidades en la solidificación de aleaciones de aluminio”. Tesis de Pre- Grado. Autor: Erika Gómez. Universidad de Carabobo. 2003. Entre sus objetivos se encuentra la modelación matemática del proceso de solidificación tomando como modelo geométrico un pistón de aluminio fabricado en Dana División Pistones, y la simulación, paso a paso, de la aparición de porosidades en el proceso de solidificación con el software seleccionado. Entre los resultados más importantes podemos encontrar que la simulación térmica, para obtener la temperatura inicial de estabilización, es paso indispensable para la simulación del proceso de solidificación, porque permite realizar la curva teórica. Además, se incluyó que una mayor velocidad de enfriamiento de la colada disminuye la concentración de gases que producen la formación de porosidades.



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

ANTECEDENTE NRO.3: “Verification of a Numerical of Macrosegregation in Direct Chill Casting”. Eurothem 82. Autores: Miha Zaloznik, Shile Xin y Bozidar Saler. Numerical Heat Transfer 2005. Gliwice- Cracow, Polonia. Septiembre 2005. Entre sus objetivos se encuentra verificar un modelo matemático que describa el comportamiento de las Macrosegregaciones en una colada de enfriamiento directo. Se obtuvo como resultado una excelente herramienta que resuelve coherentemente la convección térmica pertinente a los parámetros del número de Prandtl(Pr) y el número de Rayleigh(Rat) dentro del proceso de colada de enfriamiento directo.

### **II.2.- BASES TEÓRICAS.**

#### **II.2.1.- Historia:**

Tanto en Grecia como en Roma se empleaba el alumbre (del latín *alūmen*, -*ŭnis*, alumbre), una sal doble de aluminio y potasio como mordiente en tintorería y astringente en medicina, uso aún en vigor.

Generalmente se reconoce a Friedrich Wöhler el aislamiento del aluminio en 1827. Aún así, el metal fue obtenido, impuro, dos años antes por el físico y químico danés Hans Christian Ørsted. En 1807, Humphrey Davy propuso el nombre *aluminum* para este metal aún no descubierto, pero más tarde decidió cambiarlo por *aluminium* por coherencia con la mayoría de los nombres de elementos, que usan el sufijo *-ium*. De éste derivaron los nombres actuales en otros idiomas; no obstante, en los EE.UU. con el tiempo se popularizó el uso de la primera forma.

El proceso que se utiliza en la actualidad para la obtención del aluminio fue inventado por un joven estadounidense cuando todavía era un estudiante del Oberlin



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO TEÓRICO

## CAPÍTULO II

College. Una singular coincidencia hizo que Paul Héroult, de la misma edad que Hall, realizara el mismo descubrimiento, de modo independiente, en Francia y, aproximadamente, de forma simultánea. Como resultado del descubrimiento de Hall y Héroult, se hizo económicamente practicable, la producción de aluminio a gran escala, por primera vez. Ello posibilitó que el aluminio pasara a ser un metal común y familiar.

### II.2.2.- Características del aluminio:

#### II.2.2.1.- Características Físicas:

Entre las características físicas del aluminio se tienen las siguientes:

- Es un metal ligero, cuya densidad o peso específico es de 2700 kg/m<sup>3</sup>. (2,7 veces la densidad del agua).
- Tiene un punto de fusión bajo 660°C (933 K)
- El peso atómico del aluminio es de 26,9815
- Es de color blanco brillante.
- Buen conductor del calor y de la electricidad.
- Resistente a la corrosión.
- Material abundante en la Naturaleza
- Material fácil y barato de reciclar.

#### II.2.2.2.- Características Mecánicas:

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

- De fácil mecanizado.
- Muy maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Bastante dúctil, permite la fabricación de cables eléctricos.
- Material blando (Escala de Mohs 2-3). Límite de resistencia en tracción 160-200 N/mm<sup>2</sup> [160-200 MPa] en estado puro, en estado aleado el rango es de 1400-6000 N/mm<sup>2</sup>. El duraluminio es una aleación particularmente resistente.
- Material que forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.
- Permite la fabricación de piezas por fundición y moldeo.
- Material soldable.

#### **II.2.2.3.- Características Químicas:**

Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora, de color gris mate, puede ser ampliada por electrólisis en presencia de oxalatos.

- El aluminio tiene características anfóteras. Esto significa que se disuelve tanto en ácidos (formando sales de aluminio) como en bases fuertes (formando aluminatos con el anión [Al (OH)<sub>4</sub>]<sup>-</sup> liberando hidrógeno).
- La capa de óxido formada sobre el aluminio se puede disolver en ácido cítrico formando citrato de aluminio.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

- El principal y casi único estado de oxidación del aluminio es +III como es de esperar por sus tres electrones en la capa de valencia.

Las características químicas pueden apreciarse mejor a través de la Tabla N°1.

<p>Magnesio - <b>Aluminio</b> – Silicio</p> <p>Tabla completa</p>	
<b>General</b>	
Nombre, símbolo, número	Aluminio, Al, 13
Serie química	Metales del bloque <i>p</i>
Grupo, periodo, bloque	13, 3, p
<p>Plateado</p>	
<b>Propiedades atómicas</b>	
Masa atómica	26,9815386(8) uma
Radio medio <sup>†</sup>	125 pm
Radio atómico calculado	118 pm



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

Radio covalente	118 pm
Radio de Van der Waals	Sin datos
Configuración electrónica	[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Estados de oxidación (óxido)	3 (anfótero)
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
<b>Propiedades físicas</b>	
Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	933,47 K(660°C)
Punto de ebullición	2792 K
Entalpía de vaporización	293,4 kJ/mol
Entalpía de fusión	10,79 kJ/mol
Presión de vapor	2,42x10 <sup>-6</sup> Pa a 577 K
Velocidad del sonido	5100 m/s a 933 K
<b>Información diversa</b>	
Electronegatividad	1.61 (Pauling)
Calor específico	900 J/(kg·K)
Resistividad eléctrica a 20 °C	2,850/cm <sup>2</sup> /cm.
Conductividad eléctrica	37,7x10 <sup>6</sup> /m Ω
Módulo de elasticidad	6.700 kg/mm <sup>2</sup>
Tracción	de 16 a 20 kg/mm <sup>2</sup>
Conductividad térmica	237 W/(m·K)
Potenciales de ionización	



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

1° = 577,5 kJ/mol	6° = 18379 kJ/mol				
2° = 1816,7 kJ/mol	7° = 23326 kJ/mol				
3° = 2744,8 kJ/mol	8° = 27465 kJ/mol				
4° = 11577 kJ/mol	9° = 31853 kJ/mol				
5° = 14842 kJ/mol	10° = 38473 kJ/mol				
<b>Isótopos más estables</b>					
<b>iso.</b>	<b>AN (%)</b>	<b>Periodo de semidesintegración</b>	<b>MD</b>	<b>ED (MeV)</b>	<b>PD</b>
<sup>26</sup> Al	Sintético	7,17×10 <sup>5</sup> a	ε	4,004	<sup>26</sup> Mg
<sup>27</sup> Al	<b>100</b>	Al es estable con 14 neutrones			

Fuente: Ver referencia bibliográfica N°11.

**Tabla N°1.** Características del aluminio.

El aluminio es un óptimo conductor de calor y de electricidad, por ello y por su menor peso tiende a sustituir al cobre en la industria eléctrica. No siendo tóxico se utiliza en distintas aplicaciones industriales, es importantísimo en las industrias aeronáuticas y automovilísticas. Las sales de aluminio sirven para impermeabilizar las telas, inicialmente fue limitado a la confección de utensilios y carteres de motores, pero hoy e día es utilizado en gran parte de la vida diaria desde utensilios de cocina hasta las grandes aplicaciones industriales.

**II.2.3.- Moldeo por gravedad de las aleaciones de aluminio:**

**II.2.3.1.- La fusión del aluminio:**

Todos los metales y aleaciones exigen, para su fusión, procesos y materiales que correspondan a ciertas exigencias intrínsecas de sus propiedades específicas; el





## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

aluminio y sus aleaciones, aunque tienen temperaturas de fusión y colada inferiores a la de los metales con base hierro o base cobre, no están fuera de esta regla.

Un metal fundido de calidad debe tener una composición química comprendida en unas tolerancias bien definidas, y no debe ser alterado físicamente por las condiciones mismas de la fusión. Siendo las principales propiedades físicas del aluminio y de sus aleaciones en estado líquido “la facilidad de oxidación, la absorción de gases y la acción sobre el hierro”, los principios generales de la fusión conducirán naturalmente a obtener:

- 1.-Una composición correcta.
- 2.-Ausencia de óxido en el metal.
- 3.-Un contenido lo más escaso posible de gas.

Es muy importante añadir: la obtención de un grano fino.

#### **II.2.3.2.- La oxidación:**

En estado sólido la oxidación del aluminio es lenta y limitada; al contrario que los metales con base cobre y con base hierro, el aluminio no se oxida más sensiblemente en caliente que en frío mientras no se pase de los 500 a 600 °C. Por encima de los 600°C, la oxidación es más acusada, pero aún así limitada, aumenta para una temperatura dada, con el tiempo de permanencia a esa temperatura.

Además, contrariamente a lo que ocurre en el estado sólido, la oxidación en el estado líquido continúa, favorecida por la difusión a alta temperatura del oxígeno a través de



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### MARCO TEÓRICO

### CAPÍTULO II

la costra ya formada, lo que permite deducir una regla de la fusión: *“evitar una permanencia prolongada de la aleación a temperatura elevada”*.

Como la alúmina tiene una densidad, según a la temperatura a la cual se forme, claramente superior a la del aluminio fundido, aquella deberá descender normalmente al fondo del baño. Si esto es válido para ciertas escorias de dimensiones importantes, no ocurre lo mismo con las partículas de alúmina, a causa de las tensiones superficiales y también a causa de la consistencia porosa de las escorias, las cuales se impregnan de metal y tienen entonces una densidad aparentemente análoga a la del baño.

Estas partículas de alúmina situadas en el interior del baño, proviene de la superficie de los lingotes, mazarotes, etc., que constituyen la carga; igualmente, pueden provenir del arrastramiento, en masa del baño, de la partícula de alúmina de la superficie, cuando se realizan operaciones diversas: carga de lingotes, rableado, sacado del caldo, etc., de donde se extrae otra regla importante de fusión: *“evitar todos los movimientos inútiles en la superficie del baño”*.

Como las cargas están normalmente constituidas por metal nuevo y un cierto porcentaje de bebederos de coladas anteriores, es necesario tomar las precauciones necesarias para evitar el enriquecimiento del baño en óxidos y para asegurar una calidad de la aleación fundida, lavarla sistemáticamente por medio de fundentes desoxidantes.

En efecto una aleación oxidada presenta:

- Disminución en sus características mecánicas.



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### MARCO TEÓRICO

### CAPÍTULO II

➤ Alteraciones en sus propiedades tecnológicas:

1. Disminución de la colabilidad.
2. Tendencia creciente a la formación de grietas.
3. Mayor tendencia a las porosidades.

En razón de las posibilidades de la acumulación de escorias pesadas en el fondo del crisol, es posible enunciar una regla más: *“se debe evitar emplear en el molde, el metal de los fondos de los hornos o de las cucharas”*.

#### **II.2.3.3.- Reglas generales de la fusión:**

##### Temperatura:

- Fundir en un tiempo mínimo.
- Elevar la permanencia a elevadas temperaturas.

##### Humedad:

- Evitar toda traza de humedad (coque, refractarios, crisoles herramientas de fusión, etc.).
- Evitar el contacto de metal-gas de combustión. Para ello es preciso:
  1. Regular los quemadores con un ligero exceso de aire.
  2. Orientar o calibrar bien las llamas de los quemadores.
  3. Utilizar lingotes o materiales recuperables bien limpios (ni húmedos, ni oxidados, no grasientos).



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

4. Evitar todos los movimientos inútiles de la superficie del baño; quitar las escorias solamente cuando sea necesario.

#### Los fundentes:

Las diferentes aleaciones de aluminio son más o menos sensibles a las alteraciones durante la fusión, existen fundentes que permiten evitar estas alteraciones o remediar sus efectos.

Los fundentes constituidos por mezclas de sales apropiadas, se utilizan:

- Para proteger el baño del contacto del aire o de los gases de la combustión.
- Para facilitar la separación del baño de las escorias.
- Para eliminar las partículas infusibles (escorias) que están en suspensión en el baño, a veces son elementos perjudiciales.
- Para desgasificar el metal cuando esta contaminado por los gases.
- Para afinar la estructura macrográfica o micrográfica de las aleaciones.

#### **II.2.3.4.- Absorción de gases:**

En todos los metales o aleaciones, los gases pueden ser retenidos ya sea mecánicamente o químicamente. Considerando el caso del gas ocluido (mecánico), que es una de las causas de ciertos defectos en las piezas coladas. La solubilidad de los gases en los metales fundidos aumentan con la temperatura, y la cantidad de gas absorbido aumenta proporcionalmente con el tiempo, lo que permite enunciar dos reglas:



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

1. Se debe evitar el sobrecalentamiento.
2. La fundición se debe hacer en un tiempo mínimo.

En la práctica de la fusión de las aleaciones de aluminio, se puede decir que el hidrógeno y el metano son los mas temibles; en el momento de la solidificación, como la solubilidad de los gases disminuye con un descenso de la temperatura, éstos tienen tendencia a separarse y pueden encontrarse aprisionados en el interior de la masa si la separación no ha sido completa. Forman entonces en el interior de la pieza, burbujas que reciben el nombre de picaduras y, además, pueden a llegar a formar porosidades. Este efecto conduce a:

- Disminución de las características mecánicas.
- Mala estanqueidad.
- Mal aspecto de las partes fabricadas y, sobre todo, de las partes pulidas.

Se deben evitar al máximo todas las posibilidades de absorción de gas y mas particularmente de hidrogeno.

El hidrógeno puede encontrarse:

- En los gases producidos por la combustión o en la atmósfera misma del horno.
- En estado naciente el vapor de agua es reducido por el aluminio líquido, produciendo hidrógeno y oxígeno, lo que acelera más todavía la formación de alúmina.



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

Estas consideraciones conducen al anunciado de nuevas reglas de fusión y exigen, a los materiales de fusión, ciertas concepciones particulares en su construcción o en su modo de empleo.

Para reducir al mínimo los riesgos de absorción de gas por el metal, se debe:

- Evitar el sobrecalentamiento.
- Evitar toda humedad (coque, crisoles, refractarios, herramientas de fusión, metal, fundente, etc.).
- Evitar el contacto metal-gas de combustión.

La tendencia del caldo de aluminio a absorber gases se incrementan con el aumento de la temperatura. Absorbe principalmente hidrógeno como consecuencia de la descomposición del vapor de agua con el calor. El hidrógeno procede del combustible húmedo (gas de coque, aceite), de las paredes de los hornos y crisoles no suficientemente secos, de la humedad del aire o también de fundentes húmedos.

El vapor puede proceder incluso del mismo metal cuando este llega a humedecerse por haber quedado depositado a la intemperie, formándose en su superficie un depósito de óxidos que contienen agua. De todos modos, debe evitarse la utilización de desechos y de lingotes húmedos o manchados de aceite, también por el peligro de explosión que constituyen. El material ha de secarse o quemarse previamente.

La disolución del hidrógeno aumenta marcadamente con la temperatura a partir de los 700°C. Mientras está disuelto en el metal líquido no ocasiona problemas. Pero, cuando el metal se enfría en el molde para solidificar, el descenso de temperatura



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

hace que el hidrógeno escape en forma de pequeñas burbujas, que al ser atrapadas por la solidificación adquieren la forma de poros permanentes.

**II.2.4.- Defectos en la colada:**

Las principales causas son: la humedad, temperatura, presión y llenado y se pueden encontrar los siguientes tipos de defectos:

➤ Porosidad de gas:

Causas: se producen por el gas atrapado durante el proceso de colada.

Apariencia: son múltiples, diminutas y continuas manchas blancas de forma redondeada, de contornos suaves, dan al material una apariencia de granos o poros. Generalmente no son bien apreciadas en el monitor de fluoroscopia.

➤ Rechupes de cavidad:

Causas: son generadas por contracciones del metal, frecuentemente por una desigualdad de rata de enfriamiento, intersecciones de diferente espesor.

Apariencia: lucen con formas muy variadas, pero siempre se caracterizan por su irregularidad, algunas veces parecen las ramas de un árbol.

➤ Huecos de gas o sopladuras:



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

Causas: son generalmente causadas por la turbulencia en el llenado del metal, humedad en los refractarios o gases atrapados por el metal durante la solidificación.

Apariencia: son cavidades de forma globular, aparecen como manchas redondeadas en bordes suaves, se aglomeran en pequeños grupos en determinadas zonas de la fundición.

➤ Rechupes esponjosos:

Causas: es una discontinuidad causada por el encogimiento en una zona concentrada en el momento del moldeo, frecuentemente ocurren en las zonas más delgadas.

Apariencia: aparece como una porosidad muy densa o un aglomeramiento de puntos concentrados en un área específica, se asemeja en apariencia a una esponja marina.

➤ Porosidad por contracción de solidificación:

Causa: esto se origina por falta e insuficiencia de metal, por ejemplo si durante la solidificación de una pieza de aluminio el metal de la mazarota se solidifica antes que el de la pieza, esta no quedara concentrada y homogénea al no recibir todo el material para ello precisa entonces mostrando porosidades, lo cual se localiza preferiblemente en la zona que se enfría mas tarde.

Apariencia: este tipo de defecto aparece como una sombra en forma de tela de araña.

➤ Unión fría:





## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

Causas: ocurren cuando dos flujos de metal se encuentran y chocan y no se unen adecuadamente, se forma como resultado de un salpiqueo o de un llenado interrumpido.

#### ➤ Grietas:

Causas: es una discontinuidad producida por fractura del material, generalmente causada por inapropiado control del vaciado o durante el enfriamiento.

Apariencia: luce como una línea sin dirección fija como ramificaciones, en formas de ramas, pueden ser muy finas y delgadas.

#### ➤ Sopladuras:

Se presentan generalmente bajo la forma de cavidades abiertas o cerradas, debido al aire aprisionado en la colada o a los vapores desprendidos a través del metal líquido.

Se señalan dos clases de sopladuras: las que se producen cuando el metal es todavía fluido y aquellas que se forman cuando el metal se ha vuelto pastoso. Las primeras son cavidades normalmente cerradas, de paredes ligeramente rugosas, principalmente en las sopladuras importantes, ya que a existido pase de gases a través del metal hasta el final de la solidificación. Las segundas son lisas, muy a menudo abiertas y se explican por la resistencia del metal pastoso, que no permite a los gases atravesarlo, sino simplemente deformarlo.

#### ➤ Granos o puntos duros:



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO TEÓRICO

## CAPÍTULO II

Los granos o puntos duros son cristalinos, generalmente amontonados, que se encuentran lo mismo en la superficie de las piezas moldeadas, que en el interior del metal.

Algunos de ellos alcanzan dimensiones de varios milímetros, pero en general, son tan pequeños como para pasar inadvertidos en las primeras pasadas de su mecanizado.

Los granos duros, reunidos, aparecen bajo la forma de manchas grisáceas, cuyos elementos son más o menos oscuros. Al microscopio, aquellos se diferencian claramente y dejan entrever naturalezas muy diversas. Son generalmente grises, negros o brillantes y algunas veces blancos lechosos o incluso transparentes. (ver referencia bibliográfica N°11)

### **II.2.5.- Laminación:**

La solidificación se inicia cuando el metal fundido entra en contacto con los rodillos. El metal solidificado forma como un "frente frío" (Freeze front) del metal fundido dentro de los rodillos de laminación y este avanza en forma sólida hacia el "nip", que es el punto de separación mínima entre los rodillos. El metal sólido pasa a través del "nip" como una hoja sólida. La hoja sólida es deformada por los rodillos (Laminación en caliente) mientras es expulsada.

Las aleaciones de aluminio han sido con éxito laminadas en espesores de 1/4 in, a velocidades cercanas de 4-6 ft/min o de 50-70 lbs/h por pulgada del espesor de laminación (lbs/hr/in). Intentos de aumentar la velocidad de laminación normalmente



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

han fallado, debido a la segregación de la línea central. Aunque se acepta generalmente que la medida menor de la hoja laminada, (e.g. menor a 1/4 in de espesor) potencialmente se podría producir más rápidamente que la sección de mayor medida de la hoja laminada en una laminadora del rodillo, la capacidad de laminar el aluminio en escalas sobre las 70 lbs/hr/in ha sido significativamente rechazada.

La operación típica de una laminadora de rodillo para espesores finos se describe en la patente No. 5.518.064 de ESTADOS UNIDOS (Adjunto por referencia) y se representa en las figuras 1 y 2. Un metal fundido que lleva a cabo el compartimiento H está conectado con una extremidad T de la alimentación que distribuya el metal fundido M entre los rodillos de laminación R1 y R2, enfriados por agua, y que rotan en la dirección de las flechas A1, y A2, respectivamente. Los rodillos R1 y R2 tienen las superficies lisas, U1 y U2: cualquier aspereza sobre estos es parte de la técnica empleada durante su fabricación. Las líneas centrales de los rodillos R1 y R2 están en una vertical o un plano generalmente vertical L (e.g. hasta 15° sobre la vertical) tales que la tira S forma generalmente una trayectoria horizontal. Otras versiones de este método producen la tira (Hoja laminada) en una dirección verticalmente ascendente.

El espesor de la tira S, es determinada por el espesor de la extremidad T. El plano L pasa a través de una región de separación mínima entre los rodillos R1 y R2 designado, el nip N (punto de separación mínima entre los rodillos). Una región sólida existe entre la tira laminada S y el metal fundido M, e incluye una región mezclada liquido-sólida, fase X. Un frente frío F, se define entre la región X y la tira laminada S, como línea de la solidificación completa.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

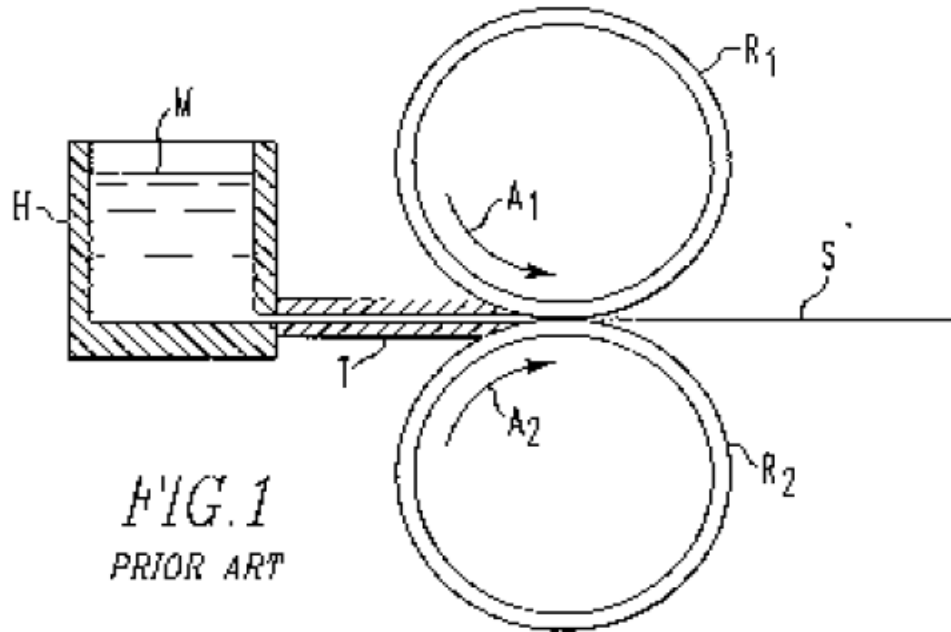


Fig. 1 Diagrama esquemático de una parte de un laminador con una extremidad para la entrega del metal fundido y de un par de rodillos.

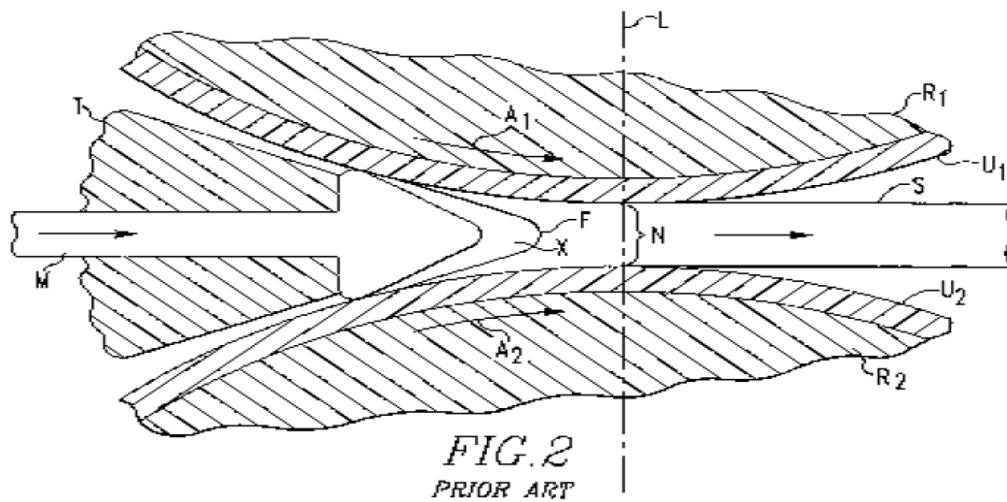


Fig. 2 Diagrama esquemático ampliado, seccionado transversalmente, de los rodillos, y la entrega del metal fundido demostrados en Fig. 1. Funciona según la fig.1



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

En la laminación convencional, el calor del metal fundido M se transfiere a los rodillos R1 y R2 tales que la localización del frente frío F se mantiene por encima del nip N. De este modo, el metal fundido M solidifica en un espesor mayor que la dimensión del nip N. La tira sólida laminada S es deformada por los rodillos R1 y R2 para alcanzar el espesor final. La laminación en caliente entre los rodillos R1 y R2 conforme a una laminación convencional, produce propiedades únicas en la tira característica de la aleación de aluminio. En detalle, una zona central con el espesor de la tira se enriquece en los elementos de formación eutécticos (formadores eutécticos) en la aleación tales como Fe, Si, Ni, Zn y similares y se agota en los elementos de formación peritética (Ti, Cr, V y Zr). Este enriquecimiento de los formadores eutécticos (es decir elementos de aleación con excepción del Ti, Cr, V, Zr) en la zona central ocurre porque esa porción de la tira S corresponde a una región del frente frío F donde la solidificación ocurre por último y se conoce como "segregación de la línea central". La segregación extensa de la línea central en la tira es un factor que restringe la velocidad de las laminadoras rodillo. La tira también muestra señales del trabajo realizado por los rodillos. Los granos que se forman durante la solidificación del metal por encima, o después del nip, son aplanados por los rodillos de laminación. Por lo tanto, en la laminación del aluminio encontramos granos con estructura multiaxial (non-equiaxed).

La abertura de los rodillos, en el nip N, se puede reducir para producir una tira más fina S. Sin embargo, a medida que se reduce la abertura de estos, aumenta la fuerza generada entre los rodillos R1 y R2. La cantidad fuerza de separación de los rodillos, es afectada por la localización del frente frío F en relación al nip N de la laminadora. A medida que se reduce la abertura de los rodillos, el porcentaje de reducción de la hoja de metal se aumenta, y la fuerza que separa los rodillos aumenta. En cierto punto, las posiciones relativas de los rodillos R1 y R2 no pueden superar la fuerza



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

que los separa, para alcanzar la abertura deseada entre ellos, y el espesor mínimo que se alcanza para esa posición, es la del frente frío F.

La fuerza que separa los rodillos puede ser reducida aumentando la velocidad de estos para mover el frente frío F, río abajo hacia el nip N. Cuando el frente frío se mueve río abajo (hacia el nip N), la abertura de los rodillos puede ser reducida. Este movimiento del frente frío F disminuye el cociente entre el espesor de la tira en el punto inicial de la solidificación y la abertura de los rodillos en el nip N, disminuyendo así la fuerza que separa los rodillos, mientras que el metal solidificado se está comprimiendo y laminándose en caliente. De este modo, como la posición del frente frío F es hacia el nip N, una cantidad proporcional mayor de metal se solidifica y lámina en caliente en medidas más finas. Según prácticas convencionales, la laminación de la tira, es lograda por el primer rodillo, disminuyendo la medida hasta que se alcanza una fuerza de máxima separación, avanzando el frente frío hacia la menor fuerza de separación (aumentando la velocidad del rodillo) y disminuyendo la medida hasta que la máxima fuerza que separa los rodillos se alcanza otra vez, repitiendo así el proceso de avanzar el frente frío y de disminuir la medida de una manera iterativa hasta que se alcanza la medida fina deseada. Por ejemplo, una tira S de 10 mm puede ser laminada y el espesor se puede reducir hasta que la fuerza que separa los rodillos llega a ser excesiva (e.g. 6 mm) haciendo necesario un aumento de la velocidad del rodillo.

Este proceso de aumentar la velocidad del rodillo puede ser practicado solamente hasta que el frente frío F alcanza una posición en sentido descendente predeterminado. La práctica convencional indica que el avance del frente frío F no adelante en el nip N de los rodillos para asegurarse de que la tira sólida sea laminada en el nip N. Se ha aceptado que el laminado de una tira sólida en el nip N es necesario



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

para prevenir fallas del material laminado en caliente y proporcionar suficiente fuerza extensible en la tira S que sale para soportar la fuerza de halado en sentido descendiente de una devanadora, rodillos de halado o similares. Por lo tanto, la fuerza que separa los rodillos de una laminadora convencional, en la cual una tira sólida de aleación de aluminio laminada en caliente, es guiada a través del nip N, está en el orden de varias toneladas por pulgada del espesor. Aunque una cierta reducción en la medición es posible, la operación de los rodillos a fuerzas tan altas para asegurar la deformación de la tira en la sección N, es muy difícil. La velocidad de una laminadora de rodillo es restringida por la necesidad de mantener el frente frío F aguas arriba del nip N y prevenir la segregación de la línea central. Por lo tanto, la velocidad laminación para las aleaciones de aluminio ha sido relativamente baja.

Una cierta reducción en la fuerza que separa los rodillos para obtener micro estructura aceptable en las aleaciones que tienen alto contenido de elementos de aleación se describe en la patente No. 6.193.818 de los EE.UU... Las aleaciones que tienen 0.5 a 13 % peso de silicio, son laminadas en tiras de 0.05 a 0.2 in de espesor y con fuerzas que separan los rodillos de 5000 a 40.000 lbs/in, a velocidades de 5 a 9 ft/min. Mientras que esto representa un avance en la reducción de la fuerza que separa los rodillos, estas fuerzas todavía plantean desafíos de proceso significativos. Por otra parte, la productividad sigue comprometida y las tiras producidas según la patente 818 exhibe al parecer cierta segregación de la línea central y alargamiento del grano según lo demostrado en fig. 3.

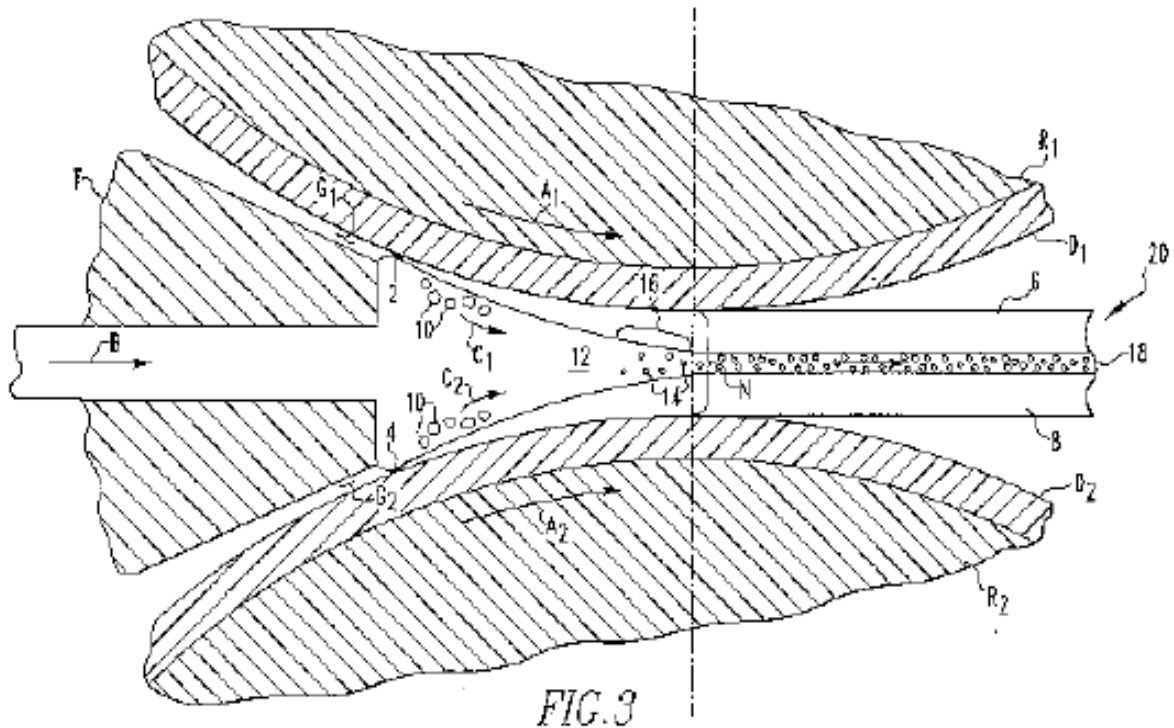


Fig. 3 Diagrama esquemático ampliado seccionado transversalmente, de los rodillos, y la entrega del metal fundido demostrados en fig. 1. Funciona según la fig. 1

Un impedimento importante a la laminación de alta velocidad es la dificultad en la realización de traspaso térmico uniforme del metal fundido a las superficies lisas U1 y U2. En la actualidad, las superficies U1 y U2 incluyen varias imperfecciones que alteran las características del traspaso térmico de los rodillos. A las altas velocidades de laminación, esa no uniformidad en el traspaso térmico llega a ser problemático. Por ejemplo, las áreas de las superficies U1 y U2 con traspaso térmico apropiado refrescarán el metal fundido M en el lugar deseado aguas arriba del el nip





## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

N, mientras que las áreas con las características escasas de traspaso térmico permitirán el avance más allá de la localización deseada en el metal fundido y crearán una no uniformidad en la tira laminada.

La velocidad lineal a la cual se produce la tira sólida es más alta que la rata lineal en la cual la aleación de aluminio fundida se entrega a los rodillos, tanto como cuatro veces más arriba que el índice lineal de la aleación de aluminio fundida. Los rodillos se disponen para finalizar la tira en una configuración generalmente horizontal y pueden ser texturizados con irregularidades superficiales (e.g. surcos, hoyuelos o nudos) cerca de 5 a 50 micrones de alto y espaciados de 20 a 120 in para mejorar el traspaso térmico. La fuerza que separa los rodillos es de 25 hasta 300 lbs/in de espesor y puede ser cerca de 25 a 200 lbs/in de espesor o cerca de 100 lbs/in de espesor. La tira sólida se puede producir en espesores de 0.07 a 0.25 in o de 0.08 a 0.095 in. Los rodillos internamente se refrescan y las superficies de contacto se pueden oxidar antes de su uso y proporcionar una capa continua y uniforme de óxido sobre ellas. Los rodillos son cepillados periódicamente o se les debe quitar continuamente desechos que se puedan depositar durante el laminado. Orillas fijas en el borde y orillas electromagnéticas se pueden utilizar para prevenir escapes de metal fundido en los bordes.

La colada continua de las aleaciones de aluminio según esta investigación es alcanzada inicialmente seleccionando la dimensión deseada del nip N que corresponde a la dimensión deseada de la tira S. La velocidad de los rodillos R1 y R2 se aumenta a una rata deseada de producción o a una velocidad que es menor que la fuerza que separa los rodillos que garantice el balanceo que ocurre entre los rodillos R1 y R2. El laminar a 25 a 400 pies por minuto solidifica la tira de la aleación de



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

aluminio 1000 veces más rápidamente que la aleación de aluminio laminada como lingote y mejora las características de las aleaciones de aluminio. (ver referencia bibliográfica N°5)

#### **II.2.6.- MATLAB:**

##### **II.2.6.1.- Matlab:**

Es un programa de cálculo numérico, orientado a matrices y vectores. Por tanto desde el principio hay que pensar que todo lo que se pretenda hacer con el, será mucho más rápido y efectivo si se piensa en términos de matrices y vectores. (ver referencia bibliográfica N°6)

##### **II.2.6.2.- Características Dominantes:**

- Bibliotecas extensas y extensibles de bloques predefinidos.
- Redactor gráfico interactivo para montar y manejar diagramas de bloque intuitivos.
- La capacidad de manejar diseños del complejo dividiendo en segmentos modela en jerarquías de los componentes del diseño.
- El explorador modelo a navegar, crea, configura, y busca todas las señales, parámetros, y características de tu modelo.
- Capacidad de interconectar con otros programas de la simulación y de incorporar código manuscrito, incluyendo algoritmos de MATLAB.
- Opción para funcionar simulaciones fijas o del variable-paso de sistemas tiempo-que varían recíprocamente o con la simulación de la hornada.



## Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.

### MARCO TEÓRICO

### CAPÍTULO II

- Funciones para recíprocamente definir entradas y ver salidas para evaluar el comportamiento modelo.
- Depuración gráfica para examinar resultados de la simulación y para diagnosticar comportamiento inesperado en tu diseño.
- De total acceso a MATLAB para analizar y datos que visualizan, interfaces utilizador gráficos que se convierten, y crear los datos y los parámetros modelo.
- Herramientas modelo del análisis y del diagnóstico para asegurar la consistencia modelo y para identificar modelar errores.

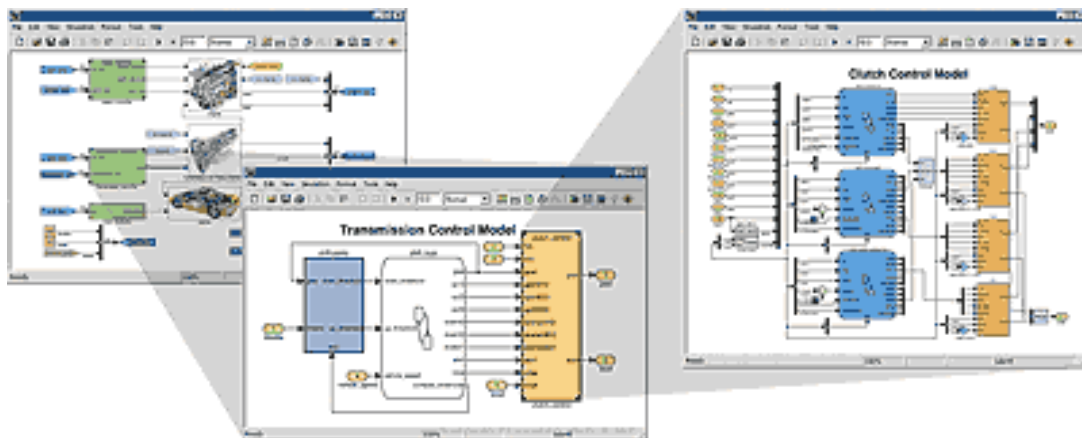


FIG.4 Programa Matlab.

#### II.2.7.- Estadística:

##### II.2.7.1.- Estadística:

Se ocupa de los métodos y procedimientos para recoger, clasificar, resumir, hallar regularidades y analizar los *datos*, siempre y cuando la variabilidad e *incertidumbre*



## Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.

### MARCO TEÓRICO

### CAPÍTULO II

sea una causa intrínseca de los mismos; así como de realizar *inferencias* a partir de ellos, con la finalidad de ayudar a la toma de *decisiones* y en su caso formular *predicciones*.

#### II.2.7.2.- Tipos de estadística:

- Descriptiva: Es la técnica que se va a encargar de la recopilación, presentación, tratamiento y análisis de los datos, con el objeto de resumir, describir las características de un conjunto de datos y por lo general toman forma de tablas y gráficas.
- Inferencia Estadística: Técnica mediante la cual se sacan conclusiones o generalizaciones acerca de parámetros de una población basándose en el estadígrafo o estadígrafos de una muestra de población.

#### II.2.7.3.- Análisis de regresión:

En un Análisis de Regresión simple existe una variable respuesta o dependiente ( $y$ ) que puede ser el número de especies, la abundancia o la presencia-ausencia de una sola especie y una variable explicativa o independiente ( $x$ ). El propósito es obtener una función sencilla de la variable explicativa, que sea capaz de describir lo más ajustadamente posible la variación de la variable dependiente. Como los valores

observados de la variable dependiente difieren generalmente de los que predice la función, ésta posee un error. La función más eficaz es aquella que describe la variable dependiente con el menor error posible o, dicho en otras palabras, con la menor diferencia entre los valores observados y predichos. La diferencia entre los valores observados y predichos (el error de la función) se denomina variación residual o



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **MARCO TEÓRICO**

### **CAPÍTULO II**

residuos. Para estimar los parámetros de la función se utiliza el ajuste por mínimos cuadrados. Es decir, se trata de encontrar la función en la cual la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y esperados sea menor. Sin embargo, con este tipo de estrategia es necesario que los residuos o errores estén distribuidos normalmente y que varíen de modo similar a lo largo de todo el rango de valores de la variable dependiente. Estas suposiciones pueden comprobarse examinando la distribución de los residuos y su relación con la variable dependiente.

En términos generales se puede decir que el análisis de regresión está relacionado con el estudio de la dependencia de una variable, la variable dependiente, de una o más variables adicionales, las variables explicativas con la perspectiva de estimar y/o predecir el valor (poblacional) medio o promedio de la primera en términos de valores conocidos o fijos de las segundas.

#### **II.2.7.4.- Análisis de varianza:**

Las técnicas englobadas bajo la denominación de análisis de la varianza o abreviadamente ANOVA (del inglés analysis of variance) han jugado un papel crucial en la metodología estadística moderna, desde que fueran ideadas por R.A. Fisher en 1925, y como sucede en tantas ocasiones, aunque conocidas por la gran mayoría, quizás no son adecuadamente comprendidas por los no especialistas.

Casi siempre se introduce el tema del análisis de la varianza como respuesta a la necesidad de utilizar una técnica de comparación de más de dos grupos, es decir como un método para comparar más de dos tratamientos: si disponemos de medidas cuantitativas continuas, que se puede suponer como procedentes de una distribución de probabilidad normal, y queremos comparar dos grupos -dos tratamientos-, la prueba estadística que se utiliza es un contraste de medias basado en la t de Student, y



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

cuando se dispone de más de dos grupos, la prueba a emplear es el análisis de la varianza.

Supónganse  $k$  muestras aleatorias independientes, de tamaño  $n$ , extraídas de una única población normal. A partir de ellas existen dos maneras independientes  $\sigma$  de estimar la varianza de la población:

1) Una llamada varianza dentro de los grupos (ya que sólo contribuye a ella la varianza dentro de las muestras), o varianza de error, o cuadrados medios del error, y habitualmente representada por MSE (Mean Square Error) o MSW (Mean Square Within) que se calcula como la media de las  $k$  varianzas muestrales (cada  $\sigma$  varianza muestral es un estimador centrado de  $\sigma^2$  y la media de  $k$  estimadores centrados es también un estimador centrado y más eficiente que todos ellos). MSE es un cociente: al numerador se le llama suma de cuadrados del error y se representa por SSE y al denominador grados de libertad por ser los términos independientes de la suma de cuadrados.

2) Otra llamada varianza entre grupos (sólo contribuye a ella la varianza entre las distintas muestras), o varianza de los tratamientos, o cuadrados medios de los tratamientos y representada por MSA o MSB (Mean Square Between). Se calcula a partir de la varianza de las medias muestrales y es también un cociente; al numerador se le llama suma de cuadrados de los tratamientos (se le representa por SSA) y al denominador  $(k-1)$  grados de libertad.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO TEÓRICO

## CAPÍTULO II

MSA y MSE, estiman la varianza poblacional en la hipótesis de que las  $k$  muestras provengan de la misma población. La distribución muestral del cociente de dos estimaciones independientes de la varianza de una población normal es una  $F$  con los grados de libertad correspondientes al numerador y denominador respectivamente, por lo tanto se puede contrastar dicha hipótesis usando esa distribución.

Si en base a este contraste se rechaza la hipótesis de que MSE y MSA estimen la misma varianza, se puede rechazar la hipótesis de que las  $k$  medias provengan de una misma población.

Aceptando que las muestras provengan de poblaciones con la misma varianza, este rechazo implica que las medias poblacionales son distintas, de modo que con un único contraste se contrasta la igualdad de  $k$  medias. Existe una tercera manera de estimar la varianza de la población, aunque no es independiente de las anteriores. Si se consideran las  $kn$  observaciones como una única muestra, su varianza muestral se suele representar por MST, se le denomina varianza total o cuadrados medios totales, es también un cociente y al numerador se le llama suma de cuadrados total y se representa por SST, y el denominador  $(kn - 1)$  grados de libertad. (ver referencia bibliográfica N°8 y N°9)

### II.2.8.- Sistema de programación y análisis estadístico (Spss):

#### II.2.8.1.- Spss:



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## MARCO TEÓRICO

## CAPÍTULO II

Es un programa estadístico informático muy usado en las ciencias sociales y las empresas de investigación de mercado. Originalmente SPSS fue creado como el acrónimo de *Statistical Package for the Social Sciences*. En la actualidad, la sigla se usa tanto para designar el programa estadístico como la empresa que lo produce.

### II.2.8.2.- Historia:

Fue creado en 1968 por Norman H. Nie, C. Hadlai (Tex) Hull y Dale H. Bent. Entre 1969 y 1975 la Universidad de Chicago por medio de su National Opinión Research Center estuvo a cargo del desarrollo, distribución y venta del programa. A partir de 1975 corresponde a SPSS Inc.

Originalmente el programa fue creado para grandes computadores. En 1970 se publica el primer manual de usuario del SPSS por Nie y Hall. Este manual populariza el programa entre las instituciones de educación superior en EE. UU. En 1984 sale la primera versión para computadores personales.

Como programa estadístico es muy popular su uso debido a la capacidad de trabajar con bases de datos de gran tamaño. Además, permite la recodificación de las variables y registros según las necesidades del usuario. El programa consiste en un módulo base y módulos anexos que se han ido actualizando constantemente con nuevos procedimientos estadísticos.

Actualmente, compete no solo con softwares licenciados como lo son SAS, MatLab o Statgraphics, sino también con software de código abierto y libre, de los cuales el más destacado es el Lenguaje R. **R** es un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico.





### **II.2.8.3.- Módulos del Spss:**

El sistema de módulos de SPSS, como los de otros programas (similar al de algunos lenguajes de programación) provee toda una serie de capacidades adicionales a las existentes en el sistema base. Algunos de los módulos disponibles son:

- Modelos de Regresión
  
- Modelos Avanzados
  - Reducción de datos: Permite crear variables sintéticas a partir de variables colineales por medio del Análisis Factorial.
  - Clasificación: Permite realizar agrupaciones de observaciones o de variables (*cluster analysis*) mediante tres algoritmos distintos.
  - Pruebas no paramétricas: Permite realizar distintas pruebas estadísticas especializadas en distribuciones no normales.
  
- Tablas: Permite al usuario dar un formato especial a las salidas de los datos para su uso posterior. Existe una cierta tendencia dentro de los usuarios y de los desarrolladores del software por dejar de lado el sistema original de TABLES para hacer uso más extensivo de las llamadas CUSTOM TABLES.
  
- Tendencias



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**MARCO TEÓRICO**

**CAPÍTULO II**

- Categorías: Permite realizar análisis multivariados de variables normalmente categorías. También se pueden usar variables métricas siempre que se realice el proceso de recodificación adecuado de las mismas.
- Análisis Conjunto: Permite realizar el análisis de datos recogidos para este tipo específico de pruebas estadísticas.
- Mapas: Permite la representación geográfica de la información contenida en un fichero.
- Pruebas Exactas: permite realizar pruebas estadísticas en muestras pequeñas.
- Análisis de Valores Perdidos: Regresión simple basada en imputaciones sobre los valores ausentes.
- Muestras Complejas: permite trabajar para la creación de muestras estratificadas, por conglomerados u otros tipos de muestras.
- SamplePower (cálculo de tamaños muestrales)
- Árboles de Clasificación: Permite formular árboles de clasificación y/o decisión con lo cual se puede identificar la conformación de grupos y predecir la conducta de sus miembros.

**CAPÍTULO IV**  
**"RESULTADOS Y ANÁLISIS**  
**DE RESULTADOS"**



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

**IV.1.- RESULTADOS.**

Primeramente, antes de comenzar a generar resultados se tuvo que buscar datos estadísticos en ALUCASA CVG. Con la finalidad de generar una ecuación del comportamiento del aluminio. Los datos facilitados por la empresa fueron:

Titanio. Boro (%)	Flujo de Argón (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura de caja (°C)	Corona de banda (mm)	Espesor promedio (mm)	Peso de la bobina (Kg)	Material descartado por Defectos (Kg)	Calidad (%)
0.023	0.9	700	0.05	5.72	7206	1800	75
0.032	0.9	700	0.06	5.73	7201	122	98
0.021	0.9	701	0.06	5.74	7268	1086	85
0.033	0.8	699	0.04	5.71	7302	450	94
0.014	0.8	702	0.05	5.70	7282	0	100
0.024	0.9	699	0.03	5.84	7178	150	98
0.031	0.9	700	0.06	5.82	7207	0	100
0.035	0.8	698	0.05	5.83	7155	899	87
0.024	0.8	696	0.05	5.82	7290	492	93
0.023	0.8	699	0.05	5.82	7176	0	100
0.034	0.8	699	0.05	5.91	7315	0	100
0.039	0.7	699	0.04	5.86	7472	446	94
0.028	0.7	699	0.05	5.85	7280	246	97
0.033	0.7	695	0.04	5.83	7222	845	88
0.028	0.9	701	0.04	5.84	7203	0	100
0.025	0.9	700	0.05	5.92	7213	1244	83
0.025	0.7	699	0.05	5.93	7341	0	100
0.043	0.7	701	0.04	5.69	7129	1542	78
0.042	0.8	700	0.05	5.69	7289	240	97
0.034	0.7	698	0.05	5.72	7358	150	98

**Tabla N° 3.** Reporte de Producción y Proceso de la Máquina de Colada.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

**IV.1.1.- Software Spss:**

Inicialmente se hace uso del Software Spss, con la finalidad de observar la influencia de las variables: Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de caja, Corona de banda y Espesor promedio; en función de la Calidad. Esto, para analizar el comportamiento de las variables antes de iniciar en el uso del software Matlab. Este procedimiento será mostrado gráficamente para mayor comprensión del mismo.

	temperatura	titanio_bromo	flujo_argon	corona	espesor	calidad	var	var
1	700	,023	,9	,05	5,72	75		
2	700	,032	,9	,06	5,73	98		
3	701	,021	,9	,06	5,74	85		
4	699	,033	,8	,04	5,71	93		
5	702	,014	,8	,05	5,70	100		
6	699	,024	,9	,03	5,84	97		
7	700	,031	,9	,06	5,82	100		
8	698	,035	,8	,05	5,83	87		
9	696	,024	,8	,05	5,82	93		
10	699	,023	,8	,05	5,82	100		
11	699	,034	,8	,05	5,91	100		
12	699	,039	,7	,04	5,86	94		
13	699	,028	,7	,05	5,85	96		
14	695	,033	,7	,04	5,83	88		
15	701	,028	,9	,04	5,84	100		
16	700	,025	,9	,05	5,92	82		
17	699	,025	,7	,05	5,93	100		
18	701	,043	,7	,04	5,69	78		
19	700	,042	,8	,05	5,69	96		
20	698	,034	,7	,05	5,72	97		

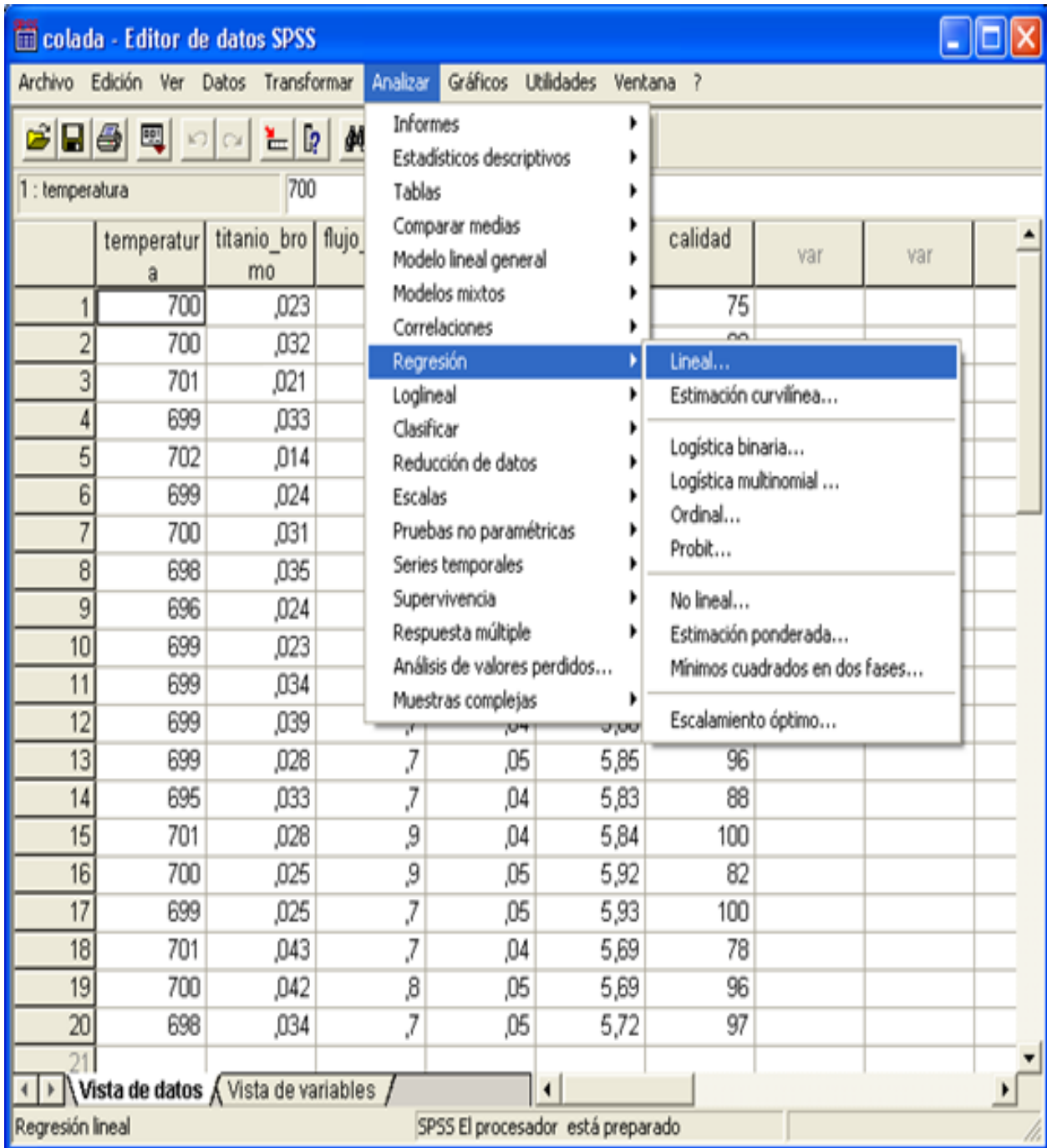
**FIG.7** Introducción de la matriz en el software.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



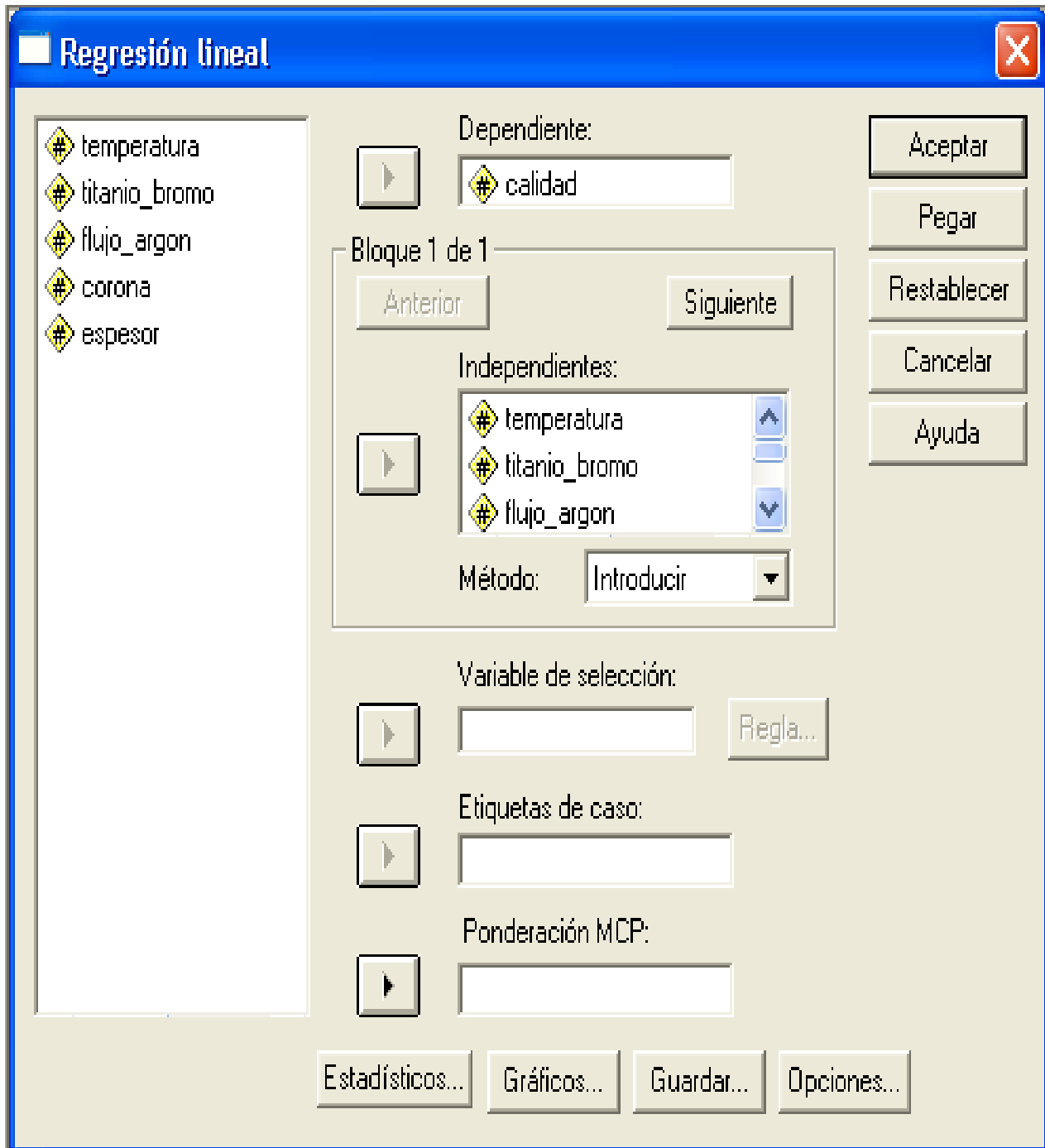
**FIG.8** Solicitud de ejecución en el software.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



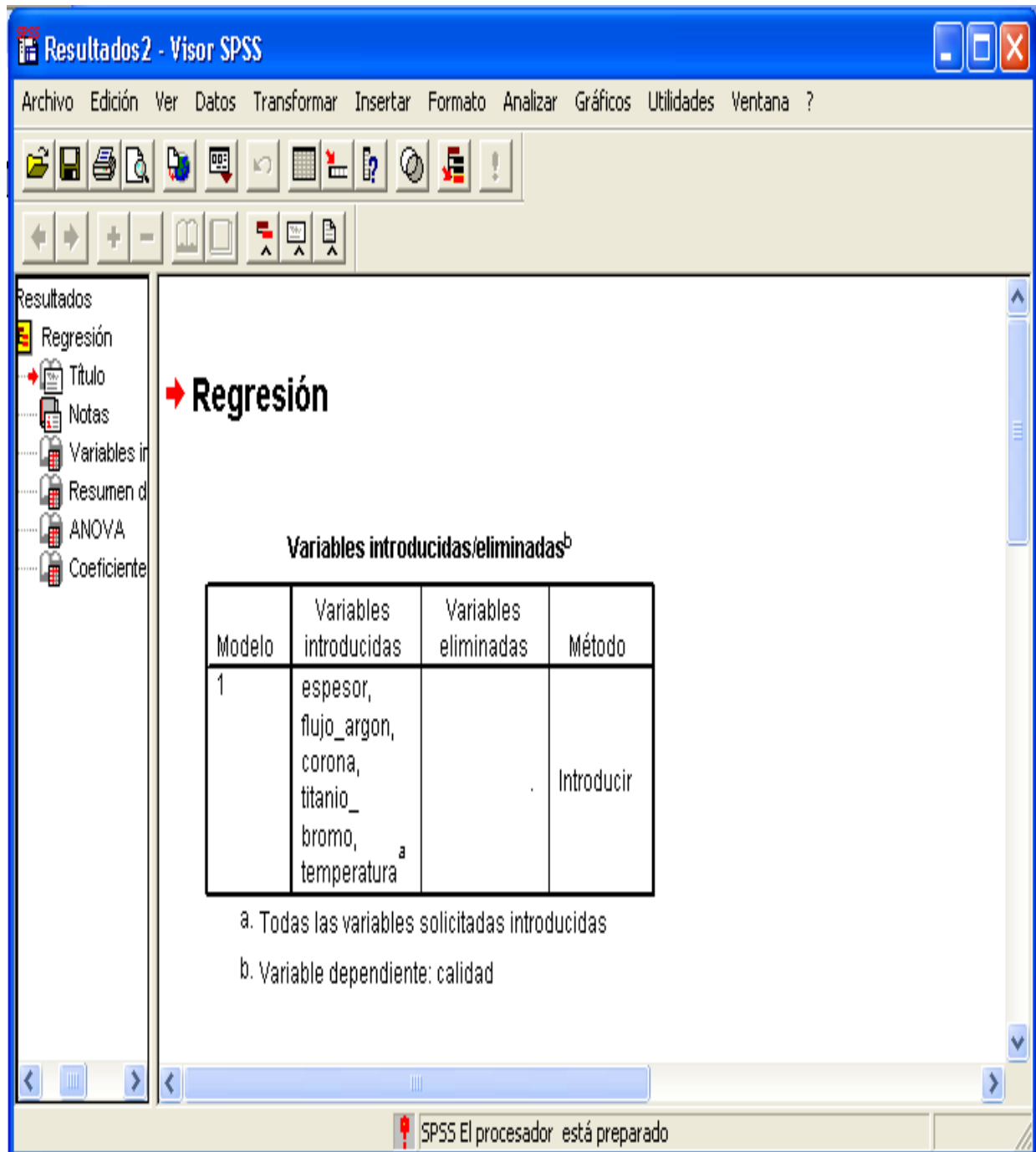
**FIG.9** Llenado de la casilla de regresión múltiple.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



**FIG.10** Resultados del software.

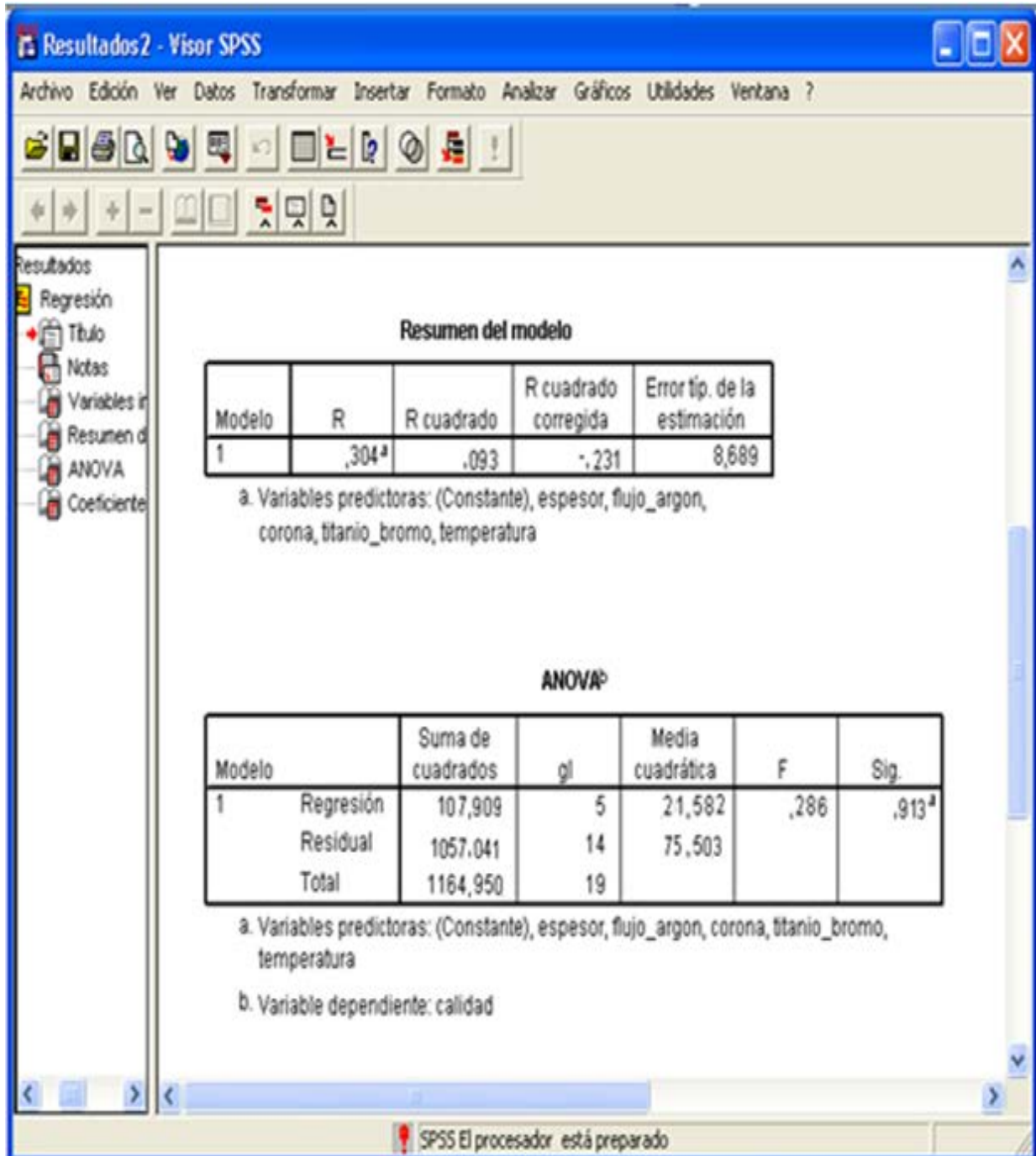




*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



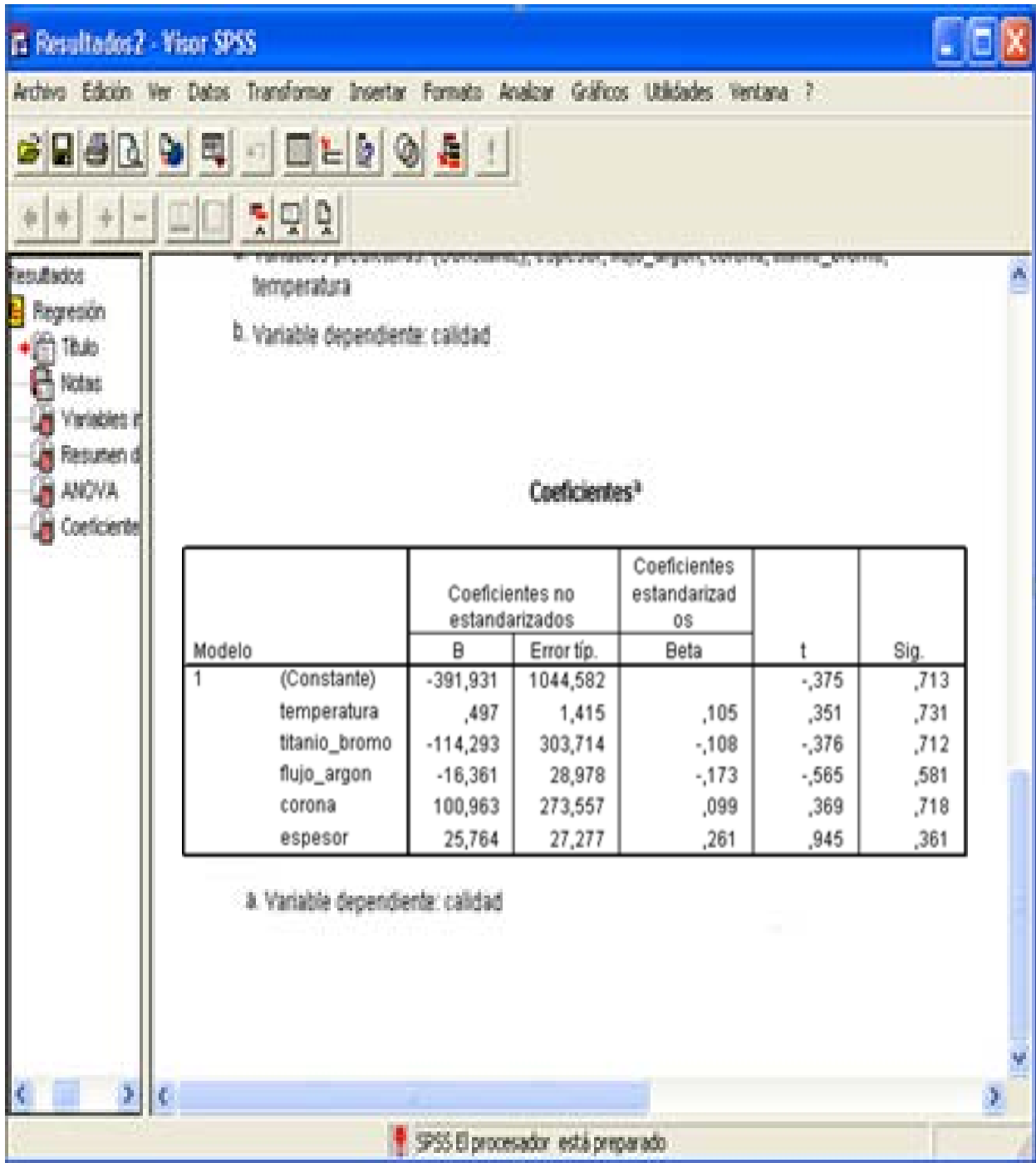
**FIG.11** Resultados del software.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



**FIG.12** Resultados del software.



## Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### CAPÍTULO IV

#### IV.1.2.- Software Matlab:

Después de haber analizado los resultados con el software Spss, se da inicio a la utilización del software Matlab para proceder a la introducción del código en el lenguaje propio del mismo.

```
1 - clc
2 - titanio_boro = [0.023 0.032 0.021 0.033 0.014 0.024 0.031 0.035 0.024 0.023 0.034 0.039 0.028 0.033 0.028 0.025 0.025 0.043 0.042 0.034]';
3 - flujo_argon = [0.9 0.9 0.9 0.8 0.8 0.9 0.9 0.8 0.8 0.8 0.8 0.7 0.7 0.7 0.9 0.9 0.7 0.7 0.8 0.7]';
4 - temp = [700 700 701 699 702 699 700 698 696 699 699 699 699 695 701 700 699 701 700 698]';
5 - corona=[0.05 0.06 0.06 0.04 0.05 0.03 0.06 0.05 0.05 0.05 0.05 0.04 0.05 0.04 0.04 0.05 0.05 0.04 0.05 0.05]';
6 - espesor=[5.72 5.73 5.74 5.71 5.70 5.84 5.82 5.83 5.82 5.82 5.91 5.86 5.85 5.83 5.84 5.92 5.93 5.69 5.69 5.72]';
7
8 - calidad = [75 98 85 93 100 97 100 87 93 100 100 94 96 88 100 82 100 78 96 97 ]';
9 - m=6; % variables input
10 - X = [ones(size(titanio_boro)) titanio_boro flujo_argon temp corona espesor];
11 - a = X\calidad; % matriz coeficientes
12 - Y = X*a;
13 - [b,bint,r,rint,stats]=regress(calidad,X,0.05);
14 - sig=stats(3);
15 - MaxErr = max(abs(Y - calidad));
16
17     %lnova
18 - n=length(titanio_boro);
19 - suma1=0;
20 - suma2=0;
21 - for i=1:n
22     yest=a(1)+a(2)*titanio_boro(i)+a(3)*flujo_argon(i)+a(4)*temp(i)+a(5)*corona(i)+a(6)*espesor(i);
23     suma1=(calidad(i)-yest)^2+suma1;
24     suma2=(yest-mean(calidad))^2+suma2;
```

FIG.13 Código en el software Matlab.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

```
24 - suma2=(yest-mean(calidad))^2+suma2;
25 - end
26 - SCE=suma1;
27 - SCR=suma2;
28 - STC=SCE+SCR;
29 - CMR=SCR/(m-1);
30 - CME=SCE/(n-m);
31 - F=CMR/CME;
32 - R=sqrt(1-SCE/STC);
33
34
35
36 - m=0;
37 - while m<=5
38 -     fprintf('\n\n\n\n\n')
39 -     fprintf('                COLADA DEL ALUMINIO                ')
40 -     disp('')
41 -     disp('                Hiperplano de regresión (Ecuación) | 1')
42 -     disp('                Anova                                | 2')
43 -     disp('                Gráfica Residuos                    | 3')
44 -     disp('                Pronóstico calidad                  | 4')
45 -     disp('                Intervalo de confianza coeficientes | 5')
46 -     disp('                Salir ( número > 5 )                | ')
47
```

**FIG.14** Continuación del código en el software Matlab.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

```
Editor - C:\Users\Maria Elda\Desktop\Aluminio.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
- 1.0 + ÷ 1.1 x % % % %
47
48 - m=input('\n\n\n          introducir opción ');
49
50
51 - switch m
52 -     case 1
53 -         clc
54 -         fprintf('\n Hiperlano de regresión')
55 -         fprintf('\n Y = %g + %g*titanio_boro + %g*flujo_argon + %g*temp + %g*corona + %g*espesor\n',a(1),a(2),a(3),a(4),a(5),a(6))
56 -         pause;
57
58 -     case 2
59 -         clc
60 -         disp('          Estadística de Regresión          ')
61 -         fprintf('\n Coeficiente de correlación múltiple %g',R)
62 -         fprintf('\n Coeficiente de Determinación %g',R*R)
63 -         fprintf('\n Observaciones %g\n',n)
64
65 -         fprintf('\n Análisis de la Varianza ')
66 -         fprintf('\n          gl  S Cuadrados  Medias Cuadrados  F          p ')
67 -         fprintf('\n Regresión %g %g %g %g %g',m-1,SCE,CMR,F,sig)
68 -         fprintf('\n Residuo %g %g %g',n-m,SCR,CME)
69 -         fprintf('\n Total %g %g %g',n-1,SCR+CME)
70 -         pause;
Aluminio1.m x Aluminio.m x
script Ln 60 Col 61 OVR
```

**FIG.15** Continuación del código en el software Matlab.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

```
70 -     pause;
71
72 -     case 3
73 -         clc
74 -         rcofplot(r,rint)
75 -         pause;
76 -     case 4
77 -         clc
78 -         q(1)=input('introducir valor de titanio_boro ');
79 -         q(2)=input('introducir valor de flujo_argon ');
80 -         q(3)=input('introducir valor de temp ');
81 -         q(4)=input('introducir valor de corona ');
82 -         q(5)=input('introducir valor de espesor ');
83
84 -         calidad_pronostico=a(1)+a(2)*q(1)+a(3)*q(2)+a(4)*q(3)+a(5)*q(4)+a(6)*q(5);
85 -         fprintf('\n ')
86 -         disp('Pronóstico de la calidad ')
87 -         disp(calidad_pronostico)
88 -         pause;
89 -     case 5
90 -         clc
91 -         disp(' Intervalos de Confianza para coeficientes ')
92 -         hint
93 -         pause;
94
95
96 - end
97 - end
```

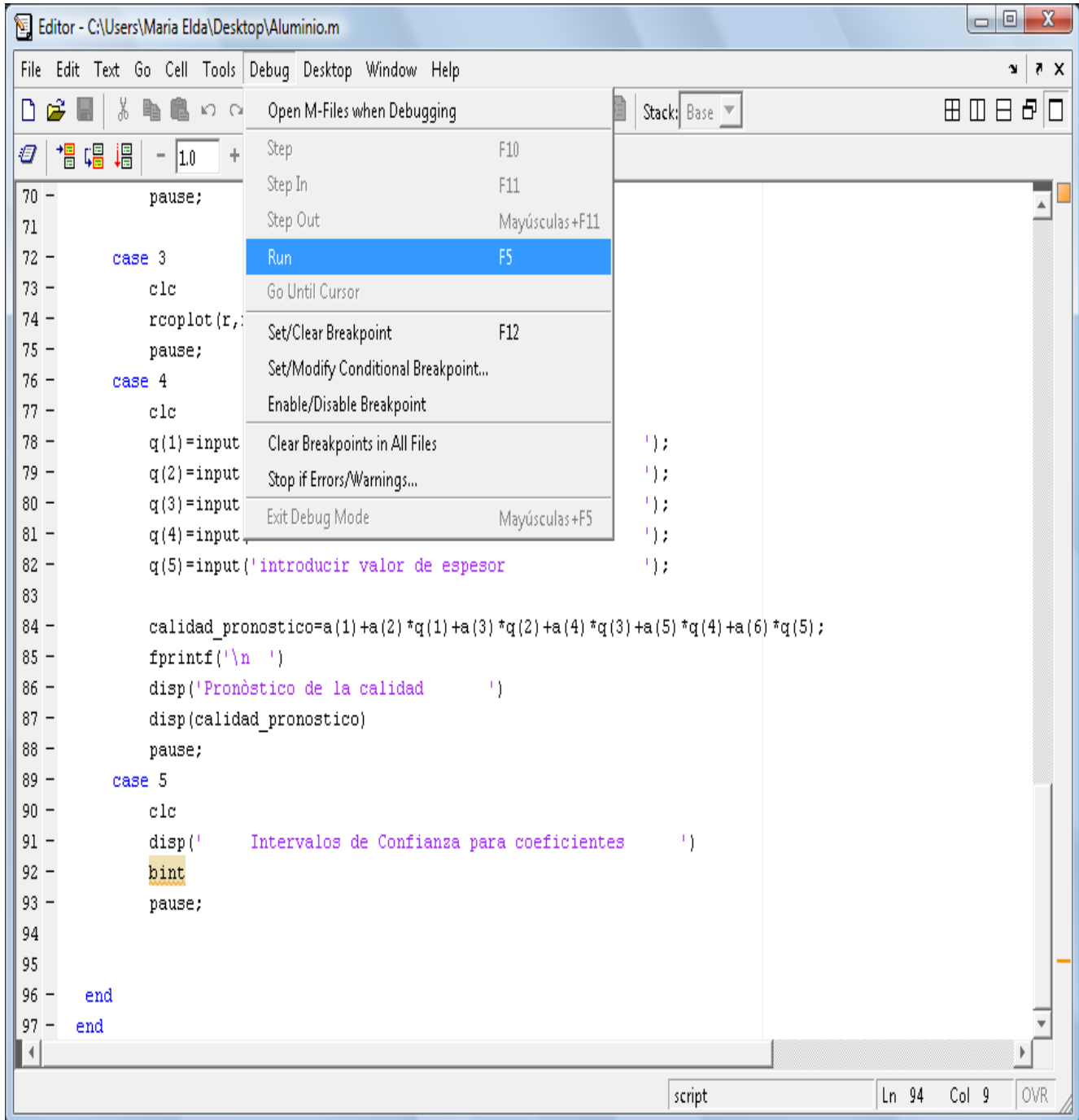
**FIG.16** Continuación del código en el software Matlab.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



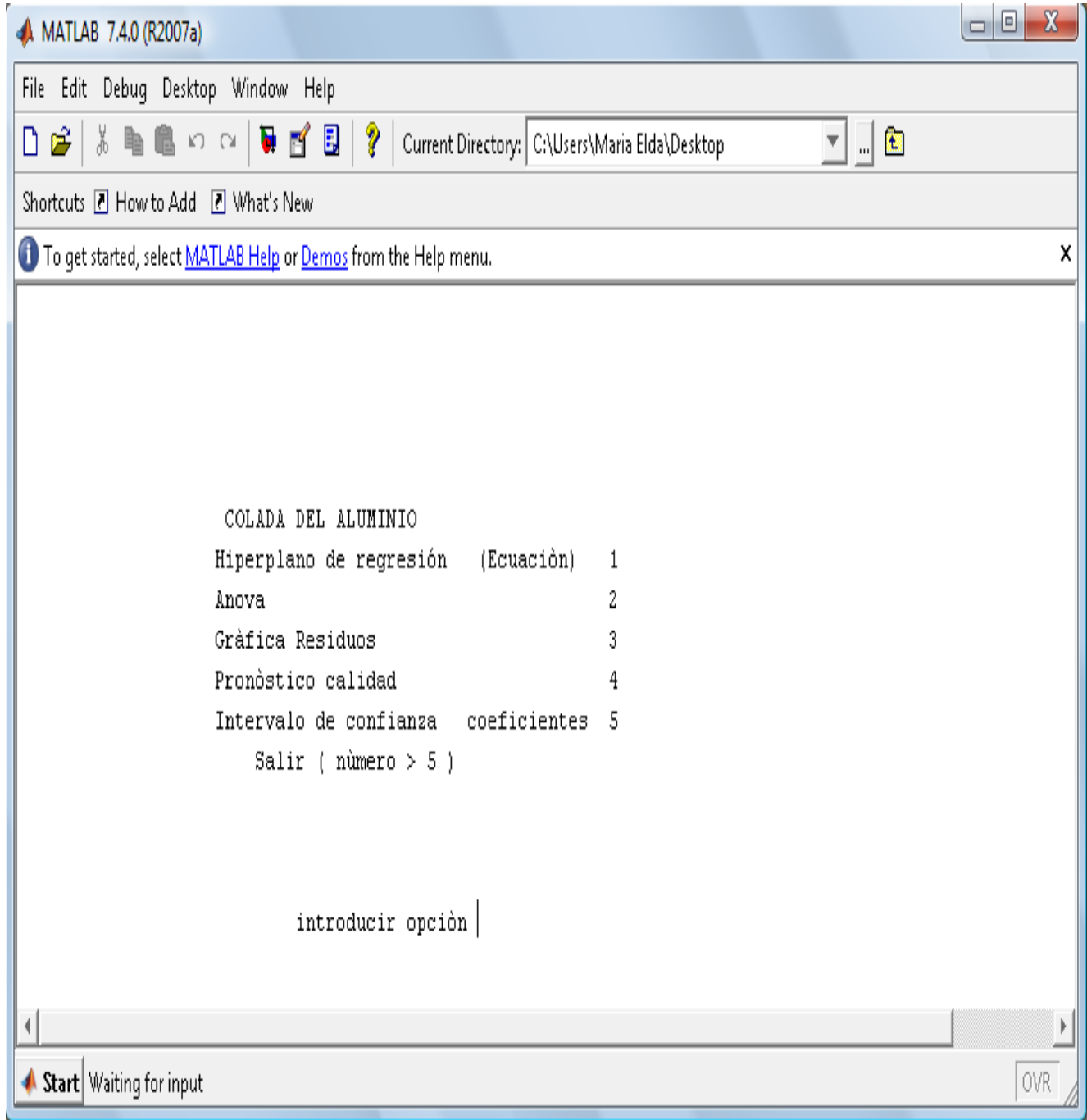
**FIG.17** Corrida del software Matlab.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**



**FIG.18** Menú de solicitud de ejecución en el software Matlab.



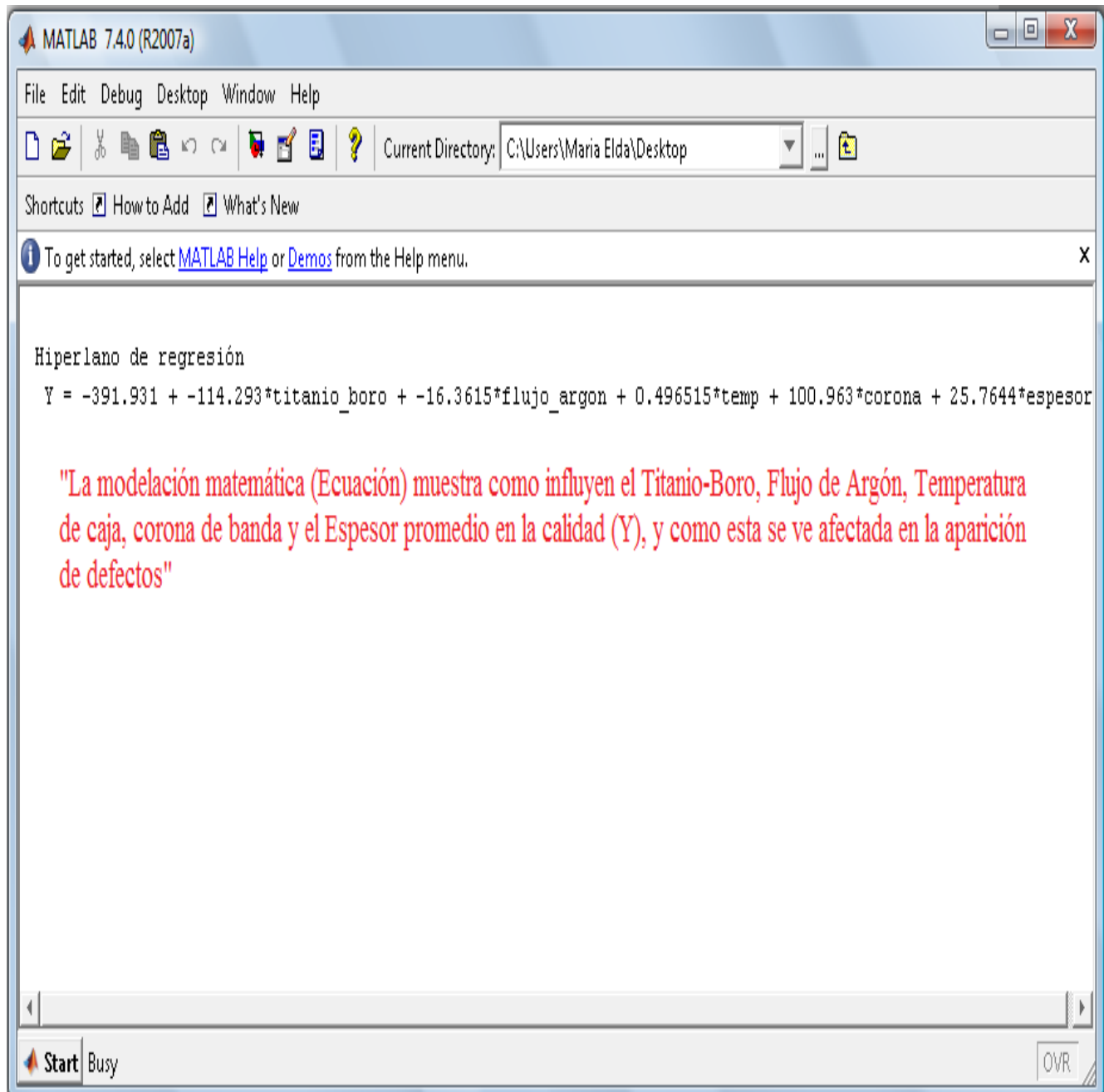


*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

## CAPÍTULO IV

Ejecución de la opción N°1: Plano de regresión (Ecuación)



**FIG.19** Hiperplano de regresión (Ecuación).

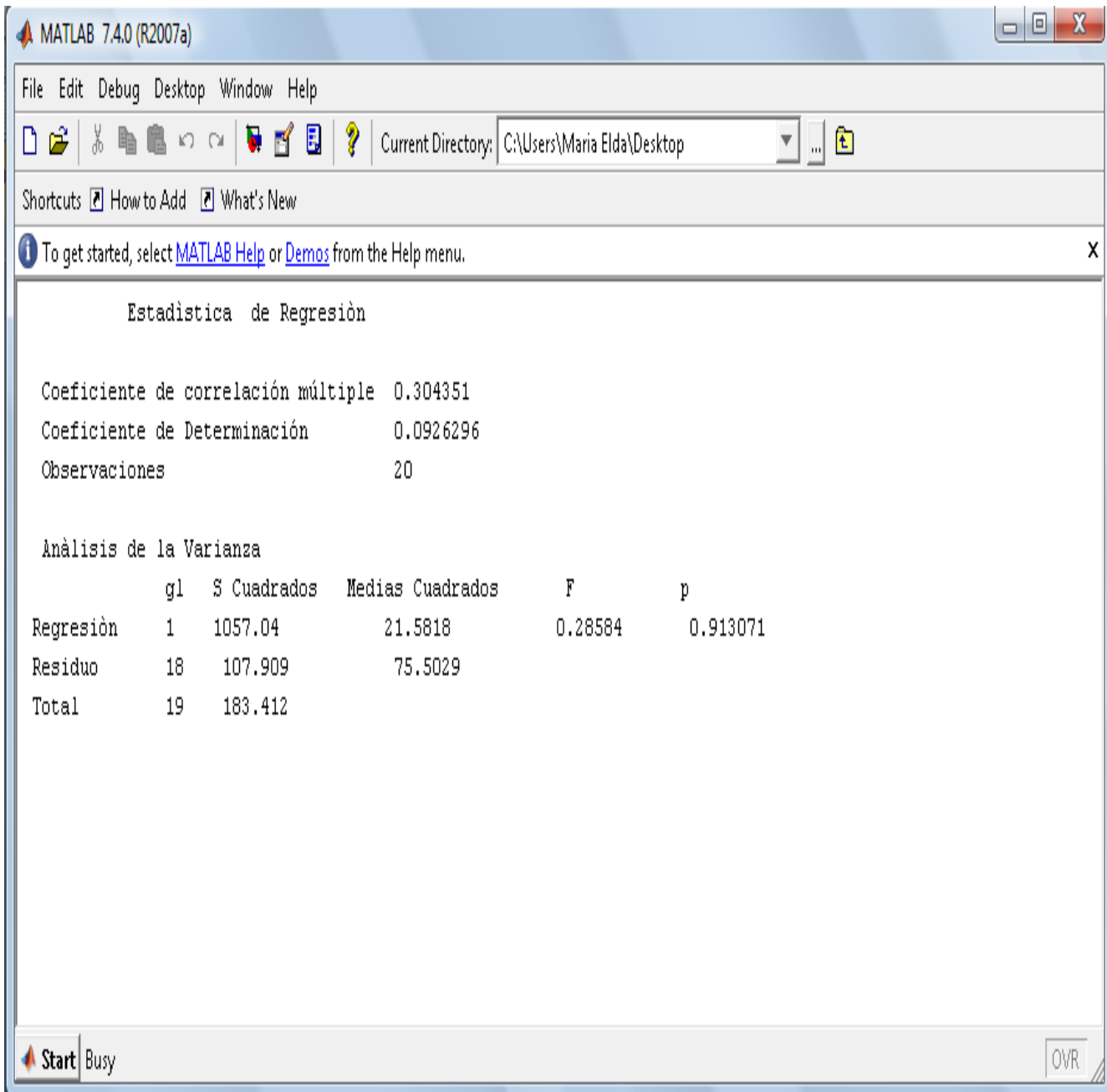


*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

Ejecución de la opción N°2: Anova (Análisis estadístico)



**FIG.20** Anova (Análisis estadístico).

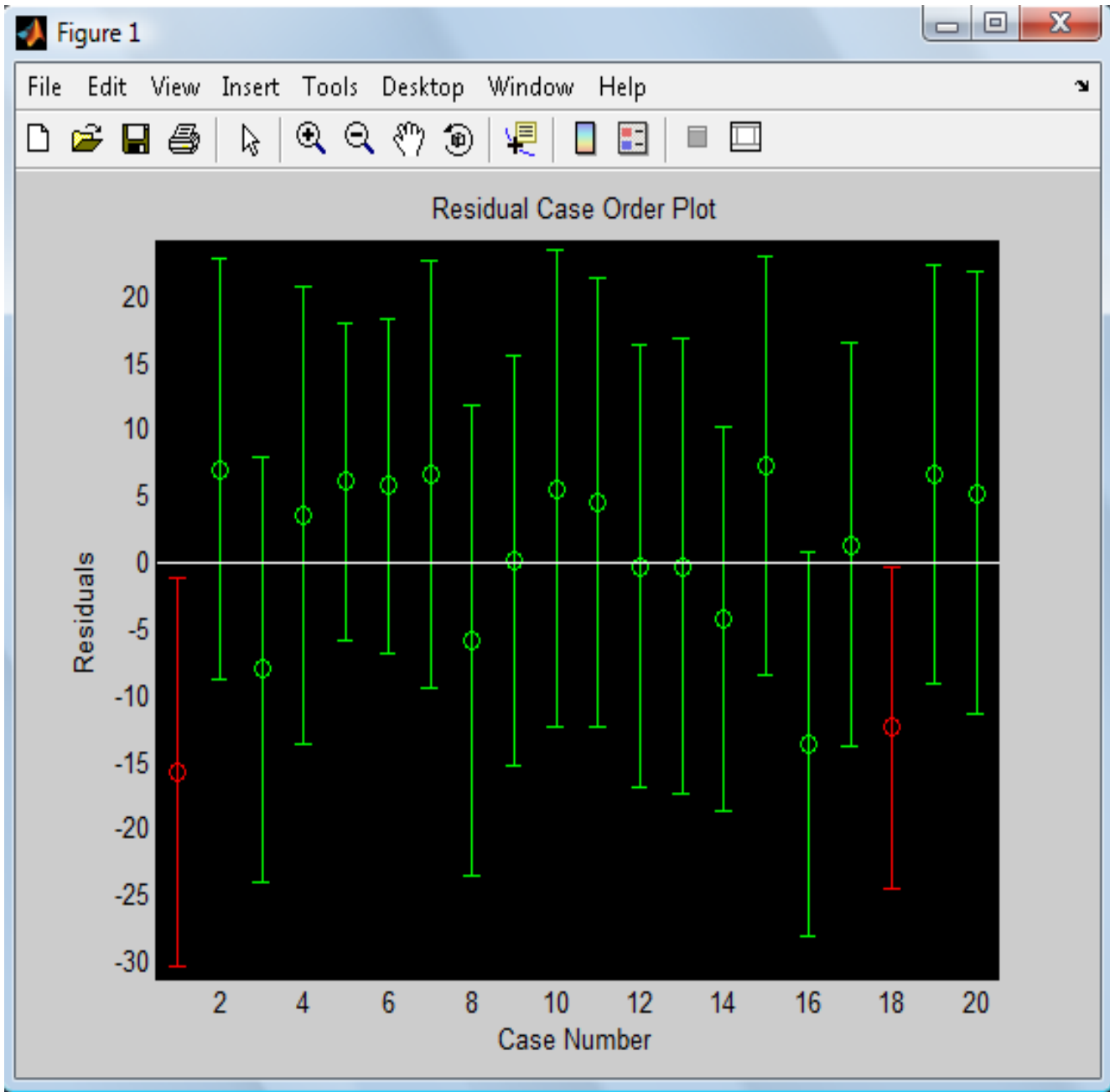


*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

Ejecución de la opción N°3: Gráfica de residuos.



**FIG.21** Gráfica de residuos.



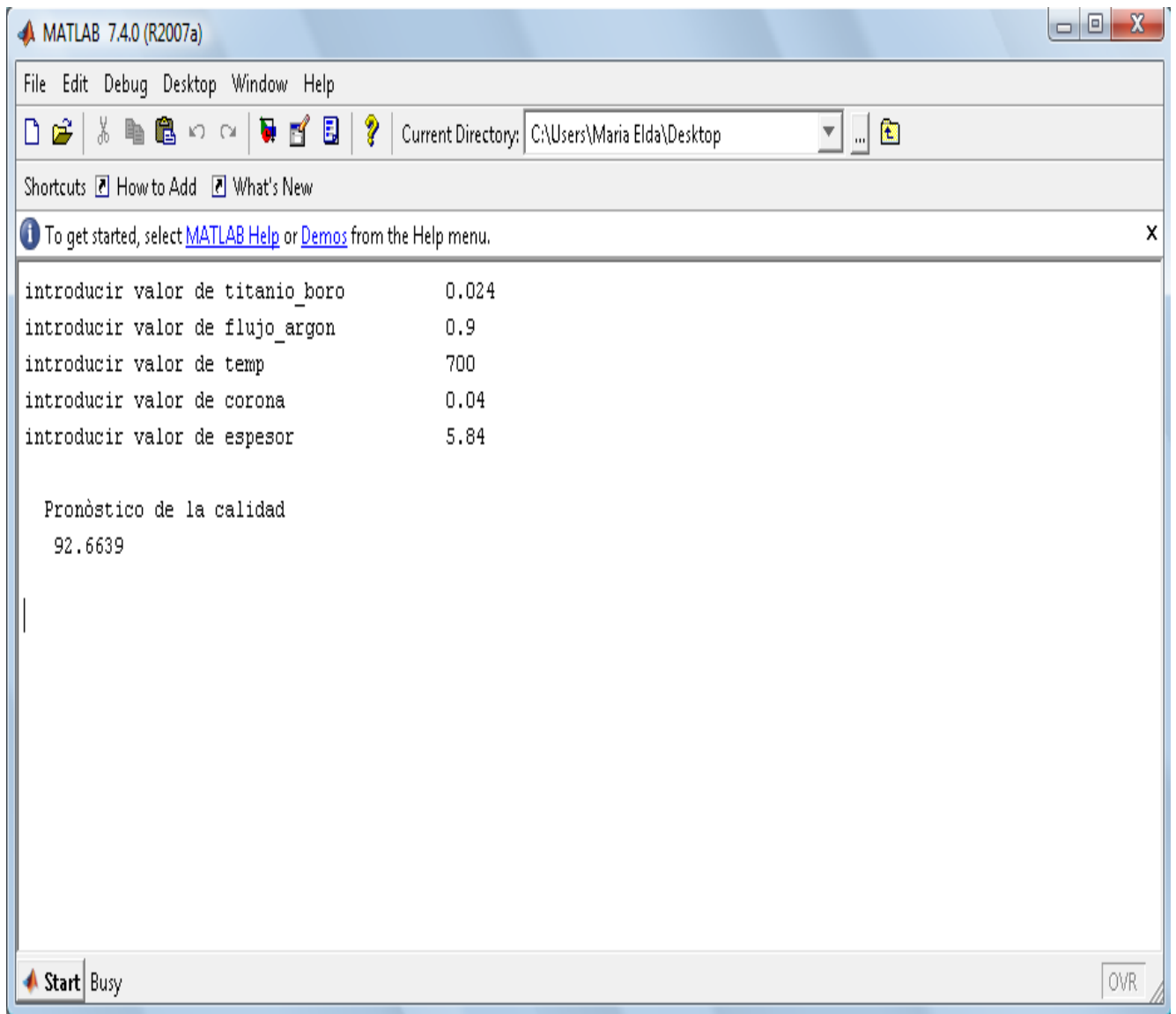
*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

Ejecución de la opción N°4: Pronóstico de la Calidad.

Esta opción ayuda a predecir la Calidad, dándole valores a las variables: Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de caja, Corona de banda y Espesor promedio.



**FIG.22** Pronóstico de la Calidad.

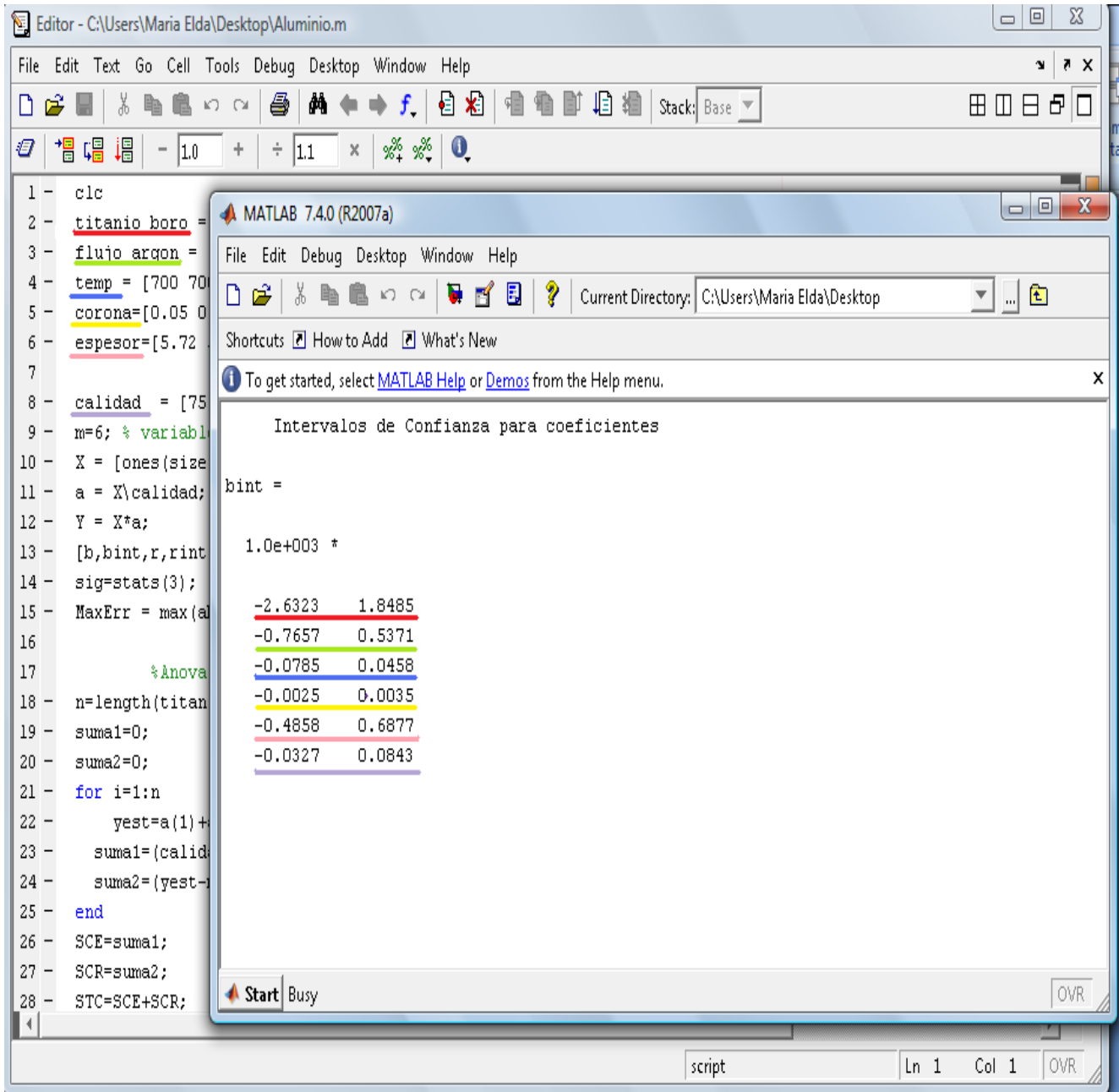


*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada  
continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

Ejecución de la opción N°5: Intervalos de confianza.



**FIG.23** Intervalos de confianza.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **CAPÍTULO IV**

### **IV.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La ecuación fue construida a partir de la data estadística (ver pág.61) donde se realizó un estudio para 5 variables, en función de la Calidad permitiendo así obtener la modelación matemática del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua en forma puntual:

$$Y (\text{Calidad}) = -391.931 + (-114.293 * \text{Titanio\_Boro}) + (-16.3615 * \text{Flujo\_Argón}) + (0.496515 * \text{Temp}) + (100.963 * \text{Corona}) + (25.7644 * \text{Espesor})$$

(IV, 1)

Se tomaron en estudio 5 variables, ya que son las causantes de mayores problemas, lo cual percatan una vez laminada la bobina. Estas son:

- Titanio-Boro.
- Flujo de Argón.
- Temperatura de caja.
- Corona de banda.
- Espesor promedio.

Gracias al paquete estadístico Spss se ha podido estudiar la influencia de las variables en función de la **Calidad**, observar su comportamiento, analizar como afecta al proceso y en como minimizar los defectos.

La variable respuesta (Calidad) es aleatoria, cuyos valores se observan mediante la selección de las variables de predicción (Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura



## *Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **CAPÍTULO IV**

de Caja, Corona de banda y Espesor promedio) en un intervalo de interés; por lo tanto, las variables de predicción no se consideran como variables aleatorias, sino que éstas son un conjunto de valores fijos que representan los puntos de observación para la variable respuesta.

**El coeficiente de correlación múltiple** indica que mientras más cercano es a 1, mejor es la regresión, ya que explica el comportamiento de la variable Calidad en función de las otras variables en estudio (Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio) y matemáticamente es posible pronósticar ese valor.

**La estadística R-cuadrada o coeficiente de determinación** muestra que el modelo como buen estimador explica el 9.2629% de la variabilidad de la Calidad en función de las otras variables, es decir, la Calidad es explicada en su totalidad el 9.2629% de las veces por las variables Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio sin presentar defectos en la solidificación de la bobina.

**El Error Estándar** indica que mientras más cercano estén los puntos al plano de regresión, el proceso está siendo explicado correctamente por estas variables; dado que, los puntos están muy alejados del plano de regresión (ver fig.21) el error es igual a 1.83%, lo que representa un valor alto, por lo que el proceso se ve afectado directamente por estas variables.

Una vez que se ha iniciado el método de análisis de regresión, se prosigue a obtener estimaciones para los parámetros (Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

Caja, Corona de banda, Espesor promedio y Calidad) que intervienen en el mismo. Para ello se utiliza el método de los mínimos cuadrados. Este método encuentra las estimaciones para los parámetros en la ecuación seleccionada mediante la minimización de la suma de los cuadrados de la diferencia entre los valores observados de la variable respuesta y de aquéllos proporcionados por la ecuación.

“**F**” es el factor estadístico y es el valor con el que se compara para ver si se acepta la hipótesis nula, la cual establece que no existe ningún efecto de los tratamientos sobre la respuesta (no hay regresión) o la hipótesis alternativa, la cual refleja el valor posible o intervalos de valores del parámetro de interés si la hipótesis nula es falsa (si hay regresión). Por lo que entonces se puede decir que, la estadística F apropiada para un análisis de varianza depende, en forma directa, de las esperanzas de los cuadrados medios de las fuentes de variación, las que a su vez dependen de si se consideran a los efectos correspondientes como fijos o aleatorios. En el estudio estadístico que se está llevando a cabo para el aluminio AA 8011 el valor “**P**” (probabilidad estadística) indica que sí es mayor a 0.10 acepta que hay regresión y como resultado de este valor **P** se obtuvo 0.913071, entonces se acepta la hipótesis alternativa (si hay regresión).

**Los residuos** son muy importantes debido a que proporcionan una abundante información sobre lo que puede faltar en el modelo de regresión estimado. Dado que un residuo representa la cantidad en la que un valor estimado falla para predecir la media de la correspondiente observación aleatoria, entre más grandes son los residuos, mayor tenderá a ser el efecto de la componente aleatoria en el modelo. En este caso, muestra un mayor descontrol en los extremos indicando en color rojo los puntos más perturbados (ver figura 28), mientras más cerrados estén los puntos indican que las variables están explicando el comportamiento de la variable Calidad. Dando una interpretación más concreta a lo que está ocurriendo, es que en la data





*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**CAPÍTULO IV**

estadística proporcionada por la empresa (ver Tabla N°3) las variables Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio, no están explicando el comportamiento de la variable Calidad, lo cual hace que esa zona se vea más afectada en el estudio de los residuos, mostrándolo así en color rojo (mayor defectos en la bobina).

**El intervalo de confianza** es un punto importante para el análisis estadístico, ya que este ofrece las variables que de cierta forma no permiten el completo control. En este caso existen variaciones de signos (+/-) para todos los parámetros, indicando así, que son parámetros perturbadores y a su vez muestran el nivel de perturbación para cada uno de ellos.

A continuación se mostrará una simulación realizada mediante el software Matlab, mostrándose en un cuadro el resultado de la simulación y los Rangos más favorables para cada variable en estudio:

Titanio-Boro (%)	Flujo de Argón (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura de caja (°C)	Corona de banda (mm)	Espesor promedio (mm)	Calidad (%)
0.030	0.8	700	0.05	5.82	94
0.030	0.8	700	0.05	5.71	91
0.023	0.8	700	0.05	5.72	92
0.014	0.8	700	0.05	5.70	92
0.032	0.8	700	0.05	5.70	90
0.032	0.9	700	0.05	5.70	89
0.032	0.9	700	0.06	5.70	90
0.034	0.8	700	0.04	5.90	94
0.034	0.8	700	0.07	5.90	97
0.034	0.8	700	0.07	5.71	92
0.034	0.8	695	0.07	5.71	90
0.023	0.8	700	0.07	5.90	98
0.023	1.2	700	0.07	5.90	92
0.042	0.8	700	0.07	5.90	96
0.042	0.8	698	0.07	6	98
0.042	0.8	698	0.04	6	95
0.023	0.8	698	0.07	6	100
0.023	0.8	698	0.07	5.70	93
0.023	0.8	698	0.07	6.3	100
0.023	0.8	698	0.04	6.3	100

**TABLA N°4.** Resultados de la simulación.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## **CAPÍTULO IV**

Por medio de la simulación se ha podido detallar con precisión como afecta cada variable en la **Calidad**, dando como resultados que, es necesario trabajar a bajas temperaturas para así reducir la entrada de hidrógeno en el aluminio, trayendo como beneficio el ahorro de Argón, ya que se le suministrará menos cantidad ( $0.8 \text{ m}^3/\text{h} - 1 \text{ m}^3/\text{h}$ ); por otra parte, el Titanio-Boro maneja valores poco perturbadores ( $0.023\% - 0.042\%$ ) y la Temperatura de caja afecta moderadamente al proceso debido a que no influye directamente en la **Calidad**, ya que su temperatura puede mantenerse estable ( $698^\circ\text{C} - 701^\circ\text{C}$ ) por tiempos prolongados. Sin embargo, la **Calidad** se verá afectada satisfactoriamente cuando se logre obtener una bobina con un espesor promedio entre 5.90 mm y 6.30 mm y una Corona de banda entre 0.04 mm y 0.07 mm, cumpliendo de esta manera con las especificaciones de la empresa. Cuando los parámetros se encuentran dentro de estos rangos pueden generar dos efectos:

- Inexistencia de defectos llevando la Calidad a un 100% donde la bobina obtenida de la colada es utilizada en su totalidad, es decir, una vez laminada la bobina esta no producirá desperdicios (scrap).
- Reducción de defectos, trayendo como beneficios la manipulación del material aguas abajo con la finalidad de utilizar toda la bobina.

Ahora, sí los parámetros se salen de estos rangos los defectos como las dendritas, poros, entre otros; se hacen tan notorios y fuertes que es imposible manipular el material aguas abajo para aprovechar toda la bobina, trayendo como consecuencia pérdidas laborales, productivas y de materia prima.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

## CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados de este Trabajo especial de grado se concluye:

- La modelación matemática que describe el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua, para las variables en estudio y para un espesor de 6 mm es:

$$Y (\text{Calidad}) = -391.931 + (-114.293 * \text{Titanio\_Boro}) + (-16.3615 * \text{Flujo\_Argón}) + (0.496515 * \text{Temp}) + (100.963 * \text{Corona}) + (25.7644 * \text{Espesor})$$

- Los rangos que afectan al proceso de forma favorable para cada variable (Titanio-Boro, Flujo de Argón, Temperatura de Caja, Corona de banda y Espesor promedio) son:
  - Flujo de Argón: 0.8 m<sup>3</sup>/h – 1 m<sup>3</sup>/h.
  - Titanio-Boro: 0.023% - 0.042%.
  - Temperatura de caja: 698°C – 701°C.
  - Corona de banda: 0.04 mm – 0,07 mm.
  - Espesor promedio: 5.90 mm – 6.30 mm
- La aparición de defectos en la bobina, es consecuencia, de que las variables analizadas están fuera de los rangos permisibles obtenidos en la simulación.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

**RECOMENDACIONES**

- Todos estos estudios se han realizado para el aluminio AA 8011 con espesor de 6 mm, pero también pueden aplicarse para todo tipo de aluminio y espesores para observar y analizar el comportamiento en el modelo matemático, ya que no existe limitativa, puesto que, el estudio se lleva a cabo con una data estadística.
- Se recomienda el adiestramiento para el personal que haga uso del programa y realizar pruebas para comprobar la veracidad y eficacia del mismo.
- Es recomendable que para controlar el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm, seguir profundizando sobre este tema, incluyendo más variables, hasta lograr considerar todas las que influyen en el proceso, hasta lograr obtener la ecuación que defina el modelo por completo.
- Se recomienda ampliar toda esta investigación a un modelo general, para tener una visión más amplia de todo el proceso y de ser posible realizar un estudio exhaustivo en otro software para evaluar la operatividad del programa.



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. GÓMEZ Alvaro y TRIANA Carlos: “Simulación del Moldeado para prever la formación de porosidades en pistones de aluminio usando redes neuronales”. Universidad de Carabobo. Tesis de Pre- Grado, Ingeniería Mecánica. 1999.
2. GÓMEZ Erika: “Simulación del proceso de formación de porosidades en la solidificación de aleaciones de aluminio”. Universidad de Carabobo. Tesis de Pre- Grado. Ingeniería Mecánica. 2003.
3. ARBOLEDA, Reinaldo: “Simulación por computadora del proceso de solidificación de ruedas de Aluminio”. Universidad de Carabobo. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Mecánica, 1991.
4. MIHA Zaloznik, SHILE Xin y BOZIDAR Saler: “Verification of a Numerical of Macrosegregation in Direct Chill Casting”. Eurothem 82, 1991.
5. KEMAL Sarioglu, GÜNGÖR Yildizbayrak, MURAT Dunder: “ Computer simulation of metal feeding system used in twin roll casting”. Aluminum A.S. Tuzla, Istanbul 81700 Turkey, 1993.
6. PEREZ Cesar: “MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería”. Pearson Prentice Hall. Universidad Complutense de Madrid, 2002. Páginas: 632. Ribera del Loira, 28042(Madrid, España).
7. DABNEY James y HARMAN Thomas: “The student edition of SIMULINK DYNAMIC System Simulation for Matlab”. Pearson Prentice Hall 1998, 1996. Upper Saddle River, New Jersey 07458. Simon y Schuster/Aviacom Company. Pág de internet: <http://www.prenhall.com>



*Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.*

---

8. CANAVOS George: "Probabilidad y Estadística Aplicaciones y Métodos". McGRAW-HILL, 1997. Pág. 651.
9. MONTGOMERY Douglas y RUNGER George: "Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería". McGRAW-HILL, 1996. Pág. 895.
10. Pág. de internet: <http://www.google/statgraphicsplus.com>
11. Pág. de internet: <http://www.google/elaluminio.com>

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
COORDINACIÓN DE PROYECTO DE GRADO

### SINOPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TÍTULO DEL TRABAJO: Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm.

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: \_\_\_\_\_

FECHA DE EX. FINAL: \_\_\_\_\_

ESCUELA: \_\_\_\_\_

#### SINOPSIS:

En la actualidad las empresas procesadoras de aluminio presentan inconvenientes en sus líneas de producción debido a la aparición de defectos en el material una vez solidificado. Por ello, nace la idea de simular el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm, con la finalidad de aportar ideas que ayuden a mejorar tal situación. El sistema manejará los parámetros fundamentales extraídos de una amplia revisión bibliográfica donde se ha estudiado desde la composición química de la aleación usada para hacer la fundición, hasta el medio ambiente donde se realiza la misma. Se realizó un estudio minucioso de las variables en estudio, las cuales son: Titanio-Boro (coadyuvante de la eliminación dendrítica dentro del aluminio), Flujo Argón (ayuda a minimizar la presencia de hidrógeno, ya que este causa poros y daño molecular en el material debilitándolo), Temperatura de caja (de vital importancia ya que es necesario mantener el aluminio fundido a no muy altas temperaturas), Corona de banda y Espesor promedio de la lámina (Características principales del producto). A través de la data proporcionada por ALUCASA CVG y haciendo uso del paquete estadístico llamado "Spss" (quien tuvo un aporte invaluable en el desenvolvimiento de la investigación, ya que, proporcionó el comportamiento de estas variables en función de la Calidad y un estudio detallado del mismo), dio pie a la consecución de las ideas para iniciar en el software Matlab; el cual permitió una amplia visión de la influencia de las variables en estudio dentro del proceso llevando a la conclusión más relevante "La modelación matemática que se ajusta al proceso es:  $Y(\text{Calidad}) = -391.931 + (-114.293 * \text{Titanio Boro}) + (-16.3615 * \text{Flujo Argón}) + (0.496515 * \text{Temp}) + (100.963 * \text{Corona}) + (25.7644 * \text{Espesor})$  y los rangos favorables donde oscilan las variables en estudio son: Flujo de Argón: (0.8 – 1) m<sup>3</sup>/h y Titanio-Boro: (0.023 - 0.042%), Temperatura: (698 – 701)°C, Corona: (0.04 – 0,07) mm y Espesor: (5.90 – 6.30) mm. Es de gran relevancia destacar que el programa es de gran ayuda para cualquier empresa que desee hacer uso de él, pero antes es indispensable continuar desarrollando tesis sobre este tema, hasta cubrir todas las variables que intervienen en el proceso.

CEDULA DE IDENTIDAD

ESTUDIANTES

FIRMA

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

PROFESOR GUIA: \_\_\_\_\_

FIRMA

\_\_\_\_\_

JURADO: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

JURADO: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_