



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**SIMULACIÓN MEDIANTE UNA  
HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL  
PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA  
ALEACIÓN DE ALUMINIO AA1100 PARA EL  
ESTUDIO DE LOS DEFECTOS PRESENTES EN LA  
SOLIDIFICACIÓN DE LÁMINAS DE 6MM DE  
ESPESOR.**

**Autores:  
Gascón L Alejandro J  
Tovar V José G**

Urb. Yuma II, Calle N° 3, Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (Master) - Fax: (0241) 871239.



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SIMULACIÓN MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL  
PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO  
AA1100 PARA EL ESTUDIO DE LOS DEFECTOS PRESENTES EN LA  
SOLIDIFICACIÓN DE LÁMINAS DE 6MM DE ESPESOR.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:** Gascón Alejandro

C.I.: 24.298.948

Tovar José

C.I.: 26.781.540

**Tutor:** Ing. Donato Romanello

San Diego, Octubre de 2019.



FI-N -008-2019-2CR (TG)

Valencia, 02 de Julio de 2019

Ciudadanos:  
Alejandro Gastón  
C.I:24.298.948  
José Tovar  
C.I:26.781.540  
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 02-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **SIMULACIÓN MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA1100 PARA EL ESTUDIO DE LOS DEFECTOS PRESENTES EN LA SOLIDIFICACION DE LAMINAS DE 6MM DE ESPESOR** presentado por usted (es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I: 4.131.877 y la Ing. Alicia De Pizzella C.I:4.598.880 como Tutores Académico y Metodológico que los asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,



**Prof. Luis Lira**  
Decano de la Facultad de Ingeniería

e.e. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° V-4131.877, en mi carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por los ciudadanos Alejandro José Gascón López, portador de la Cédula de Identidad N° V-24.298.948 y José Gabriel Tovar Velásquez, portador de la Cédula de Identidad N° V- 26.781.540 titulado **"SIMULACIÓN MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA1100 PARA EL ESTUDIO DE LOS DEFECTOS PRESENTES EN LA SOLIDIFICACIÓN DE LÁMINAS DE 6MM DE ESPESOR"**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, mes de agosto del año dos mil diecinueve.

Ing. Donato Romanello

C.I: V-4.131.877



Scanned with  
CamScanner

## ÍNDICE

CONTENIDO	Pp
ÍNDICE DE FIGURA.....	xii
ÍNDICE DE IMAGEN.....	xiv
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación.....	3
1.3 Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Limitaciones.....	5
1.6 Alcance.....	5
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Bases Teóricas.....	8
2.2.1 El aluminio.....	9
2.2.1.1 Características físicas.....	10
2.2.1.2 Características mecánicas.....	10
2.2.1.3 Características químicas.....	10
2.2.2 El aluminio y sus aleaciones.....	11
2.2.3 Series de aluminios según sus aleantes.....	14
2.2.4 Fusión del aluminio y sus aleantes mediante horno.....	14
2.2.4.1 Hornos metalúrgicos.....	14
2.2.4.2 Horno fusor.....	15
2.2.4.3 Horno de retención.....	17
2.2.5 Refinamiento del grano.....	18
2.2.6 Proceso de desgasificado.....	19
2.2.6.1 Beneficio del desgasificado.....	21
2.2.7 Proceso de filtrado.....	22
2.2.7.1 Fundamentos teóricos del proceso de filtrado.....	22
2.2.7.2 Beneficios del filtrado.....	24
2.2.8 Colada continua del aluminio.....	24
2.2.8.1 Boquilla (tundish tip).....	25
2.2.8.3 Proceso de solidificación.....	28
2.2.8.4 Calidad de la lámina de aluminio a través de TRC.....	30

2.2.9	Defectos en el proceso de colada continua.....	31
2.2.10	Simulación.....	35
2.2.11	Herramienta computacional.....	36
	2.2.11.1 Magmasoft .....	37
	2.2.11.2 Procast.....	39
	2.2.11.3 Cast-Designer.....	41
2.3	Definición de Términos .....	44

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1	Naturaleza de la investigación.....	46
3.2	Tipo de investigación.....	46
3.3	Nivel de la Investigación.....	47
3.4	Población.....	47
3.5	Muestra.....	48
3.6	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.....	48
	3.6.1 La técnica.....	48
	3.6.2 El instrumento de recolección de datos.....	48
	3.6.2.1 Recolección de fuentes primarias.....	49
	3.6.2.2 Recolección de fuentes secundarias.....	49
3.7	Fases Metodológicas.....	49

### **IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1	Seleccionar la herramienta computacional más adecuada para simular el proceso de colada continua .....	51
	4.1.1 Modelo matemático teórico .....	51
	4.1.1.1 Proceso de solidificación.....	51
	4.1.1.2 Proceso de formación de defectos.....	58
	4.1.2 Modelo Geométrico.....	63
	4.1.3 Tecnología aplicada.....	63
	4.1.3.1 ProCast.....	64
4.2	Analizar los defectos que suceden en el proceso de colada continua de aluminio.....	65
	4.2.1 Macro segregación o segregación inversa.....	66
	4.2.2 Línea de segregación.....	67
	4.2.3 Grietas en los bordes.....	67
	4.2.4 Poros.....	69
	4.2.5 Inclusiones de impurezas.....	72
	4.2.6 Rechupes.....	72
4.3	Encontrar las posibles causas de los defectos de la solidificación del proceso de colada continua.....	73
	4.3.1 Causa de la Macro segregación o segregación inversa.....	73

4.3.2	Causa de la línea de segregación.....	73
4.3.3	Causa de las grietas en los bordes.....	74
4.3.4	Causa de los poros.....	74
4.3.5	Causa de rechupes.....	74
4.4	Estudiar detalladamente cada defecto para encontrar disminuirlos.....	74
4.4.1	PreCast.....	75
4.4.2	Data Base.....	82
4.4.3	ProCast.....	84
4.4.4	Resultados.....	87
4.4.4.1	Tiempo de solidificación.....	88
4.4.4.2	Temperatura.....	89
4.4.4.3	Fracción solido.....	90
4.4.4.4	Porcentaje de porosidad.....	91
4.4.4.5	Criterio de Niyama.....	93
4.5	Comparar los resultados de la simulacion resultados reales para verificar exactitud de los resultados.....	94
4.5.1	Temperatura vs Tiempo.....	95
4.5.2	Fracción Solido vs Tiempo.....	98
4.5.3	Porcentaje de porosidad vs Tiempo.....	100
4.5.4	Criterio de Niyama vs Tiempo.....	102
4.5.5	Analisis de los resultados de las comparaciones.....	103
<b>V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		
4.1	Conclusiones .....	104
4.2	Recomendaciones.....	105
<b>REFERENCAS BIBLIOGRAFICAS</b>		106
<b>ANEXOS</b>		
A	Tabla de datos reales ALUCASA CVG.....	108

## ÍNDICE DE FIGURA

### FIGURA

	<b>Pp</b>
1 Evolución en la producción de aluminio.....	9
2 Estructura atómica del aluminio.....	11
3 Series de aluminios.....	14
4 Horno de fusión de reverbero .....	16
5 Horno de reverbero de lecho interno .....	16
6 Efecto del tamaño de grano en el comportamiento de un metal en un diagrama esfuerzo- deformación.....	19
7 Mecanismo de disolución de hidrógeno en el aluminio líquido proveniente de la humedad de la atmósfera .....	20
8 Curvas de eficiencia del gasificado mediante el sistema Alpur.....	21
9 Representación esquemática de línea de colada del área de fundición y colada de CVG ALUCASA .....	25

10

28	Observaciones microscópicas de una aleación que ha solidificado direccionalmente.....	55
29	Esquema de variación de Presión a lo largo de las dendritas. Formación de un precipitado por tensión transmitida entre las dendritas.....	56
30	Comportamiento de cambios de presión durante la solidificación.....	57
31	Cambios de densidad en el Aluminio con la Temperatura.....	58
32	Diagrama esquemático que ilustra la ley de Darcy en la solidificación de una aleación.....	59
33	Fractura típica transgranular con radio de 0.1m.....	68
34	Fractura típica intergranular de 1 micrómetro.....	69
35	Clasificación de poros de acuerdo con su dimensión transversal.....	70
36	Impurezas vistas con ensayo radiográfico.....	72
37	Perdidas de temperatura.....	97

## ÍNDICE DE IMAGEN

### IMAGEN

	<b>Pp</b>
1 Plano vista isométrica en solidworks de la lámina.....	75
2 Interfaz inicial Procast.....	76
3 Interfaz “New File”.....	77
4 Selección de la aplicación Mesh.....	77
5 Importar archivo.....	78
6 Selección del archivo “Lamina Tesis.Step”.....	79
7 Inicio del mallado en 2D.....	80
8 Selección de las caras a realizar el mallado.....	80
9 Inicio del mallado en 3D.....	81
10 Mallado en 3D.....	82
11 Volume Manager.....	83
12 Volume Manager.....	83
13 Descripción del proyecto.....	84
14 Verificación de parámetros iniciales.....	85
15 Parámetros de la simulación.....	85
16 Inicio de la simulación.....	86
17 Inicio de cálculos de la simulación.....	86
18 Interfaz Visual-Viewer.....	87
19 Tiempo de solidificación.....	89
20 Temperatura.....	90
21 Fracción Solido.....	91
22 Porcentaje de porosidad.....	92
23 Criterio de Niyama.....	93
24 Evolution/Profile.....	94
25 Selección de nodos a estudiar.....	95
26 Curva Temperatura vs Tiempo.....	96
27 Curva Temperatura vs Tiempo.....	97
28 Curva fracción solido vs Tiempo.....	99
29 Nodos seleccionados.....	100
30 Curva Porcentaje de porosidad vs tiempo.....	101
31 Curva Porcentaje de porosidad vs tiempo.....	102



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**SIMULACIÓN MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL  
DEL PROCESO DE COLADA CONTINUA EN LA ALEACIÓN DE  
ALUMINIO AA1100 PARA EL ESTUDIO DE LOS DEFECTOS PRESENTES  
EN LA SOLIDIFICACIÓN DE LÁMINAS DE 6MM DE ESPESOR.**

**Autores:** Gascón Alejandro  
Tovar José

**Tutor:** Ing. Donato Romanello.

**Fecha:** Octubre, 2019

**RESUMEN INFORMATIVO**

El trabajo de grado titulado a continuación en, el cual fue denominado **“Simulación mediante una herramienta computacional del proceso de colada continua en la aleación de aluminio AA1100 para el estudio de los defectos presentes en la solidificación de láminas de 6mm de espesor”**. Con ello se quiere estudiar los defectos presentes que existen en la solidificación, para ellos hay que tener en cuenta que para la creación de láminas de 6mm de espesor de la aleación de aluminio AA1100 es necesario realizar el proceso de colada continua el cual se basa en la creación de piezas al verter el material (aluminio) a una temperatura elevada, en forma de líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada o a través de un molde y dejar que solidifique el material. Luego del proceso de colada continua se realiza otro proceso el cual es el laminado, este se realiza mediante de dos rodillos, que es una técnica combinada de solidificación y deformación, la cual tiene como finalidad pasar la aleación de aluminio fundida entre un par de rodillos de laminación en frío. A pesar de que es uno de los más antiguos y realizados en la industria todavía existen ciertos defectos que se presentan en las líneas de producción cuando el material se ha solidificado. Estos defectos pueden ser: rechupes, porosidades o depresiones superficiales entre otros, debido a esto la microestructura del material puede ser modificada y no cumplir con los parámetros necesarios en la industria. Metodológicamente es una investigación descriptiva donde se desarrolla una simulación para observar el comportamiento de una aleación de aluminio AA100 durante su solidificación. Para así poder determinar las variables y causas que hacen que estos defectos aparezcan.

**Descriptor:** Simulación, Aluminio, proceso, colada continua, herramienta computacional.

## INTRODUCCIÓN

Para la creación de láminas de 6mm de espesor de la aleación de aluminio AA1100 es necesario realizar el proceso de colada continua el cual se basa en la creación de piezas al verter el material (aluminio) a una temperatura elevada, en forma de líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada o a través de un molde y dejar que solidifique el material. Luego del proceso de colada continua se realiza otro proceso el cual es el laminado, este se realiza mediante de dos rodillos, que es una técnica combinada de solidificación y deformación, la cual tiene como finalidad pasar la aleación de aluminio fundida entre un par de rodillos de laminación en frío.

A pesar de que es uno de los más antiguos y realizados en la industria todavía existen ciertos defectos que se presentan en las líneas de producción cuando el material se ha solidificado. Estos defectos pueden ser: rechupes, porosidades o depresiones superficiales entre otros, debido a esto la microestructura del material puede ser modificada y no cumplir con los parámetros necesarios en la industria.

Debido a esto se realizarán simulaciones en una herramienta computacional, para poder corregir y controlar las variables como temperatura, distancia y velocidad, que causan dichos defectos y estudiarlos, con el objetivo de disminuirlos o erradicarlos, con esto lograr un gran ahorro en las distintas empresas de fundición y lograr una mejor calidad de las piezas realizadas mediante el proceso de colada continua para aluminio.

La siguiente investigación está constituida por cuatro capítulos, los cuales se subdividen en la estructura presentada a continuación:

**Capítulo I**, el cual posee el planteamiento del problema, formulación, los objetivos de la investigación, la justificación y alcances de la investigación.

**Capítulo II**, contiene el marco teórico de la investigación con los antecedentes, bases teóricas, así como la determinación de los términos básicos.

**Capítulo III**, se describe el marco metodológico, el tipo, diseño y propósito de la investigación, así como las técnicas e instrumentos utilizados en la recolección de

datos y la metodología de este describiendo las fases realizadas para cumplir con la investigación.

**Capítulo IV**, es donde se desarrollan las fases de la investigación, en este capítulo se realiza la simulación y se analizan los resultados dados por esta misma.

**Capítulo V**, son las conclusiones y recomendaciones una vez estudiados y analizados los resultados de la simulación realizada en “ProCast”.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 Planteamiento del problema.**

El proceso de colada continua se basa en la creación de piezas al verter el material (aluminio) a una temperatura elevada, en forma de líquido en una cavidad formada en un bloque de arena aglomerada o a través de un molde y dejar que solidifique el material. Actualmente a pesar de que este proceso es uno de los más antiguos y realizados en la industria todavía existen ciertos defectos que se presentan en las líneas de producción cuando el material se ha solidificado. Estos defectos pueden ser: rechupes, porosidades o depresiones superficiales entre otros. Este tipo de defectos producen una disminución de la calidad del producto, provocando un gran porcentaje de devoluciones y demoras en las entregas.

Con el fin de disminuir estos defectos, se han realizado una serie de estudios para determinar las recomendaciones para evitar que se presente la solidificación del material y obtener los parámetros que se deben tener en cuenta durante el proceso. Es por ello por lo que muchas empresas han iniciado la búsqueda de soluciones las cuales tienen un alto valor económico, ya que los estudios no han sido efectivos, porque los resultados esperados no se han logrado. Debido a que la mayoría de los defectos se forman durante la solidificación, es necesario encontrar las causas que lo producen. Es por esto, que la presente investigación tiene como objetivo realizar una simulación del proceso de colada continua en aluminio AA1100 para láminas de 6mm de espesor para estudiar los defectos que se pueden encontrar, y controlar el proceso de manera óptima y virtual.

#### **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo se pueden detectar los defectos presentes en la solidificación del proceso de colada continua de la aleación de aluminio AA1100 para láminas de 6mm de espesor?

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Simular mediante una herramienta computacional del proceso de colada continua en la aleación de aluminio AA1100 para estudiar los defectos presentes en la solidificación de láminas de 6mm de espesor.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Seleccionar la herramienta computacional más adecuada para simular el proceso de colada continua.

Analizar los defectos que sucedan en el proceso de colada continua del aluminio AA1100.

Encontrar las posibles causas de los defectos de la solidificación del proceso de colada continua.

Estudiar detalladamente cada defecto para encontrar disminuirlos.

Comparar resultados de simulación con resultados reales para verificar exactitud de los resultados.

### **1.4 Justificación del problema**

Debido a que la mayoría de las pérdidas monetarias están relacionadas con los defectos que se producen en la solidificación, las empresas que se encargan de hacer el proceso de colada continua de la aleación de aluminio AA1100 han realizado estudios para descubrir las causas y no han sido efectivos. En Venezuela existe un control cambiario, trayendo esto un difícil acceso a las divisas es necesario y de gran importancia descubrir las causas de como estos defectos aparecen para así tener una reducción de costos en las pérdidas de material y devoluciones causados por estos mismos.

Incentivando a la Universidad José Antonio Páez el estudio e investigación para prevención de defectos en la solidificación con simulaciones de procesos de colada continua con herramientas computacionales a fines para familiarizar al estudiante con

nuevas tecnologías. A partir de esto se crea la idea de la simulación del proceso de colada continua del aluminio AA1100 para láminas de 6 mm de espesor, con ayuda de una herramienta computacional para así de esta forma poder estudiar y encontrar los parámetros que producen la aparición de estos defectos.

### **1.5 Limitaciones**

La producción de softwares encargados de simular estos procesos de colada continua no ha sido desarrollada en Venezuela, lo cual tiene por consecuencia que las licencias de algunos de estos softwares no son están disponibles en el mercado venezolano, por esta razón la selección de este se debe tomar en cuenta que exista soporte técnico en el país. La computadora para el estudio debe soportar los requerimientos mínimos para el desarrollo y proceso de simulación de este, si no se cuenta con una computadora con una buena capacidad de procesamiento, puede afectar en el resultado final de la simulación y en el tiempo de procesamiento de datos, se necesita que sean lo más aproximado a lo real.

El software que simule la formación de defectos en la solidificación del aluminio AA1100, no necesariamente indicara como evitar la aparición de estos. El usuario deberá analizar las variables y parámetros que intervienen en el proceso de colada continua para así conseguir los momentos donde se producen y conseguir una solución al problema. No tener una asignatura en el pensum de estudio de ingeniería mecánica de la Universidad José Antonio Páez que se encargue de explicar el uso de estos softwares hace que los usuarios al realizar estas simulaciones tengan que buscar asesoría externa para así poder lograr un estudio adecuado.

### **1.6 Alcance de la instigación.**

Encontrar las posibles causas o variables que hacen que se produzcan los defectos durante la solidificación en el proceso de colada continua de aluminio AA1100 mediante una herramienta computacional para así lograr disminuirlos y establecer parámetros para que estos aparezcan lo menos posible.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

El marco teórico es integrar el tema de la investigación con las teorías, enfoques teóricos, estudios y antecedentes en general que se refieren al problema de investigación. En tal sentido el marco teórico según Tamayo (2012) El marco teórico amplía la descripción del problema. Integra la teoría con la investigación y sus relaciones mutuas.

#### **2.1 Antecedentes de la investigación.**

Cordovez (2008) quien realizo el trabajo de grado titulado **Simulación del proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm** realizado en la Universidad de Carabobo, la cual tiene como objetivo general Simular el proceso de solidificación del aluminio en la colada continua para un espesor de 6mm la cual se logró con una investigación tipo exploratorio-explicativa y de campo. Los resultados obtenidos bajo el instrumento utilizado arrojaron que: 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:  $Y(\text{Calidad}) = -391.931 + (-114.293 * \text{Titanio\_Boro}) + (-16.3615 * \text{Flujo\_Argón}) + (0.496515 * \text{Temp}) + (100.963 * \text{Corona}) + (25.7644 * \text{Espesor})$  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. 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.

Esta investigación es de suma importancia para este trabajo puesto que analiza el modelo matemático necesario para poder tener en cuenta las variables que se usan al momento de simular este proceso de colada continua. Los resultados obtenidos por este investigador corroboran que es necesario los conocimientos matemáticos y estadísticos para poder tomar las previsiones necesarias causantes de los defectos que aparecen en el aluminio, como lo son: rechupes, porosidades, problemas microestructurales, grietas entre otros.

Así mismo, Fernández y Gómez (2003) realizaron el trabajo de grado titulado **Simulación del proceso de formación de porosidades en la solidificación de aleaciones de aluminio** realizado en la Universidad de Carabobo, la cual tiene como objetivo general Realizar una simulación del proceso de formación de porosidades en la solidificación de aleaciones de aluminio siendo esta una investigación de tipo descriptiva, pues intenta definir el comportamiento de una aleación de aluminio durante su solidificación, con especial atención en la formación de porosidades que allí ocurre. Los resultados obtenidos de la simulación arrojaron que: un paso indispensable en una simulación del proceso de solidificación es la simulación térmica (simulación para obtener la temperatura inicial de estabilización del molde).

Este paso permite comprobar que la curva de enfriamiento del aluminio que realiza el programa durante la simulación inicial coincide con la curva teórica, de manera de continuar con la simulación de porosidad. El programa Pro-Cast simula eficientemente el proceso de solidificación. Los resultados obtenidos indican que la zona más afectada por los diferentes tipos de porosidad es la cabeza del pistón.

Esta investigación es de gran utilidad ya que se basa en la simulación de la solidificación del aluminio con la herramienta computacional Pro-Cast, ya que dicha herramienta es la que permitirá realizar las simulaciones necesarias para alcanzar los objetivos en este trabajo.

Por otro lado, Lopez (2018), en su investigación titulada **Colada continua del aluminio y sus aleaciones: Una visión general**, realizado para la empresa CVG Aluminio de Carabobo S.A. (CVG ALUCASA). El objetivo de este trabajo fue realizar una guía en la cual se dé a entender cada parte del proceso de colada continua para aluminio y sus aleaciones, con la finalidad de mejorar la calidad de este proceso, evitando las pérdidas de material al realizar las láminas. También explica sobre el comportamiento del aluminio al ser fundido, conocer el proceso, filtración, principios de solidificación en la colada continua, calidad de la lámina de aluminio a través de TRC, defectos encontrados en aleaciones de aluminio, entre otros.

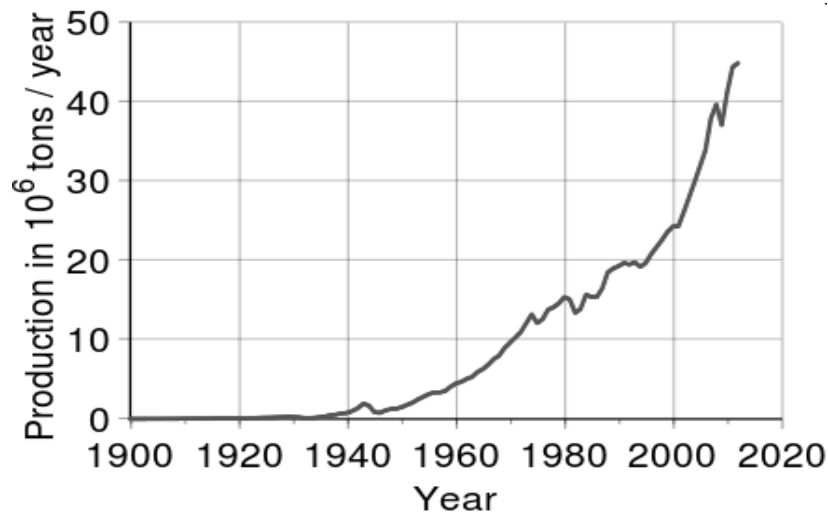
Esta investigación es de gran importancia ya que se basa en el proceso de colada continua de aluminio, todas las variables presentes en dicho proceso y ofrece una perspectiva al nivel industrial en Venezuela, dando así una base teórica para este trabajo.

## **2.2 Bases teóricas**

El aluminio, es el segundo elemento más abundante en la tierra, el cual se ha convertido en un competidor en aplicaciones de ingeniería en especial a partir de finales del siglo 19, en donde su demanda se basa en sus características consistentes con su calidad única y sus aleaciones, en donde sus beneficios crecen en la producción y uso de este metal. Este metal se extrae de un mineral llamado bauxita, a través de una serie de procesos. Dadas sus propiedades físicas, químicas y mecánicas el aluminio está presente en casi todo lo que nos rodea: aviones, barcos, coches, ventanas, envoltorios, latas de refresco, cables eléctricos, etc.

En los siglos pasados la producción de aluminio era tan costosa que se consideraba un metal precioso, llegando a ser comparado con la plata o el oro, inclusive en la exposición universal de París en 1855, se expusieron unas barras de aluminio junto a las joyas de la corona francesa, y el mismo emperador Napoleón se jactaba de tener una vajilla de aluminio para agasajar a sus invitados.

Fue quizás durante la II Guerra Mundial donde se tomó conciencia de su importancia a nivel industrial, y donde se gestó el disparadero de su uso máximo a nivel mundial (ver figura 1). Actualmente es segundo metal más usado y sus aplicaciones se han disparado a todos los ámbitos de nuestra vida, como son la alimentación, medicina, maquinaria, construcción, defensa, energía, etc. Posiblemente nos envuelve muchas veces sin darnos cuenta en todo lo que nos rodea.



**Figura 1** Evolución en la producción de aluminio.

Fuente <http://www.cofundi.com/es/breve-historia-del-aluminio>

### 2.2.1 El aluminio.

Elemento químico metálico, de símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26.9815, que pertenece al grupo IIIA del sistema periódico. El aluminio puro es blando y tiene poca resistencia mecánica, pero puede formar aleaciones con otros elementos para aumentar su resistencia y adquirir varias propiedades útiles. Las aleaciones de aluminio son ligeras, fuertes, y de fácil formación para muchos procesos de metalistería; son fáciles de ensamblar, fundir o maquinar y aceptan gran variedad de acabados. Por sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas, el aluminio se ha convertido en el metal no ferroso de mayor uso.

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la Tierra y en la Luna, pero nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza. Se halla ampliamente distribuido en las plantas y en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que

contienen aluminio en forma de minerales de aluminio silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos. En esas condiciones se forman las bauxitas que sirven de materia prima fundamental en la producción de aluminio.

Es un metal cuyo aprovechamiento en el campo de las construcciones mecánicas es relativamente reciente (1888-1890). Las principales cualidades de este metal son: ligereza (1/3 respecto al acero), mejor fusibilidad, buenas características para su mecanizado en máquinas herramientas y óptima capacidad de disipación de calor (aproximadamente, 3,5 veces superior a la del acero).

#### **2.2.1.1 Características físicas**

El aluminio es un elemento muy abundante en la naturaleza, solo aventajado por el oxígeno y el silicio. Se trata de un metal ligero, con una densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup>, y con un bajo punto de fusión (660 °C). Su color es grisáceo y refleja bien la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico (entre

#### **2.2.1.2 Características mecánicas**

Es un material blando (escala de Mohs: 2-3-4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 N/mm<sup>2</sup> (160-200 MPa). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre las operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura.

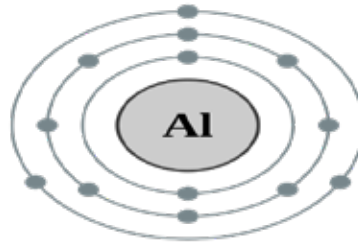
#### **2.2.1.3 Características químicas.**

La capa de valencia del aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que recubre el material, aislándolo de posteriores corrosiones. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer

otros metales de sus óxidos (Ver figura 2). Por lo demás, el aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reaccionan con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico.

**13: Aluminio**

**2,8,3**



**Figura 2** Estructura atómica del aluminio.

Fuente <http://kinder.shoutwiki.com/wiki/Aluminio>

### **2.2.2 El aluminio y sus aleaciones**

El aluminio, es el segundo elemento más abundante en la tierra, el cual se ha convertido en un competidor en aplicaciones de ingeniería en especial a partir de finales del siglo 19, en donde su demanda se basa en sus características consistentes con su calidad única y sus aleaciones, en donde sus beneficios crecen en la producción y uso de este metal. Las aleaciones de este material son ampliamente usadas en una variedad de aplicaciones tanto a nivel industrial como a otros niveles. Por ello pasamos a ver su clasificación, estados y designaciones más comunes:

Clasificación por su forjado:

Aluminios Forjados.

Aluminios Fundidos.

Clasificación por su estado:

F: Estado bruto. Es el metal tal y como sale del proceso de fabricación.

O: Recocido. Se aplica a materiales ya sea de forja como de fundición que han sufrido un recocido completo.

O1: Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.

O2: Sometido a tratamiento termo mecánico.

O3: Homogeneizado. Esta designación se aplica a los alambres y a las bandas de colada continua, que son sometidos a un tratamiento de difusión a alta temperatura.

W: Solución tratada térmicamente. Se aplica a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.

H: Estado de Acritud. Viene con materiales a los que se ha realizado un endurecimiento por deformación.

H1: Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior.

H2: Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad sin perder ductilidad.

H3: Acritud y estabilizado.

H4: Acritud y lacado o pintado. Son aleaciones endurecidas en frío y que pueden sufrir un cierto recocido en el tratamiento de curado de la capa de pintura o laca dada.

En esta clasificación se usa un segundo dígito (en ocasiones es necesario un tercer dígito) que indica el grado de endurecimiento por deformación.

H X1X: 1/8 de dureza.

H X2X: 1/4 cuarto de dureza.

H X3X: 3/8 de dureza.

H X4X: 1/2 dureza.

H X5X: 5/8 de dureza.

H X6X: 3/4 de dureza.

H X7X: 7/8 de dureza.

H X8X: Dureza total.

H X9X: Muy duro.

T: Denomina a materiales que han sido endurecidos por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior. Las designaciones de W y T solo se aplican a aleaciones de aluminio ya de forja o de fundición que sea termo tratables

T1: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural.

T2: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.

T3: Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.

T4: Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío.

T5: Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecida artificialmente.

T6: Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Son designados de esta forma los productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión) no son endurecidos en frío, sino que sufren un envejecimiento artificial.

T7: Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.

T8: Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

T9: Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío.

T10: Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta una condición sustancialmente estable. Existen variantes del estado T, a estas variantes se les añaden a la T dos dígitos. Estos dos dígitos son específicos para cada producto y se usan para estado de alivio de tensiones en productos fabricados mediante el proceso de forja.

### 2.2.3 Series de aluminios según sus aleantes

Las aleaciones de aluminio (tanto las forjadas como las moldeadas) se clasifican en función del elemento aleante usado (al menos el que esté en mayor proporción). Los elementos aleantes más usados se observan en la figura 3.

	<b>Serie</b>	<b>Aleante/s principal/es</b>
<b>Aleaciones para conformado</b>	1000	Aluminios puros (99% mín)
	2000	Cu
	3000	Mn
	4000	Si
	5000	Mg
	6000	Si, Mg
	7000	Zn
	8000	otros (Si, Fe, Cu, Mn, Mg)
<b>Aleaciones para piezas fundidas</b>	100.0	Al 99% mín
	200.0	Cu
	300.0	Si, Cu, Mg
	400.0	Si
	500.0	Mg
	600.0	Series poco usadas
	700.0	Zn
	800.0	Sn

**Figura 3** Series de aluminios.

Fuente Lopez (2018)

### 2.2.4 Fusión del aluminio y sus aleantes mediante hornos.

#### 2.2.4.1 Hornos metalúrgicos.

El tipo y la disposición de los hornos de fusión constituyen factores particularmente importantes en lo que concierne a la calidad metalúrgica y el costo de fabricación de los semiproductos fundidos destinados a la transformación. Las condiciones técnicas y económicas que deben de cumplir los hornos de fusión y de colada pueden resumirse de la siguiente manera:

Cualidades de orden térmico:

Fusión en el menor tiempo posible.

Uniformidad de temperatura.

Regulación precisa de la temperatura (importante sobre todo en los hornos de colada).

Máximo rendimiento térmico.

Cualidades de orden físico y químico:

Oxidación mínima del metal.

La menor contaminación posible debida al gas de combustión (hornos de llama), a la atmósfera del horno, a los refractarios y a los diversos accesorios.

Cualidades de fácil explotación:

Facilidad de carga.

Comodidad en la ejecución de las operaciones de fabricación (agitación, desnatado) o de conservación.

Facilidad de colada.

Condiciones económicas

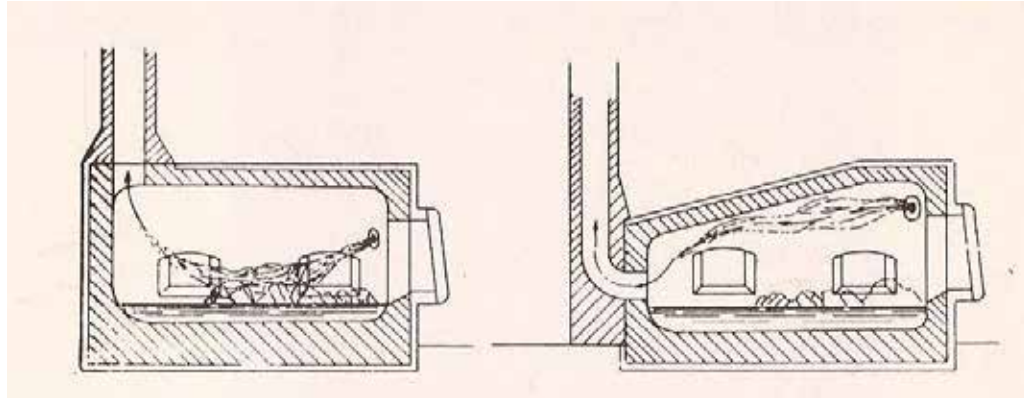
El menor precio del inmovilizado del material de fusión y de colada.

Gastos mínimos de explotación, en particular, pérdidas de fuego, consumo de energía, mano de obra.

Los menores gastos posibles de conservación.

#### **2.2.4.2 Horno fusor**

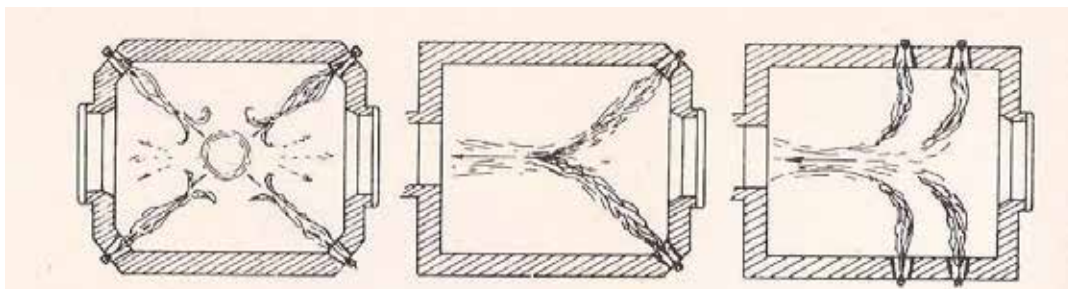
Está concebido para el calentamiento y fusión rápida de la carga, así como para el tratamiento de elaboración del metal. El tipo de horno fusor empleado en el área de fundición y colada es de tipo “Reverbero” (ver figura 4), este tipo de hornos es aconsejable cuando se necesitan frecuentes cambios de aleación, así como para asegurar grandes producciones y refundir cargas compuestas de elementos pesados y voluminosos. En estos hornos la energía necesaria para la fusión se produce por uno o varios quemadores, alimentados por combustibles líquidos o gaseosos, cuyas llamas inciden directamente sobre la carga metálica. Los gases de combustión provocan, en la atmósfera del horno, movimientos intensos de convección que mejoran los cambios térmicos con el metal que se funde.



**Figura 4** Horno de fusión de reverbero.

Fuente Lopez (2018)

Estos hornos llevan a veces una solera inclinada, sobre la que se introduce la carga metálica. El metal fluye por el hogar a medida que transcurre la fusión, permaneciendo los óxidos en la solera que periódicamente es removida. Además, presentan forma más o menos rectangular, en la disposición más normal los quemadores están colocados sobre uno de los lados pequeños del horno y los gases de la combustión se evacuan por una chimenea situada en el lado opuesto (ver figura 5). Se debe adoptar una disposición de los quemadores en la que el recorrido de los gases de la combustión en el horno antes de su evacuación por la chimenea sea el más largo posible, de manera que se incrementen los intercambios térmicos con la carga metálica.



**Figura 5** Horno de reverbero de lecho interno.

Fuente Lopez (2018)

Se pueden mejorar sensiblemente los intercambios térmicos, inclinando la bóveda ante los quemadores. Esta técnica permite aumentar la energía irradiada por la

bóveda y aproximar los gases de la combustión a la carga, antes de su evacuación por la chimenea; de esta manera, pueden ceder de manera útil una parte más importante de su calor sensible. Los productos de combustión, al estar en contacto con la carga que se va a fundir y con el baño, provocan cierta oxidación del metal (pérdidas por fusión) y absorción de hidrógeno. Es posible reducir bastante estos inconvenientes, situando los quemadores en el fondo de la cámara de combustión y evitando dirigir la llama contra la carga.

Al momento de realizar la carga, esta debe realizarse con un balance de 70-100% de aluminio primario y 0-30% de chatarra, la carga se realiza en el siguiente orden:

Chatarra liviana.

Chatarra gruesa.

Aluminio primario + elementos aleantes.

La razón de agregar la carga en el orden descrito anteriormente es debido a que el área superficial de la chatarra es mayor que su volumen, por esta razón, la chatarra tenderá a oxidarse con mayor facilidad y producirá una mayor cantidad de escoria, este efecto ocurre con menor gravedad a medida de que el área superficial del material a fundir sea menor que su volumen, a su vez sirve como colchón para agregar el aluminio primario y de esta manera salvaguardar la integridad del refractario del piso, por último se agrega los elementos aleantes, aunque pueden ser agregados junto al aluminio primario, los elementos aleantes pertenecientes a la aleación AA-8011 (hierro 1538°C y silicio 1414°C) poseen un punto de fusión mayor que el del aluminio (660°C), por lo tanto, el mecanismo de la dilución de estos elementos en el aluminio líquido es por difusión de sólido en líquido, por lo que se requiere, una temperatura de fusión y tiempo suficiente para que se complete la difusión de los elementos aleantes en el baño metálico, pues, el fenómeno de difusión depende directamente de la temperatura y tiempo del proceso.

### **2.2.4.3 Horno de retención (Horno de colada)**

En estos hornos es importante conseguir una buena homogenización, una buena precisión de la temperatura del baño y una atmósfera que contenga la menor cantidad posible de hidrógeno y de vapor de agua, así como la inmovilidad del baño durante la espera. De manera casi general, en USA e Inglaterra se utilizan por razones económicas, hornos de retención de hogar fijo, calentados por combustibles líquidos o gaseosos. También, se puede mejorar la regularidad del caudal de colada y las salidas de escorias que constituyen los puntos débiles de estos hornos. Estos hornos están concebidos para perfeccionar el tratamiento del metal por una espera a baja temperatura y para obtener una temperatura de colada tan precisa como sea posible.

### **2.2.5 Refinamiento del grano**

Normalmente una estructura de grano fina equiaxial en colada de aleaciones de aluminio. El tipo y tamaño de grano es determinado por la composición de la aleación, velocidad de solidificación y la adición de aleaciones madres (refinadores de grano) el cual contienen partículas Inter metálicas que proveen el fenómeno de nucleación heterogénea. Un tamaño de grano muy fino promueve mejoras en el metal solidificado por la minimización de contracción durante la solidificación, fractura en caliente y porosidad, las ventajas de un efectivo refinador de grano son:

Incremento en resistencia a la rotura.

Mejora en las propiedades mecánicas (esfuerzo de cedencia, cantidad de endurecimiento por deformación, resistencia tensil máxima, ductilidad, tenacidad a la fractura, temperatura de transición dúctil/frágil y soldabilidad).

Aumento de la presión hermética.

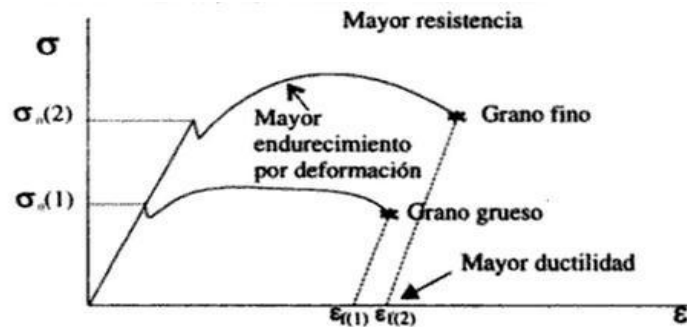
Mejor respuesta a los tratamientos térmicos.

Mejor apariencia en composición química, propiedades electroquímicas y acabado superficial.

Estas partículas se forman en un rango de temperatura entre el liquidus y solidus, por lo que un grano fino promueve a la formación de partículas finas y mejor

distribuidas. Debido a que la mayoría de los precipitados duros son formados luego de la solidificación, estos se forman preferentemente en los límites de grano, además, afectan profundamente la resistencia a la rotura y las propiedades mecánicas en estructuras de grano grande.

Por todo lo antes expuesto, la adición de la aleación madre de Ti-B, se realiza por medio de inyección en el canal de colada al metal líquido continuamente con la finalidad de obtener un grano muy fino en la lámina de colada continua, en la figura 6, se observa esquemáticamente el efecto del tamaño de grano en las propiedades mecánicas para una misma aleación en un diagrama esfuerzo-deformación.

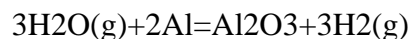


**Figura 6** Efecto del tamaño de grano en el comportamiento de un metal en un diagrama esfuerzo- deformación.

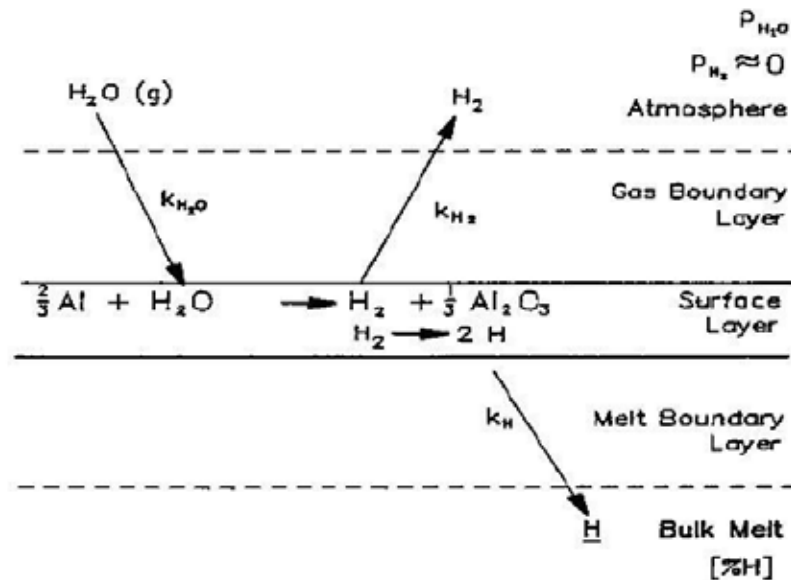
Fuente Lopez (2018)

### 2.2.6 Proceso de desgasificado

El único elemento capaz de disolverse a través del aluminio es el hidrógeno. El hidrógeno en el aluminio líquido posee una relación de equilibrio con el gas de hidrógeno del medio ambiente, el aluminio líquido reacciona con el vapor de agua a altas temperatura y genera gas de hidrógeno.



Este vapor de agua es la fuente del hidrógeno en el aluminio, en las fundiciones de aluminio frecuentemente en temporadas de humedad se experimenta mayores problemas de porosidad por hidrógeno (ver figura 7). Esto es debido a la reacción química descrita en la parte de arriba.



**Figura 7** Mecanismo de disolución de hidrógeno en el aluminio líquido proveniente de la humedad de la atmósfera.

Fuente Lopez (2018)

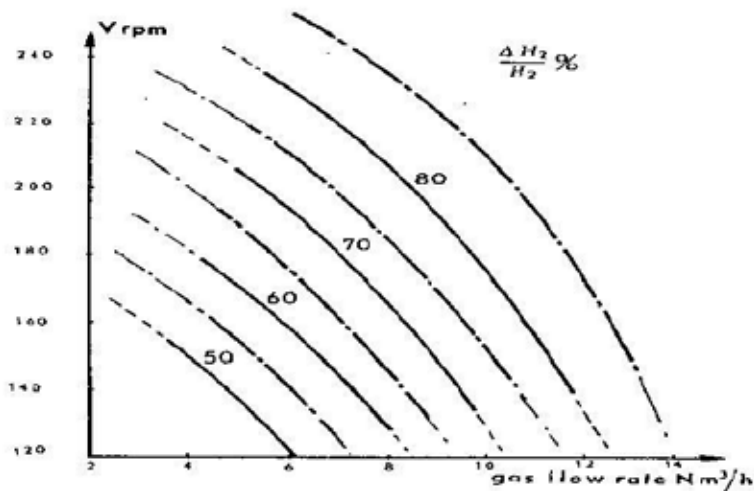
Entre la intercara del aluminio líquido y la atmósfera, se observan varios procesos involucrados como se muestra en la figura 8. El vapor de agua se difunde través de la capa superficial de óxidos del baño metálico hacia la superficie del metal, las moléculas absorbidas reaccionan con el aluminio dejando así que parte del hidrógeno vuelva a la atmósfera y la otra parte se disocie como hidrógeno en forma atómica, el cual posteriormente se difunde hasta el interior del aluminio líquido, lo que ocasiona porosidad en el metal al ser solidificado. La remoción de hidrógeno del aluminio líquido se basa en la relación de equilibrio entre el hidrógeno en el baño metálico y la presión parcial de hidrógeno presente en la atmósfera tal como se muestra en la siguiente ecuación.



Esto quiere decir que cuando el aluminio líquido se mantiene bajo una atmósfera de gas inerte, en el vacío en ambos el cual el  $P_{H_2}=0$ , o la inyección de burbujas de gas inerte el cual no posee gas de hidrógeno ( $P_{H_2}=0$ ) antes de la inyección,

el hidrógeno en el aluminio líquido se difunde a la superficie del metal líquido y se transfiere al gas o al vacío.

El procesamiento para la remoción del hidrógeno presente en el aluminio líquido se realiza mediante la inyección de un gas inerte en el mismo a través de un eje de grafito el cual gira a una velocidad dada, los sistemas actuales son SNIF y ALPUR, en donde la eficiencia del sistema ALPUR ( $e = \frac{[\%H]_{inlet} - [\%H]_{outlet}}{[\%H]_{inlet}}$ ) depende del flujo de gas inyectado y de la velocidad de rotación (RPM). Para la mayoría de los sistemas de desgasificado, se ha registrado niveles inferiores de 0,15mL/100g de hidrógeno.



**Figura 8** Curvas de eficiencia del desgasificado mediante el sistema Alpur.  
Fuente Lopez (2018)

### 2.2.6.1 Beneficios del desgasificado.

Retirar la porosidad del aluminio líquido, ya que, la presencia de porosidad en el aluminio solidificado trae como consecuencia la disminución de las características mecánicas y mal aspecto en el acabado superficial (partes pulidas). El sistema de desgasificado no solo ayuda a la remoción de hidrógeno en aluminio, sino también, en menor medida, a remover inclusiones presentes en el aluminio y/o sus aleaciones, ya que, estas mismas suben a la superficie del metal líquido y quedan retenidas en la escoria.

### **2.2.7 Proceso de filtrado**

Las aleaciones de aluminio, en especial con tendencias a la oxidación, a menudo contienen impurezas (inclusiones no metálicas) que son perjudiciales a las propiedades físicas, mecánicas, eléctricas y estéticas. La filtración se ha convertido en un paso importante para la remoción de impurezas sólidas. El proceso de filtración consiste en hacer pasar el aluminio líquido a través de un dispositivo poroso (un filtro) en el cual las inclusiones contenidas en el flujo del metal son atrapadas o capturadas por uno o más mecanismos de filtración descritos posteriormente.

El material de filtro por su cuenta debe tener suficiente integridad (fuerza, refractariedad, resistencia al choque térmico y resistencia a la corrosión) y de esta manera, no será destruido por el metal líquido antes de que su función sea completada. Consecuentemente, la mayoría de los medios filtrantes son materiales cerámicos en una variedad de configuraciones. Existen distintos tipos de inclusiones de fase sólida en las aleaciones de aluminio en estado líquido:

Óxidos ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ).

Spinels ( $Mg_2AlO_4$ ).

Carburos ( $Al_3C_4$ ,  $TiC$ ).

Intermetálicos ( $MnAl_3$ ,  $FeAl_3$ ).

Nitruros ( $AlN$ ).

Inclusiones de exgenos refractarios (óxidos y/o carburos de hierro, silicio, aluminio, etc.).

Estas inclusiones poseen una serie de complejas formulaciones químicas y densidades que van del más liviano al más pesado que es el propio aluminio, así como también en formas y tamaños.

#### **2.2.7.1 Fundamentos teóricos del proceso de filtrado.**

Dos mecanismos de filtración ocurren para la remoción de inclusiones, estas son: filtración de modo torta y filtración de cama profunda.

Filtración de modo torta.

La remoción de las inclusiones ocurre mediante el atrapamiento mecánico de inclusiones en la superficie del filtro, las capturadas por este método. Estas partículas se aglomeran hasta formar una torta sobre la superficie del filtro, que además ayuda a filtrar más inclusiones a lo largo del recorrido del metal líquido.

Filtración profunda.

Es el modo de filtrado más importante que prevalece en la filtración por cama.

La tortuosidad provee un incremento de probabilidad de un mecanismo de captura de partículas en dos pasos involucrando el transporte desde el flujo del metal líquido y el atrapamiento a la superficie del filtro. Particularmente en filtros que poseen superficies irregulares, el fenómeno de transferencia de fluidos de inercia, sedimentación, intercepción de partículas y difusión entran en juego. Las partículas traídas entran en contacto con las paredes del medio filtrante son atacadas entre sí o son retenidas por uno o más mecanismos:

Gravedad, fricción.

Atrapamiento físico.

Enlaces químicos.

Fuerzas de Van der Waals.

Fuerzas electrostáticas.

La eficiencia del filtrado es influenciada por varios factores, primero, la naturaleza de la aleación debe ser considerada, la cantidad de inclusiones, sus tamaños, formas y distribución. Segundo, las condiciones dinámicas encontradas por el filtro tendrán un pronunciado efecto:

Velocidad baja del metal líquido generalmente resulta en una mayor eficiencia, porque es cuando ocurre la mayor probabilidad de captura en el filtro.

Mayor área superficial incrementa la eficiencia del filtrado.

Los filtros que proveen un balance fuerte entre filtración por torta y profunda proveen mayor eficiencia de filtrado.

Mayor longitud o espesor del filtro permite aumentar la probabilidad de capturas de inclusiones y por consiguiente una mayor eficiencia en el filtrado.

Existen distintos tipos de filtros tales como pantallas de metal o fibra de vidrio, desgasificado rotativo, filtros de cama, filtros de partículas permanentes, filtros de cartucho y filtros de espuma cerámica.

#### **2.2.7.2 Beneficios del filtrado**

Mayor fluidez del metal líquido.

Reduce los defectos superficiales (líneas de inclusión, huecos, etc.).

Mayor resistencia a la corrosión.

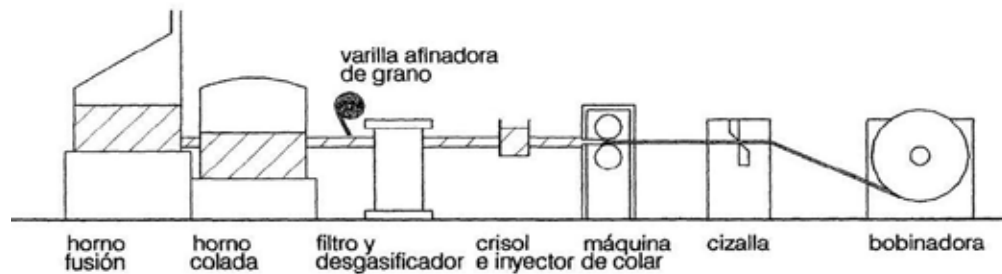
Disminuye sitios para la nucleación de porosidad por hidrógeno (microporosidad y micro rechupes).

Mejora de las propiedades mecánicas.

Aumento de la productividad, ya que, se mejora la cantidad de chatarra y reduce el trabajo.

#### **2.2.8 Colada continua del aluminio**

Esta es la última etapa del proceso de fundición y colada, es donde el metal líquido se transforma en una lámina de aluminio con un ancho determinado, en esta etapa se involucra una gran cantidad de variables de proceso las cuales deben controlarse con la finalidad de obtener una geometría idónea y una excelente calidad del producto. Obteniendo información sobre el proceso en algunas empresas, podemos entender que la disposición de la línea de producción del área de fundición y colada puede ser de la siguiente manera, como se diseñó en la empresa CVG ALUCASA, dicho diseño se muestra esquemáticamente en la siguiente figura (ver figura 9).

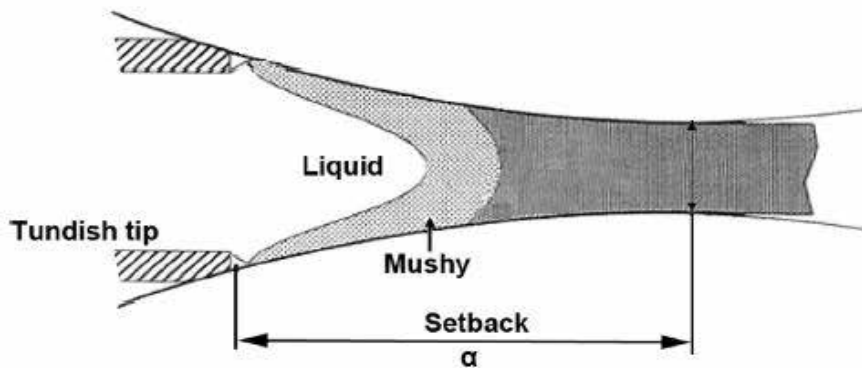


**Figura 9** Representación esquemática de línea de colada del área de fundición y colada de CVG ALUCASA.

Fuente Lopez (2018)

### 2.2.8.1 Boquilla (tundish tip).

Elemento refractario el cual ayuda a distribuir el flujo de metal líquido al ancho deseado de la lámina. Este elemento es alimentado por la caja de colada y debe situarse a una longitud del punto de salida de los cilindros de 48mm a 57mm, dicha distancia se denomina “Arco de contacto” (ver figura 10).



**Figura 10**

Fuente Lopez (2018)

### 2.2.8.2 Cilindros de colada.

Son las herramientas utilizadas para llevar a cabo el proceso de colada continua de aluminio, dichos cilindros están constituidos por dos elementos que son el “Alma” y la “Camisa” en donde el “Alma” está situada en la parte interior de la camisa (ver figura 11), estas herramientas son refrigeradas por agua que circula a través del “Alma” y se disminuye la temperatura en la parte externa de la “Camisa” por transferencia de

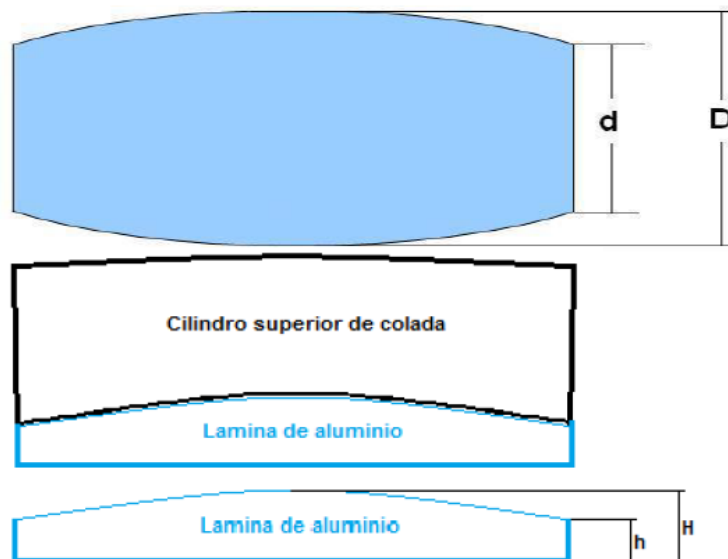
calor (conducción y convección), a su vez, el cilindro también pierde calor por radiación pero en menor cantidad.



**Figura 11** Camisa + Alma = Cilindro de colada

Fuente Lopez (2018)

Por otra parte, se tiene la corona mecánica de los cilindros, la corona mecánica se utiliza para contrarrestar el efecto de la presión metalostática que ejerce el aluminio líquido al cilindro y de esta manera obtener un perfil de banda positivo (ver figura 12). La forma de calcular la corona mecánica es:  $C_m = D - d$ , y la corona de la banda es  $C = H - h$  (se debe tomar el h más pequeño de ambos extremos para el cálculo).



**Figura 12** Ilustración esquemática de los cilindros de colada.

Fuente Lopez (2018)

Los cilindros de colada cuando están en funcionamiento, son susceptibles a sufrir fatiga térmica, mientras el cilindro se encuentra en funcionamiento, este se ve sometido a cargas axiales y esfuerzos radiales, lo que se puede resumir en esfuerzos combinados, por otra parte, en una revolución, los cilindros por un breve instante se

encuentran en contacto con el aluminio líquido, en ese momento el cilindro absorbe la mayor cantidad de calor necesaria para solidificar el aluminio, posterior a este paso, el agua que circula internamente por el cilindro (a través del alma), enfría nuevamente la superficie de la camisa con la finalidad de que en la siguiente revolución exista un diferencial de temperatura suficientemente grande como para solidificar nuevamente el aluminio líquido, a estos cambios de temperatura se les conoce como “choque térmico” y la fatiga térmica es generada por la aplicación de esfuerzos combinados y choques térmicos en los cilindros.

La fatiga térmica trae como resultado pequeñas grietas en la superficie del cilindro, las cuales deben ser removidas cuando las mismas se ven apreciablemente grandes, ya que, como toda grieta, sufre un crecimiento de forma exponencial el cual puede traer como consecuencia la fractura del cilindro. En la siguiente figura (13) se muestra los distintos parámetros que influyen en la fatiga térmica.

Fatiga térmica	Parámetros	
↓	Temperatura del agua	↑
	Velocidad	↑
	Temperatura en la caja de colada	↓
	Arco de contacto	↓
	Espesor de la lamina	↓

**Figura 13** Influencia de los parámetros del proceso para minimizar la fatiga térmica.

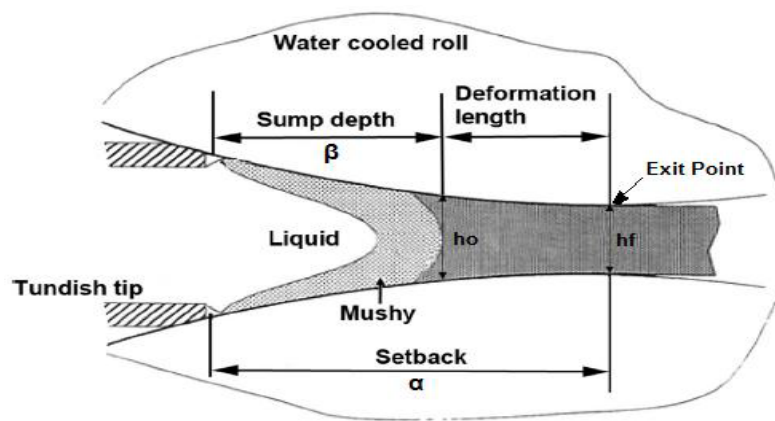
Fuente Lopez (2018)

### 2.2.8.3 Proceso de solidificación

La obtención de la lámina a través de colada continua de doble cilindros horizontales, de forma general, consiste en hacer pasar un flujo de aluminio líquido entre los cilindros por medio de un alimentador (Boquilla / Caster Tip), con la finalidad de permitir el contacto del aluminio líquido con los cilindros en un tiempo suficiente para que se complete la solidificación y de esta manera poder obtener una lámina con un ancho y espesor determinado en estado sólido.

El proceso de solidificación (ver figura 14) se genera gracias a la extracción de calor que inicia en la superficie de los cilindros, que posteriormente da pie a los mecanismos de nucleación y crecimiento, a medida que continua saliendo de la boquilla metal líquido se procede al crecimiento de granos equiaxiales dendríticos el cual es finalmente completado de 10 mm a 20 mm desde la salida de la boquilla, abarcando la región del líquido y la región pastosa (Sólido + líquido), la longitud que contempla dichas regiones se conoce como profundidad del y es la distancia requerida para solidificar la lámina.

en conjunto definen la zona de laminación en caliente o longitud de deformación, en donde es extraída la mayor cantidad de calor de la lámina a través de los cilindros.



**Figura 14** Solidificación durante el proceso de TRC.

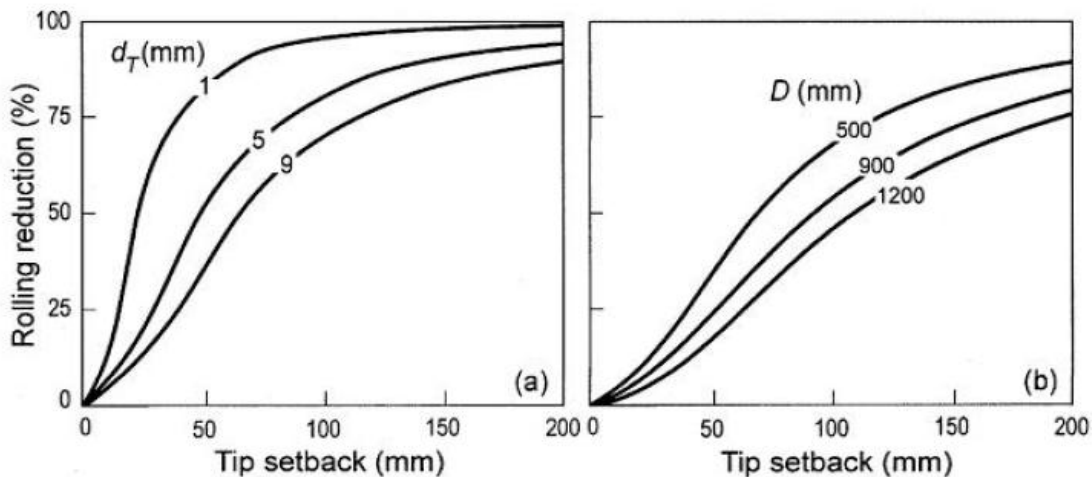
Fuente Lopez (2018)

En conjunto con el diámetro de los cilindros, D, el arco de contacto determina la cantidad de deformación en TRC el cual el espesor inicial de la lámina  $h_0$ , en el punto final de solidificación es reducido al espesor  $h_f$ , el cual es donde emerge de la

la siguiente fórmula:

$$\varepsilon(\%) = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \approx \frac{(\alpha - \beta)^2}{(\alpha - \beta)^2 + h_f \cdot D} \times 100$$

El efecto del arco de contacto sobre el grado de deformación en caliente durante el proceso de TRC, la influencia de los diámetros de los cilindros y la abertura de estos se muestra en la figura 15. Es importante resaltar que la lámina de aluminio siempre solidifica a un predeterminado arco de contacto, el cual genera una reducción de espesor de al menos de 20-30%.



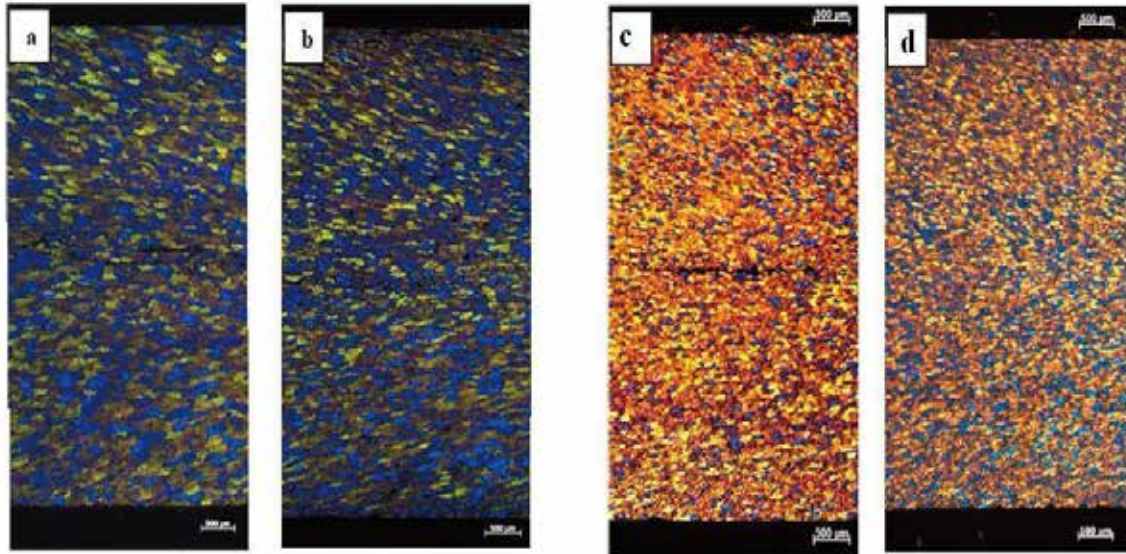
**Figura 15**

sobre el grado de reducción en TRC.

Fuente Lopez (2018)

La microestructura obtenida en el proceso de colada continua se puede observar en la figura 16, en donde se puede apreciar hacia las caras superior e inferior granos

alargados producto del efecto de laminación en caliente, y granos con menor deformación hacia el centro de la lámina, es importante resaltar que la orientación de los granos es en dirección del proceso de colada continua.



**Figura 16** Microestructuras de la sección transversal de láminas de aluminio de colada continua.

Fuente Lopez (2018)

#### **2.2.8.4 Calidad de la lamina de aluminio a través de TRC.**

La calidad del material está estrechamente relacionada con el Sump Depth (ver figura 17), la minimización del Sump Depth juega un papel importante en cuanto a la calidad de la lámina proveniente de colada continua, el Sump Depth es función de las variables de proceso tales como:

Temperatura del metal líquido.

Coefficiente de transferencia de calor de lámina/cilindros.

Velocidad de la máquina.

Arco de contacto.

Composición de la aleación.

Sump Depth	Parámetros	
↓	Temperatura del metal líquido	↓
	Coefficiente de transferencia de calor	↑
	Velocidad de la máquina	↓
	Arco de contacto	↑
	Precargas *	↓

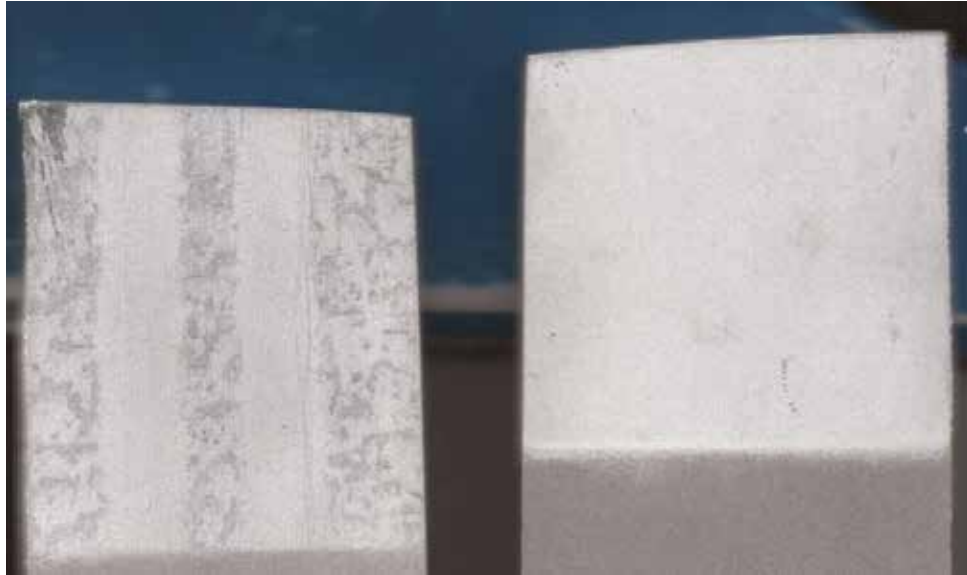
**Figura 17** Influencia de los parámetros del proceso para obtener un bajo Sump Depth. (\*): Afecta en un proceso llamado “segregación inversa” si las precargas son elevadas.

Fuente Lopez (2018)

### 2.2.9 Defectos en el proceso de colada continua

Macro segregación o segregación inversa.

Ocurre en distancias grandes abarcando la superficie y la parte central del material, teniendo una mayor concentración de metal difundido en la superficie en comparación a la región central, no es posible tratarse por homogeneización para eliminar la distribución sin equilibrio. Puede ser tratado por trabajo en caliente, reconstruyendo la pieza nuevamente. El defecto que se puede apreciar de la figura 18 corresponde a macro segregación en la superficie de la lámina de colada continua, el origen de dicho defecto puede ser ocasionado por el efecto de “segregación inversa”, otra posibilidad es altas temperaturas del metal líquido, el cual ocasiona una solidificación no homogénea, dicho defecto está relacionado con el Sump Depth.

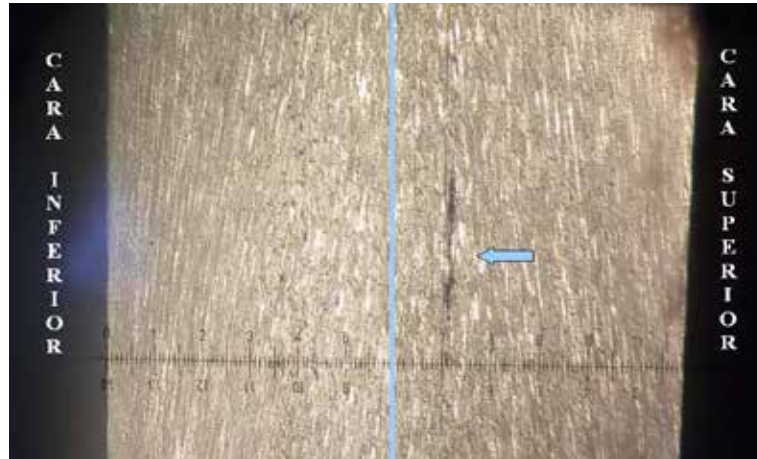


**Figura 18** a) Macro segregación observada en la lámina de colada continua, b) muestra sin presencia de macro segregación, muestras atacadas con HCl.

Fuente Lopez (2018)

#### Línea de segregación

La línea de segregación va estrechamente relacionada con el Sump Depth, por lo que la minimización de esta zona es de suma importancia, sin embargo, la desaparición de este defecto es casi imposible, ya que, allí se aloja la mayor cantidad de precipitados producto del rechazo de soluto hacia el centro de la lámina por ser la última zona en solidificar, por lo que el espesor de esta dependerá, como se mencionó anteriormente, del Sump Depth. La línea de segregación se debe ubicar en el centro del espesor de la lámina, por lo que si se encuentra desplazada hacia arriba o hacia abajo es necesario ajustar las temperaturas del agua adecuada para centrar la línea de segregación (ver figura 19).



**Figura 19** Línea de segregación desplazada (flecha azul) hacia la cara superior de la banda.

Fuente Lopez (2018)

En la siguiente figura (ver figura 20) se puede observar que acción a tomar para centrar una línea de segregación que se encuentre desplazada.

<b>Desplazamiento de la línea de segregación</b>	<b>Acción a tomar</b>
Desplazada hacia la cara superior	Disminuir la temperatura del agua del cilindro inferior // Aumentar la temperatura del agua del cilindro superior
Sin desplazamiento	N/A
Desplazada hacia la cara inferior	Disminuir la temperatura del agua del cilindro superior // Aumentar la temperatura del agua del cilindro inferior

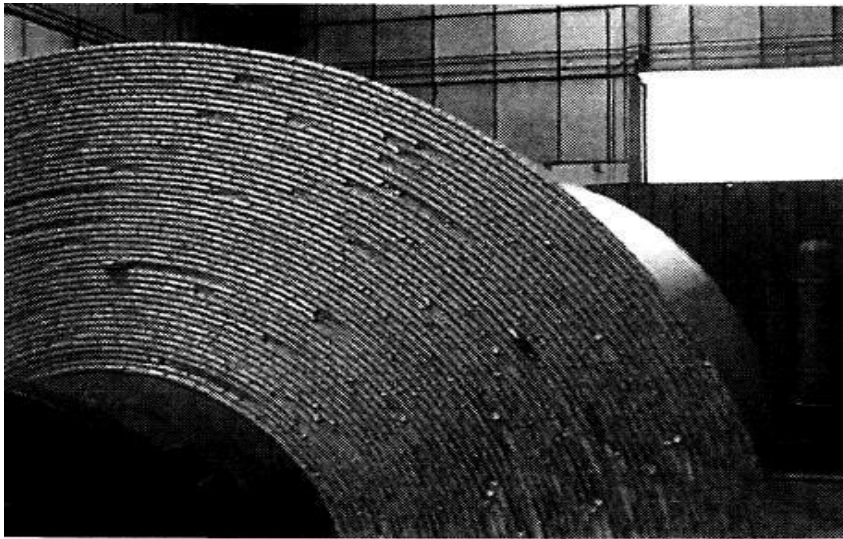
**Figura 20** Acción a tomar al momento de encontrarse con una línea de segregación desplazada.

Fuente Lopez (2018)

### **Grietas en los bordes**

Las grietas (ver figura 21) en los bordes aparecen en la colada de muchas aleaciones y pueden afectar a una zona de varios milímetros. El aluminio

comercialmente puro presenta este fenómeno en pequeña escala, pero en aleaciones tales como la 8011, 8006, 8014 o 3003 aparece con más intensidad y puede obligar a desperdiciar hasta 40mm de ambos bordes del ancho total de la banda.



**Figura 21** Grietas en los bordes de colada continua.

Fuente Lopez (2018)

Otras variables importantes del proceso son las dimensiones finales de la lámina, tales como variación longitudinal, perfil, ancho, espesores y corona, en donde estas dimensiones son críticas para la calidad de la lámina en las siguientes etapas del proceso. El perfil de banda depende principalmente del acabado superficial en el proceso de rectificado del cilindro, es decir, la ovalidad y excentricidad. Por otra parte, la variación longitudinal dependerá de tres factores que son la ovalidad, excentricidad y el estado de los rodamientos de las chumaceras.

Por tal razón, es de suma importancia, la evaluación dimensional de la lámina mediante un análisis de espesores con la finalidad de obtener las condiciones reales a la cual se encuentra el proceso. La variación longitudinal y el perfil son variables que no son fáciles de controlar mientras la máquina se encuentra operativa, a continuación, se muestra una lista con los parámetros que rigen el comportamiento de las variables mencionadas:

Sistema de enfriamiento interno de los cilindros de colada.

Deformación de las camisas de los cilindros de colada.

Apriete inadecuado de los cilindros de colada.

Falla de los rodamientos.

Calibración inadecuada de la abertura de los cilindros.

Variación en el sistema de precarga y de velocidad de la máquina.

Variación del nivel de metal en la caja de colada.

El ancho de la lámina depende básicamente de: variación del nivel de metal en la caja de colada y colocación inadecuada de las cuñas en la boquilla.

### **2.2.10 Simulación**

En las ciencias, la simulación es el artificio contextual que referencia la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos un método perfecto para la enseñanza y aprendizaje. La simulación es aplicada en campos de la investigación como la química, la biología, la matemática y la física, estudios comparativos de elementos de la naturaleza necesitan experimentos en los que se evalué el comportamiento, lo mismo sucede en la sociedad y el entorno cotidiano. Cuando es un método científico se deben seguir una serie de procedimientos e indicaciones para cumplirlo:

Definición del sistema, en el que se establece cuáles son los elementos que se deben simular, incluyendo movimientos y aspectos relevantes.

Formulación del modelo, se crea o se imita el espacio en el que se produce el evento o fenómeno.

Colección de datos, al concluir el proceso de simulación, se tiene la información del proceso como si fuera el original o al menos el aproximado.

Verificación, comparación y comprobación de los datos obtenidos en la simulación y los datos de la versión original.

Interpretación, se evalúa y se le da uso a los datos obtenidos para así constatar que los datos obtenidos son en realidad los deseados.

Documentación, los científicos soportan la información obtenida como datos guardados para así servir como apoyo a nuevas generaciones de experimentos científicos que continúen la labor.

### **2.2.11 Herramienta computacional.**

Una herramienta computacional son todos los medios de software que se pueden utilizar para un determinado fin, procesadores de texto, base de datos, simuladores, hojas de cálculos; son algunas herramientas computacionales que permiten la máxima calidad en su uso ya que por medio de estas herramientas se facilitan los trabajos diarios en ambos laborales de cualquier índole.

Para la efectiva selección de esta herramienta se debe tener en cuenta las necesidades de nuestros objetivos y la actualización del mercado respecto a estas herramientas, debido a la gran competencia que pueden brindar actualmente las empresas diseñadoras de software, además de conocer las características de diferentes herramientas computacionales para lograr realizar una comparación competente de dichas herramientas, algunas de las características esenciales que debe tener un software de simulación actual deben ser:

Creación de modelos en tres dimensiones de manera virtual. Nos ofrecen la capacidad de llevar a cabo gran variedad de simulaciones.

Ofrecen al usuario la capacidad de crear en segundo plano todo un conjunto de documentación y bases de datos asociadas a la simulación.

Ofrecen al usuario la capacidad de crear en segundo plano todo un conjunto de documentación y bases de datos asociadas a la simulación.

Análisis múltiple de defectos, tanto en la concepción de la pieza como en la forma de insertar la colada, respiraderos, mazarotas etc.

Cálculo de velocidades de enfriamiento, velocidades de entrada del fluido, zonas de endurecimiento y demás parámetros de gran utilidad al usuario.

Nos da una imagen en 3D del modelo, de la forma en la que entra la colada y de las zonas críticas.

Los últimos programas incluyen su propia gestión de archivos interna, donde se salvaguardan las distintas versiones y permite el trabajo de distintos usuarios sobre un mismo proyecto.

Incluyen librerías con datos industriales, comerciales etc. Nos permite hacer un uso más rápido.

Incorporan sistemas de compatibilización de archivos, es decir, podemos exportar diseños o parámetros de otros programas distintos y sobre ellos trabajar en el nuestro.

Algunas de las herramientas computacionales para la simulación de fundición de materiales son las siguientes:

#### **2.2.11.1 Magmasoft.**

Magmasoft (ver figura 22) es una herramienta de optimización integral para mejorar la calidad de la producción de metales, optimizar las condiciones del proceso y reducir los costes de producción. En consecuencia, se pueden establecer robustos parámetros de proceso y diseños de fundición optimizados, para todos los materiales y procesos de fundición, incluyendo el tratamiento térmico y la metalurgia de la fusión de manera eficiente y exhaustiva al mismo tiempo, utilizando la metodología de diseño virtual de experimentos y optimización autónoma. Un diseño modular de software cubre toda la cadena de procesos de los componentes de fundición. El software se puede aplicar para optimizar la robustez del proceso y la calidad de las piezas, desde el diseño conceptual hasta el diseño del componente final, durante el diseño de las herramientas y el prototipo, hasta el proceso de producción y tratamiento térmico. Este programa ofrece los siguientes beneficios principales:

Soporta todos los materiales de fundición y todos los aspectos de la fabricación de fundición, incluyendo la fusión y la metalurgia, el patrón y la elaboración, limpieza y reparación.

Ofrece un campo virtual de pruebas para la reducción de defectos de metales con altos grados de libertad sin riesgo de producción.

Establece puntos de operación optimizados por calidad, rendimiento y coste.  
Identifica condiciones de proceso óptimas para ventanas de proceso robustas.  
Permite una toma de decisiones más rápida para establecer un ahorro de tiempo para todas las partes involucradas.

Potencia la gestión de la calidad generando una comprensión sistemática de cómo la variabilidad del proceso afecta a la calidad.

Ofrece información fiable a los diseñadores para el desarrollo robusto de productos y procesos.

Según nos indica el fabricante, la estructura modular contiene las siguientes funcionalidades para una simulación integral:

Una interfaz gráfica de usuario común para todos los módulos.

Una perspectiva de gestión de proyectos para el manejo de proyectos de simulación y optimización.

Ajuste automático de geometrías para la simulación.

Mapeo integral de procesos con acceso directo a todos los materiales, pasos del proceso y la configuración de simulación correspondiente.

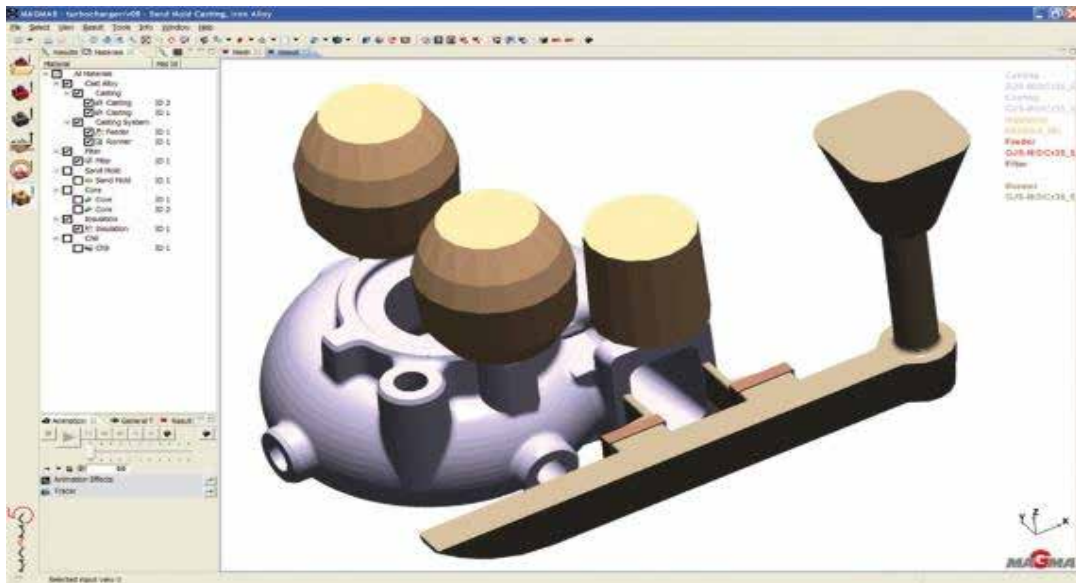
Definición de diseños y parámetros virtuales para las ejecuciones de optimización.

Programas de simulación para el cálculo de las aplicaciones de llenado, solidificación, enfriamiento y colada.

Evaluación interactiva y automática de resultados: se pueden abrir y editar varias perspectivas al mismo tiempo.

Perspectiva de resultados para la visualización y evaluación completas de los resultados de la simulación.

Fácil evaluación cuantitativa del diseño virtual de experimentos o de las ejecuciones de optimización.



**Figura 22** Magmasoft interface.

Fuente Magmasoft web site

### 2.2.11.2 ProCast.

El software de simulación de fundición de ESI, ProCAST( ver figura 23), es una solución completa que permite la evaluación predictiva de todo el proceso de colada incluyendo defectos de llenado y solidificación, propiedades mecánicas y distorsión de piezas complejas. Permite una rápida visualización de los cambios de diseño y permite una toma de decisiones correcta en una fase temprana del proceso de fabricación.

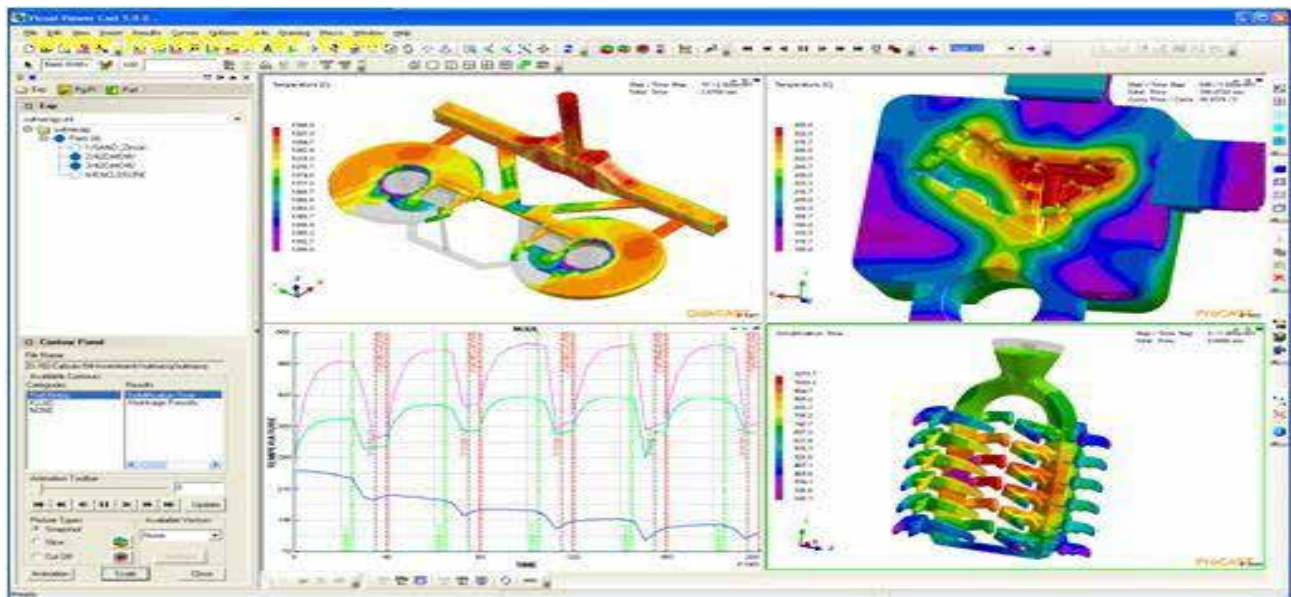
ProCAST proporciona una solución completa para la simulación de procesos de colada continua y semi-continua. El software puede simular las condiciones de estado estacionario, así como las etapas inicial y final de los procesos de colada continua. El módulo inverso permite el cálculo automático de los parámetros del material o del proceso en función de las temperaturas medidas en determinados lugares o tiempos. El enfriamiento primario y secundario puede determinarse mediante modelado inverso.

También ofrece una capacidad única: las funciones de usuario permiten a los usuarios finales más avanzados programar sus requisitos de proceso específicos. Por ejemplo, las funciones de usuario permiten definir las condiciones de contorno como tiempo, temperatura y dependencia del espacio para modelar con precisión cualquier proceso específico de colada. Métodos de fundición que puede analizar este programa:

Colada continua  
Colada semi-contiua  
Moldeo en arena  
Espuma perdida  
Soplado del núcleo  
Modelado semisólido  
Centrífuga

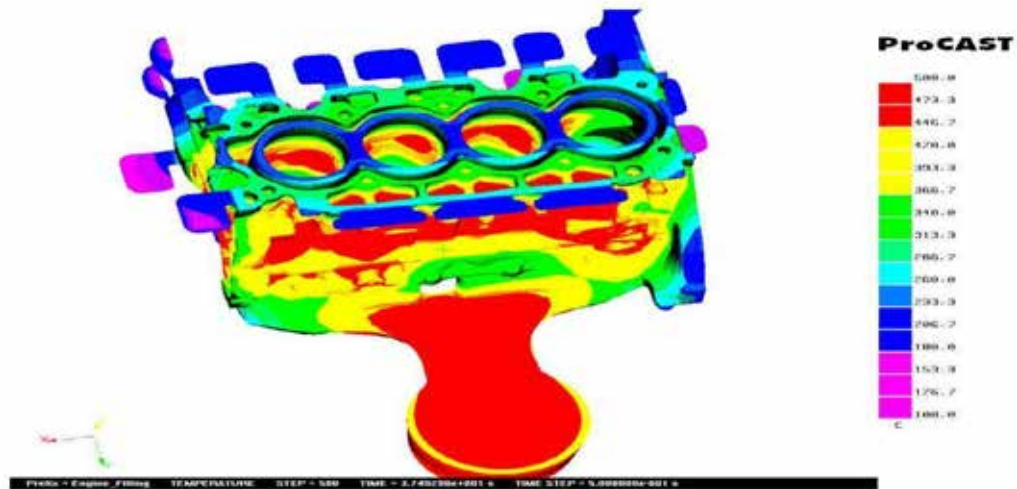
También incluye las siguientes capacidades:

Bases de datos termodinámicas (ver figura 24).  
Análisis de las tensiones producidas por la fundición.  
Análisis de acumulación de gas y microporosidades.  
Microestructura y tratamiento térmico.  
Análisis de la estructura del grano

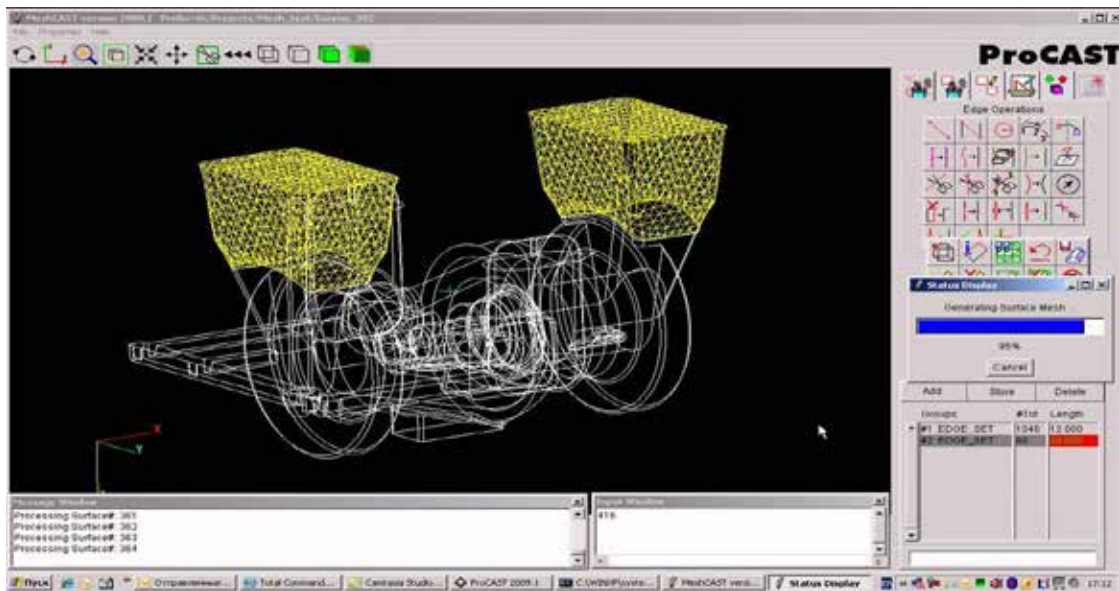


**Figura 23** ProCast interfaz.

Fuente ProCast web site



**Figura 24** Proceso de simulación con Procast.  
Fuente Procast web site



**Figura 25** Ejemplo de la creación del mallado.  
Fuente Procast web site

### 2.2.11.3 CastDesigner

Cast-Designer (ver figura 26) es un software diseñado para la fundición, que incluye el diseño y la evaluación de piezas de fundición, el diseño de moldes y la validación y optimización de producción. Este programa podría ser utilizado para la fundición de alta presión, baja presión, fundición por gravedad de arena, fundición de gravedad para el molde permanente, fundición de inversión y muchos otros.

Se trata de un programa de casting rápido y una herramienta de análisis basada en el diseño inicial y la tecnología de análisis. El núcleo de la tecnología de diseño y análisis es permitir a los ingenieros llevar a cabo el análisis de flujo, transferencia de calor y solidificación mediante la combinación de sistemas robustos y tecnología CAE del software que estamos estudiando.

**Función por gravedad:** Como componente principal del sistema Cast-Designer, Gravity Casting Designer es una herramienta de diseño eficiente y flexible que ayuda a los diseñadores a desarrollar un sistema vertical y de alimentación, un sistema de mazarotas y un sistema de vertido para la fundición por gravedad en poco tiempo. El ingeniero puede convertir rápidamente la idea de diseño en un modelo 3D para la evaluación del mismo. Cast-Designer permite al usuario administrar y alterar fácilmente los parámetros para diferentes etapas, sea cual sea la fase de diseño del concepto inicial, la etapa de diseño de la realización intermedia o la etapa de diseño final. Es posible crear el sistema de colada completo de una manera rápida y no excesivamente compleja.

Con el CPI (una función del programa), el usuario puede detectar ubicaciones potenciales en las que podrían producirse problemas de llenado y solidificación para el sistema de apertura de puerta y el diseño de desbordamiento. El usuario no necesita ser un experto en simulación para usarlo. El CPI puede ser utilizado por cualquier fabricante de moldes, fabricante de herramientas o diseñador de piezas, para reducir el tiempo de desarrollo del producto.

**Calculador del canal de enfriamiento:** El programa incluye una calculadora de canal de refrigeración, que puede ayudar al usuario a calcular la longitud total del canal de refrigeración con una tasa de producción dada. La utilidad considera muchos factores tales como la masa parcial y la aleación de colada, el tamaño del molde, la velocidad de producción, el diámetro del canal de

enfriamiento, la velocidad de flujo del medio y la tasa de transmisión del calor. El resultado final será el diámetro del canal de enfriamiento y la longitud total.

**Análisis del sistema de refrigeración en línea:** Para optimizar el diseño del sistema de refrigeración, los métodos numéricos para la simulación de fundición son relativamente maduros gracias a la gran contribución de los trabajos académicos, a las empresas comerciales de CAE y al desarrollo continuo de hardware informático. Sin embargo, antes de la simulación numérica, el usuario debe tener todos los datos CAD en 3D, como el canal de enfriamiento, geometría del molde, sistema de mazarotas etc. Esto por lo general es difícil en la primera etapa, ya que muchas simulaciones necesitan unas pruebas para revisar su funcionamiento.

Se introduce un método de análisis del sistema de enfriamiento en línea para ayudar al diseñador a comprobar el diseño del sistema de refrigeración en una etapa muy temprana. Este método está totalmente integrado en la interfaz de diseño del sistema de refrigeración.

El análisis del sistema de enfriamiento considerará la característica de la geometría de la pieza, el número de canales de refrigeración y su ubicación, también el efecto por calor. El resultado final puede mostrar la variación de calor entre la pieza de colada y el canal de refrigeración. Como resultado del análisis, el usuario puede ajustar o rediseñar inmediatamente el canal de enfriamiento.

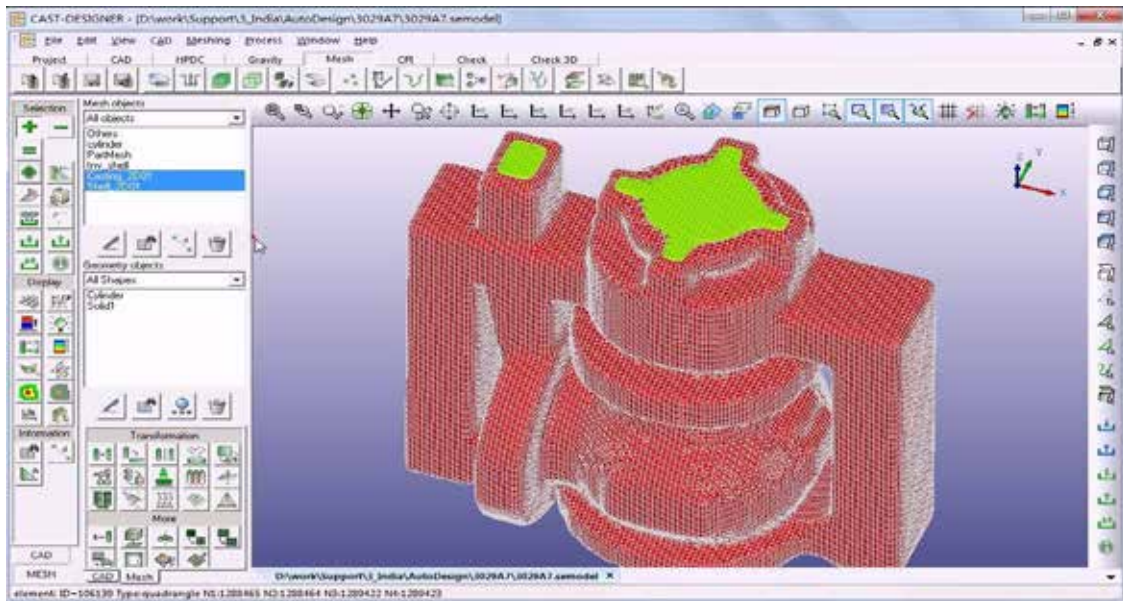
Con el módulo de tensión mecánica, el usuario puede realizar el análisis de tensión y deformación y podríamos analizar los siguientes puntos:

Distribución de tensiones de fundición y molde.

Deformación y distorsión de la pieza.

Formación de huecos entre la colada y el molde.

Predecir cambios elásticos.



**Figura 26** Interfaz de CastDesigner  
Fuente CastDesigner web site

### 2.3 Definición de términos.

**Aleación:** Una aleación es la combinación de dos o más elementos metálicos, para constituir un nuevo material que tenga las propiedades de sus ingredientes.

**Colada continua:** La colada continua se trata de un proceso metalúrgico que permite el control continuo de la transformación del metal líquido a alta temperatura a sólido para la obtención de productos semiterminados.

**Solidificación:** Es el proceso y el resultado de solidificar (lograr que un líquido se vuelva sólido). Puede definirse la solidificación, por lo tanto, como un proceso de tipo físico que implica un cambio de estado de una materia.

**Refinación:** La refinación o refino es el proceso de purificación de una sustancia química obtenida muchas veces a partir de un recurso natural.

**Desgasificado:** Remoción de aire de un líquido, generalmente por métodos de vacío o ultrasonido.

**Simulación:** Una simulación es imitar algo real, un estado de asuntos o un proceso. El acto de simular algo generalmente requiere representar ciertas

características claves o comportamiento de un sistema físico o abstracto escogido.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Naturaleza de la investigación.**

En la presente investigación se posee un enfoque cuantitativo, ya que, es necesario realizar una recolección de datos la cual vaya enfocada hacia la simulación, en nuestro proceso de colada continua para examinar los posibles resultados arrojados por nuestra “herramienta computacional”. Según Baptista P., Fernández C., y Hernández R. (2006) concuerdan que: El enfoque cuantitativo utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecidas previamente, además confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población.

También de acuerdo con Tamayo (2012) la metodología cuantitativa, consiste en el contraste de teorías ya existentes a partir de una serie de hipótesis surgidas de la misma, siendo necesario obtener una muestra, ya sea en forma aleatoria o discriminada, pero representativa de una población o fenómeno objeto de estudio.

#### **3.2 Tipo de investigación.**

Este estudio se apoyará en un proyecto factible, Arias, (2012), señala: “Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema practico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización”- (p.134). Por lo tanto, el estudio permitirá percibir la información de una forma directa desde donde se desenvuelven los acontecimientos, efectuando las observaciones y anotaciones de los datos de las simulaciones en estudio para posteriormente efectuar el análisis de la problemática planteada y así poder

llegar a detectar las causas que producen los defectos en la aleación de aluminio en estudio.

### **3.3 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. Según Arias (2006) el nivel de investigación viene dado por la profundidad con que se estudia una problemática. El tipo de investigación a realizar determina los niveles que es preciso desarrollar. La presente investigación atiende a un nivel Descriptivo Para este caso basándose en el estudio de las necesidades se presenta la interpretación de los hechos y la solución propuesta. También posee un nivel explicativo, ya que establece relaciones causales entre algunas variables que inciden en la presencia del problema de investigación.

El trabajo de investigación presente se ha definido como una investigación de tipo Descriptiva, busca “comprender la descripción, registro y análisis de los procesos o fenómenos. Trabaja sobre realidades de hecho y busca presentar una interpretación correcta”. (Tamayo y Tamayo. 2012. p.46) pues intenta definir el comportamiento de una aleación de Aluminio AA1100 durante su solidificación del proceso de colada continua, con especial atención en la formación de defectos que se producen. También posee un nivel explicativo, ya que establece relaciones causales entre algunas variables que inciden en la presencia del problema de investigación.

### **3.4 Población.**

Según Hurtado y Toro (2000), señala que la población es el total de los individuos o elementos a quienes se refiere la investigación, es decir, todos los elementos que se van a estudiar, por ello también se le llama universo. Por lo que, para este estudio, la investigación estará sujeta a los procesos de colada continua de aluminio.

### **3.5 Muestra.**

Tamayo y Tamayo (2012), afirma que la muestra es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico. Ya que la población resulta ser grande y por la dificultad que presenta encontrar a todos los que la integran el proceso de colada continua de las aleaciones de aluminio, se tomara como muestra a la aleación de aluminio AA1100.

### **3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

Una vez delimitado el problema y definido el tipo, nivel y diseño de investigación a realizarse, se establecen los métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos que serán utilizados durante la ejecución de la investigación, en función de los objetivos planteados ya que serán estos los que permitirán el análisis del problema, para así emitir las conclusiones y recomendaciones para la solución de este.

#### **3.6.1 La técnica.**

Arias (2006) las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información. Para esta investigación se prevé utilizar las técnicas de la observación directa y la encuesta.

##### **La observación directa**

Según Sabino (2004) explica “Es el uso sistemático de los sentidos en la búsqueda de datos que se necesitan para resolver un problema de investigación” donde el investigador forma parte activa del grupo observado (Pág.59).

#### **3.6.2 El Instrumento de recolección de datos.**

Según Arias (2006), “señala que los instrumentos son las herramientas que se utilizan para la recolección, almacenamiento y procesamiento de la información recogida.” (p 44). Así mismo Tamayo y Tamayo (2012) define que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p. 69). Los instrumentos giran en torno a las técnicas que los investigadores han de seleccionar para su investigación; en concreto, van a ser éstos el físico que contuvo toda la información recabada.

### **3.6.2.1 Recolección de fuentes primarias:**

Las fuentes primarias son aquellas que se refieren a la información recolectada por medio de cuestionarios, encuestas y/o entrevistas, observación directa, con el fin de satisfacer las necesidades inmediatas de la investigación. Para Sabino (2004): “Los datos primarios son aquellos que el investigador obtiene de la realidad, recolectándolos con sus propios instrumentos” (p. 115). Es decir, son los datos obtenidos de primera mano y por sus propios medios por el investigador.

### **3.6.2.2 Recolección de fuentes secundarias:**

Las fuentes secundarias son aquellas investigaciones realizadas con anterioridad y que han sido recolectadas y analizadas con el propósito de sustentar las bases teóricas y la, ejecución de la investigación. Según Sabino (2004): los datos secundarios “Son registros escritos que proceden también de un contacto con la práctica, pero que ya han sido recogidos y muchas veces procesados por otros investigadores” (p. 115).

## **3.7 Fases de la investigación.**

Para la presente investigación se siguió un proceso lógico-metodológico en el cual se diseñaron varias fases a saber:

### **Fase I: Seleccionar la herramienta computacional más adecuada para simular el proceso de colada continua.**

**Descripción:** En esta fase se seleccionará la herramienta computacional, esto se realizará haciendo una revisión bibliográfica para establecer la herramienta a utilizar para el estudio de formación de defectos, esta deberá contar con: modalización matemática, simulación en software de computación, simulación teórica, estudio del proceso de solidificación, etc. También se tomará en cuenta que tan accesibles sean económica y geográficamente, hablando.

### **Fase II: Analizar los defectos que sucedan en el proceso de colada continua del aluminio AA1100.**

**Descripción:** En esta fase se realizará un estudio a las aleaciones de aluminio AA1100 para profundizar los conocimientos de los defectos que se forman durante su

solidificación: causas, tipos, modelos que expliquen su formación, procedimientos para detectarlos y consecuencias.

**Fase III: Encontrar las posibles causas de los defectos de la solidificación del proceso de colada continua.**

**Descripción:** En esta fase se estudiarán el porqué de las apariciones de los defectos en el proceso de colada continua definiendo así las variables a tomar en cuenta para poder llevar a cabo la simulación.

**Fase IV: Estudiar detalladamente cada defecto para encontrar disminuirlos.**

**Descripción:** Se analizará la información provista de la herramienta computacional a través de la simulación realizada y se estudiaran cada defecto de manera detallada para para establecer condiciones importantes de como disminuirlos.

**Fase V: Comparar resultados de simulación con resultados reales para verificar exactitud de los resultados.**

**Descripción:** Una vez obtenidos y estudiados los resultados de la simulación, en esta fase se hará una comparación de resultados con resultados para verificar la exactitud de las simulaciones realizadas.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### **4.1 Fase I: Seleccionar la herramienta computacional más adecuada para simular el proceso de colada continua.**

Para esta fase es necesario tener un modelo matemático teórico, un modelo geométrico y la tecnología aplicada (herramientas disponibles)

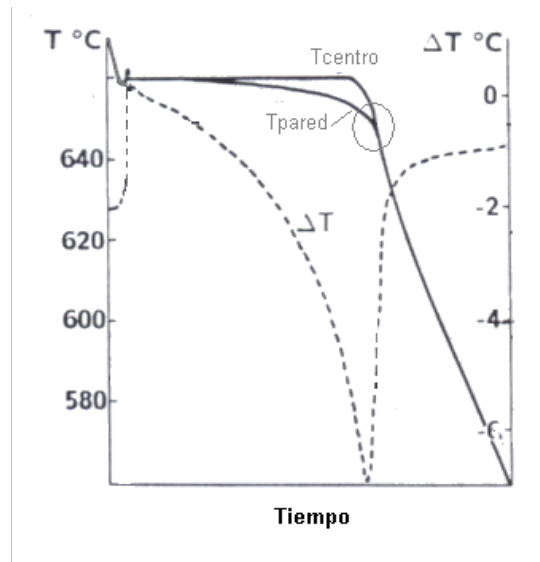
##### **4.1.1 Modelo matemático teórico.**

En el proceso de solidificación y en el de formación de defectos, se ven involucradas complejas ecuaciones matemáticas que explican el proceso, este modelo matemático teórico incluye una parte importante de estas ecuaciones que intentan abarcar la mayor parte de los parámetros que influyen en este proceso. Con finalidad de guiar al lector se ha separado el modelo matemático en dos partes: proceso de solidificación y proceso de formación de defectos.

##### **4.1.1.1 Proceso de solidificación.**

En la solidificación de la aleación de aluminio, cuando esta se inicia la transferencia de calor un gradiente de temperatura aparece en el proceso,

la solidificación ocurre, la temperatura cae como se puede observar en la figura 27 y la diferencia entre las temperaturas tiende a igualarse con la temperatura del ambiente, esto es debido a que disminuye la rata de evolución de calor latente y aumenta la conductividad térmica a través del sólido, en relación del líquido.



**Figura 27** Cambios de Temperatura durante la solidificación.

Fuente Fernández y Gómez (2003)

En el estado inicial de la solidificación, las dendritas están casi en su totalidad desarrollan una temperatura constante, luego el gradiente de temperatura se incrementa, en el caso de las aleaciones de forma más lenta que en el aluminio puro. Cuando las dendritas han penetrado todo el volumen de la muestra, la temperatura cae, así como la diferencia de temperatura, debido a la conducción través de éstas, que tienden a igualar la temperatura entre la pared y el centro.

Durante este proceso de equilibrio de temperatura, el término de la derivada central de la ecuación 1.1 toma un valor, a pesar de esto el crecimiento de las dendritas puede continuar durante ese intervalo de tiempo. En sistemas más complejos reacciones secundarias eutécticas, descenso del calor latente, también causan caídas en las curvas de enfriamiento, trayendo así incrementos en el valor de la derivada, mientras el calor pasa por la muestra. Una vez considerada la transferencia de calor incluyendo la evaluación del calor latente se obtiene:

$$* \text{ — } ( * ) \text{ — } \quad (1.1)$$

Donde:

T: Temperatura  
 Kcc: Conductividad Térmica  
 fs: fracción volumétrica de sólido  
 Cp: Calor específico  
 t: tiempo

La expresión puede ser dividida en dos partes, la primera es aquella que es independiente de la evolución del calor latente. Cuando no ocurre

condiciones el flujo de calor en la muestra es proporcional a  $\frac{dT}{dt}$ , por consiguiente, la derivada puede ser usada como una medida de la rata de transferencia de calor fuera del sistema. Usando al menos una aproximación en la derivada como función de la temperatura antes y después de la solidificación, el flujo de calor fuera de la muestra puede ser calculado en cada momento durante la solidificación, siempre y cuando la relación de temperatura/tiempo haya sido calculada de manera adecuada. Vamos a definir esta función como  $(\frac{dT}{dt})$ .

Considerando que la Ecuación 1.1 es dependiente del calor latente; se tiene:

$$* \text{ — } * \text{ — } \quad (1.2)$$

Que puede escribirse como:

$$(—) \text{ — } \quad (1.3)$$

El flujo de calor en la muestra solidificándose, sigue ahora la siguiente expresión:

$$-\dot{Q} = \rho V \left( \frac{dT}{dt} + \frac{dX}{dt} \right) \quad (1.4)$$

O

$$\dot{Q} = \rho V \left( \frac{dT}{dt} + \frac{dX}{dt} \right) \quad (1.5)$$

De acuerdo con las Ecuaciones 1.3 y 1.5 se tiene que:

$$\dot{Q} = \rho V \left( \frac{dT}{dt} + \frac{dX}{dt} \right) \quad (1.6)$$

Tomando en cuenta que la sumatoria en el tiempo:

$$\int_0^t \dot{Q} dt = \rho V \left( \Delta T + \Delta X \right) \quad (1.7)$$

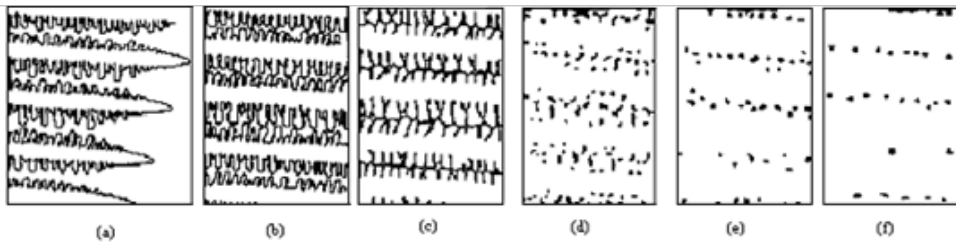
$\left( \frac{Q}{V} \right)$ ,  $C_p$  es la capacidad calorífica de todo el sistema. Mientras que la muestra sea una mezcla de fases sólidas y líquidas, es necesario calcular la capacidad calorífica total de la muestra para cada momento durante la solidificación partiendo de las fracciones de sólido y líquido, las cuales no son conocidas. Si el calor de solidificación y la capacidad calorífica específica de sólido y líquido son conocidas, sería posible calcular que cantidad de sólido se ha formado en un momento dado, sin embargo, para una primera aproximación la fracción de sólido puede ser considerada linealmente proporcional al tiempo de solidificación:

$$\frac{X}{X_{\infty}} = \frac{t}{t_{\infty}} \quad (1.8)$$

Donde  $t$  es el tiempo en donde empieza la solidificación,

$$* \quad (1 \quad ) \quad (1.9)$$

La herramienta computacional durante la simulación deberá realizar iteraciones sucesivas con nuevos  $f_s$  para obtener mejores valores. La diferencia entre  $C_p$  para sólido y líquido es despreciable. La aleación va solidificando direccionalmente, a medida que transcurre el tiempo la fracción de solidificación ( $f_s$ ) va aumentando hasta llegar a 1, en la Figura 28 se aprecia el aspecto de la zona pastosa observado con un microscopio de transmisión de luz con varios aumentos. La herramienta simulara el efecto del fluido en la zona pastosa y lleva la velocidad de este a cero cuando la aleación está completamente solidificada ( $f_s=1$ ).



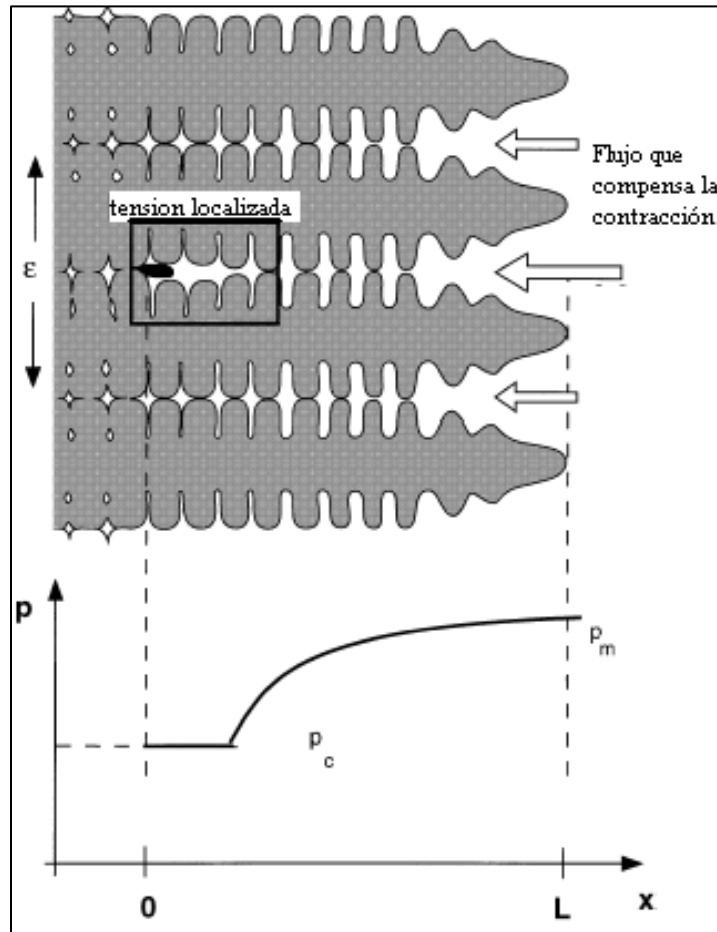
**Figura 28** Observaciones microscópicas de una aleación que ha solidificado direccionalmente. a)  $t = 0s$ ,  $f_s = 0.00$ ; b)  $t = 10s$ ,  $f_s = 0.70$ ; c)  $t = 30s$ ,  $f_s = 0.82$ ; d)  $t = 75s$ ,  $f_s = 0.94$ ; e)  $t = 210s$ ,  $f_s = 0.97$ ; f)  $t = 1500s$ ,  $f_s = 0.98$ .

Fuente Fernández y Gómez (2003)

Las dendritas crecen con una gradiente Térmico ( $G$ ) y con una velocidad

que fluir de derecha a izquierda con la finalidad de compensar la contracción. La presión en el líquido interdendrítico es representada esquemáticamente en la Figura 29, esta disminuye desde la presión metalostática ( ) cercana a las puntas de las dendritas, si la presión cae por debajo de la presión de cavitación

( ), un espacio vacío se puede formar (región negra en la Figura ) y puede ser un indicio de una grieta posteriormente.



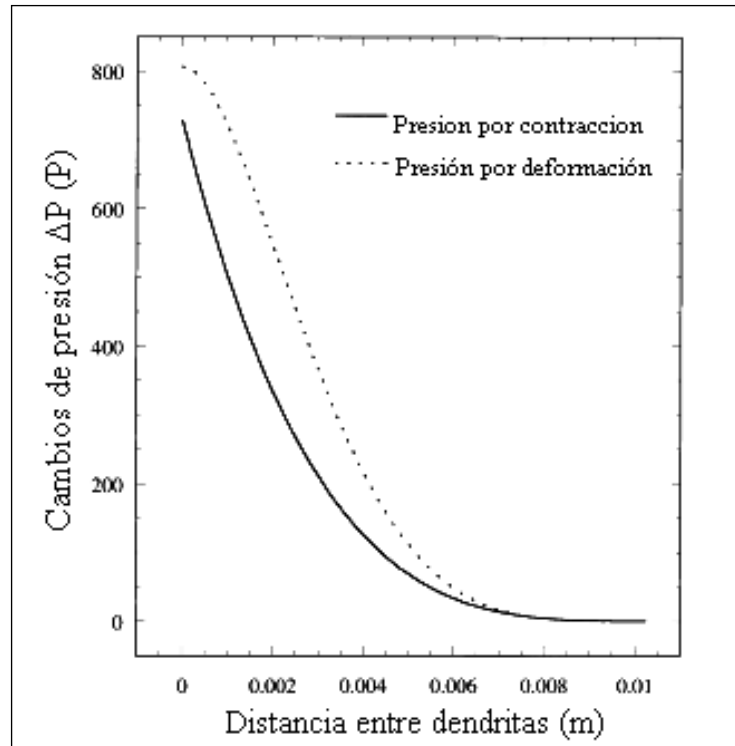
**Figura 29** Esquema de variación de Presión a lo largo de las dendritas. Formación de un precipitado por tensión transmitida entre las dendritas  
Fuente Fernández y Gómez (2003)

De acuerdo con esto, se tiene para las presiones:

$$\min \quad (1.10)$$

$$\max \quad (1.11)$$

$p_{sh}$  son los cambios de presión asociados a la deformación y contracción respectivamente. Estos cambios de presión varían de acuerdo con el aumento de la distancia de las dendritas que ocurre a medida que avanza la solidificación. (ver Figura 30).

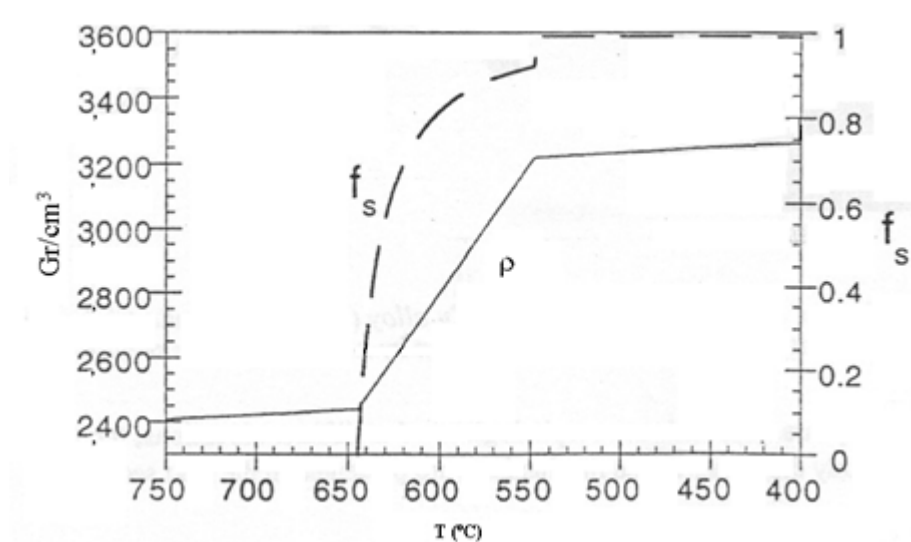


**Figura 30:** Comportamiento de cambios de presión durante la solidificación.

Fuente Fernández y Gómez (2003)

En todos los metales y aleaciones, los cambios de temperatura producen cambios volumétricos, el metal se contrae durante esta fase de transición, debido a que la densidad de la fase líquida es menor que la de la fase sólida (Figura 31), lo cual induce a una succión del metal líquido a una disminución de la presión dinámica. Esta presión normalmente no está compensada por el aumento de la presión metalostática asociada con la altura del metal líquido.

La contracción volumétrica total de una pieza es la contracción del estado sólido, la contracción líquido-sólido, y la contracción líquida. Cuando la cantidad de calor extraída es muy intensa, en la superficie del molde se forma una capa de sólido antes de que sea extraído todo el sobrecalentamiento y esta capa crea una especie de coraza que luego, al producirse la reducción de volumen del metal líquido generará un mayor volumen de cavidades de poros. Por ello en el estudio de porosidades es importante estudiar esta depresión, basándose en la solución de la ecuación de Darcy, acompañada de un balance de masa.



**Figura 31** Cambios de densidad en el Aluminio con la Temperatura.  
Fuente Fernández y Gómez (2003)

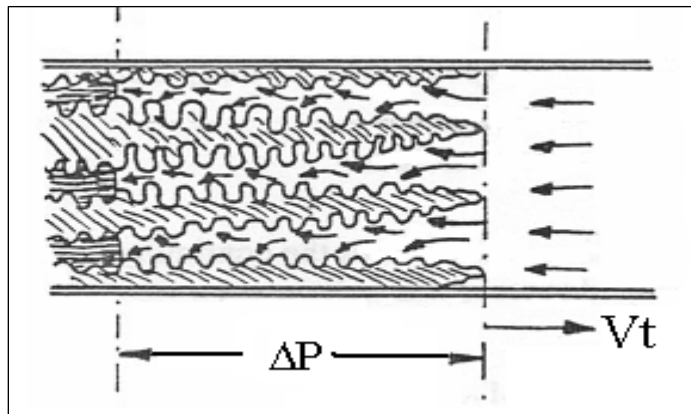
#### 4.1.1.2 Proceso de formación de defectos.

Las porosidades pueden ser de gas o porosidades por contracción, la formación de porosidades de contracción se basa en la solución de un modelo que involucra la ley de Darcy y balance de masa, así como del criterio de Niyama, que se explican a continuación.

##### 4.1.1.2.1 Ley de Darcy y balance de masa.

La ley de Darcy explica el flujo del metal a través de una zona pastosa o de la zona blanda, estas dos situaciones son bastante diferentes. En el primer caso

la presión hidrostática debe superar la sinuosidad y permeabilidad de un medio poroso, considerando que, en la solidificación, ésta es la región de la fase dendrítica porosa que evoluciona con el tiempo y crea una succión del líquido. Básicamente Darcy relaciona la velocidad del fluido a través de un medio poroso interno con el gradiente de presión metalostática (ver figura 32).



**Figura 32** Diagrama esquemático que ilustra la ley de Darcy en la solidificación de una aleación.

Fuente Fernández y Gómez (2003)

La ley de Darcy esencialmente establece que la velocidad del fluido,  $v$  es una función lineal del gradiente de presión. Considerando la presión metalostática adicional se tiene que:

$$v = \frac{\Delta P}{\mu} * K \quad (1.12)$$

es decir,  $v = f_1 * v_l$ , donde  $v_l$ , es la velocidad eficaz del fluido entre la armazón sólida y  $f_1$ ; es la fracción volumétrica de líquido,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido (Pa.s) y  $K$  es la permeabilidad del medio poroso ( $m^2$ ). Esta permeabilidad es una medida de resistencia al flujo de la superficie sinuosa de la armazón sólida. La relación normalmente usada para la permeabilidad es la de Carman-Kozeny,

donde  $d$  es una dimensión típica de los canales entre dendritas que pueden fluir dentro del líquido:

$$\frac{(1 - \dots)^3}{180} \quad (1.13)$$

Más adelante se hablará del software usado para la simulación por computador, dicho programa utiliza esta misma ecuación, pero expresada en términos de  $M_s$ : Superficie del volumen del radio de una estructura sólida,  $\square$ : un factor de formado y  $D_p$ : Dimensión característica; de manera que cuanto hace las iteraciones para la resolución del algoritmo, pueda devolver valores más exactos.

$$(1.14)$$

$$\frac{3}{5 - 2(1 - \dots)^2}$$

Siendo:

$$(1.15)$$

$$\frac{6}{\dots}$$

En la Ecuación 1 aparecen representados los dos campos, el escalar en forma de la presión y el campo vectorial en forma de la velocidad del fluido, sin embargo, esta no es una relación universal, para completarla es necesaria la ecuación de conservación de masa tomando en cuenta el equilibrio de masa del sistema sólido-líquido. Considerando las ecuaciones de continuidad, el equilibrio de masa de un sistema sólido-líquido quedó determinado como:

$$(1.15)$$

$$\dots - \dots - \dots = 0$$

y son las densidades de la fase líquida, de la fase sólida y de la mezcla, respectivamente. La fracción volumétrica de líquido,  $f_l$ , se da por:

$$(1.16)$$

$$1 - s -$$

$f_p$  es la fracción volumétrica de poros que se puede formar.

#### 4.1.1.2.2 Viscosidad de un fluido no newtoniano.

Esta es una propiedad en virtud de la cual las aleaciones muestran resistencia al flujo, como resultado de la fricción mutua entre átomos y partículas de la aleación que están en movimiento. Se basa en correlaciones entre las fuerzas externas que producen el movimiento del líquido y las fuerzas que tienden a retornar a la posición de equilibrio las capas de líquido desplazadas, a consecuencia de la fricción. Tomando en cuenta el tamaño de los átomos, la viscosidad decrece con el aumento del radio atómico y al aumentar la temperatura, decrece a consecuencia del debilitamiento de las fuerzas interatómicas de los elementos que constituyen las aleaciones.

El aluminio puede ser considerado como un fluido no newtoniano; cuando el programa con el que se hace la simulación en el computador trabaja con fluidos de este tipo, el cálculo de la viscosidad se hace utilizando el Modelo de Carreau-Yasuda, este modelo define dos límites de viscosidades, un valor de viscosidad cero en un límite y el otro valor como infinito, la siguiente ecuación define este modelo:

$$(1.17)$$

$$\left( \eta_0 \right) \left( \eta^* \right)^{-\frac{1}{n}}$$

Escogiendo los valores adecuados para los diferentes parámetros de la ecuación, se puede obtener una gran variedad de modelos para fluidos newtonianos. Este modelo tiene cinco parámetros:

$\rho$ : Viscosidad para tensión infinita       $\eta$ : Viscosidad para tensión cero  
 $\alpha$ : Coeficiente de Yasuda                       $n$ : Coeficiente de poder calorífico

#### 4.1.1.2.3 Criterio de Niyama.

El criterio de Niyama es llamado también criterio de Microporosidades, y es usado para predecir porosidades por contracción. Este criterio define que las microporosidades son localizadas preferencialmente en regiones donde el radio:

(1.18)

$$/ Re^{1/2}$$

Donde  $G$  es el gradiente de térmico ( $^{\circ}C/mm$ ) y  $Re$  es la rata de enfriamiento ( $^{\circ}C/s$ ), es menor que un valor crítico de  $1.0 K^{1/2}min^{1/2}cm^{-1}$ , que equivale a  $0.775K^{1/2}s^{1/2}mm^{-1}$ , por debajo de los cuales el defecto de contracción ocurre, ambos valores,  $G$  y  $Re$ , son evaluados al final de la solidificación, aunque para más exactitud el programa desarrolla cuidadosamente este valor para varias iteraciones, cabe destacar que el valor  $Re$  deber ser cuidadosamente establecido, pues no será computado para un valor de cero. El valor del gradiente es por lo general, un vector, sin embargo, el programa toma el valor absoluto de este vector (la componente en la dirección del flujo de calor). Por lo general, el coeficiente de transferencia de calor es tomado como infinitos, y el gradiente de temperatura es evaluado de manera aproximada, como el máximo valor entre ocho direcciones al final de la solidificación. La rata de enfriamiento es aproximadamente la diferencia entre temperaturas de sólido y líquido, entre un tiempo de solidificación:

(1.19)

Lo importante de este criterio, es que el valor del gradiente de temperatura, al cual la porosidad se forma es proporcional a, desde que. El criterio de Niyama es un parámetro térmico local, en realidad, la contracción dependerá del comportamiento de la solidificación en otras partes del molde.

Un análisis interdendrítico, sugiere que la presión es proporcional a, si la presión excede un cierto valor determinado en el programa, la porosidad será formada. El análisis, es estrictamente sólo para solidificación unidireccional, donde el fluido del flujo tiene la misma dirección que el flujo de calor. En esta situación, los cambios de presión pueden tener un valor suficiente para la formación de la porosidad, sólo cuando la fracción de sólido es considerable (cercana a la unidad) y la permeabilidad de la zona pastosa es muy pequeña.

#### **4.1.2 Modelo Geométrico.**

Una vez que se ha entendido el complejo proceso de la formación de defectos durante la solidificación del aluminio, a nivel interno del material se deben obtener resultados visibles de manera de ejemplificar este proceso y así poder relacionarlo con la realidad, dicha realidad que se ve vive en la empresa que se encarga de hacer este proceso de colada continua la cual es ALUCASA, por esta razón es que se hará uso de un modelo geométrico que esta empresa fabrica. Durante el desarrollo de esta simulación se tendrá información suministrada por la empresa de dimensiones de las láminas (ancho, largo, espesor) a simular y variables específicas (temperatura, velocidad, presión, etc.) para que los resultados obtenidos sean más exactos.

#### **4.1.3 Tecnología aplicada (herramientas disponibles).**

La selección del software que simule los procesos deseados en la investigación depende de factores que pueden salir del alcance de este trabajo, como: Disponibilidad en Venezuela, costos elevados de licencias, asesoría

técnica y equipos compatibles con esta es tecnología (memoria RAM, Disco duro, Capacidad, Tarjeta de video, etc.).

Para esta fase de selección de esta herramienta se debe tener en cuenta las necesidades de nuestros objetivos y la actualización del mercado respecto a estas herramientas, debido a la gran competencia que pueden brindar actualmente las empresas diseñadoras de software, además de conocer las características de diferentes herramientas computacionales para lograr realizar una comparación competente de dichas herramientas.

Según la comparación hecha anteriormente en el capítulo II “Marco Teórico” podemos llegar a tomar una selección adecuada como puede verse a continuación: como herramienta computacional el programa conocido como “ProCast” con la idea de lograr realizar una simulación exitosa. Gracias a sus características se pudo lograr el objetivo, ya que estas permiten simular de una manera eficiente bajo los modelos matemáticos mencionados anteriormente.

#### **4.1.3.1 ProCast**

Es una herramienta computacional/ software para simular procesos de fundición y analizar su comportamiento de solidificación de flujo térmico y comportamiento metalúrgico, puede ser usado en fundición por presión, gravedad, con corazones de arena, colada continua, cera perdida, etc. “ProCast” incluye lector de geometría CAD, manipulación, librería de materiales, malleo con el algoritmo tetraedro. Además, un solver térmico para predecir flujo el molde con lo que se puede estimar soplado de corazones, gases, turbulencia y erosión en arena, oxidación, etc.

Así como un solver para concentración de esfuerzos para estimar comportamientos mecánicos, fatiga, etc. Además ofrece una solución completa para todo tipo de procesos incluyendo fundición continua y semi-continua, es posible estimar condiciones de inicio y final del proceso, así como sus

condiciones en estado normal. Puedes determinar la temperatura en cualquier instante del proceso y encontrar las zonas frías para poder hacer mejores predicciones incluyendo llenado, solidificación, diseño de molde.

Luego de este estudio de las capacidades para la simulación se seleccionó por los factores:

Los criterios para la detección de defectos, las funciones múltiples de este programa permiten a sus usuarios predecir problemas de porosidad, solidificación, rechupes y esfuerzos residuales para remplazar el costoso método de ensayo y error.

Resultados visibles en 3D, para una visualización 3D, ya que hoy en día la tecnología nos ofrece estas opciones, y es importante que el objetivo a nivel universitario, profesional e industrial es avanzar a la misma velocidad que la tecnología.

Disponibilidad, después de una exhausta búsqueda en internet se pudo obtener una versión gratuita de la herramienta para así poder contar con su uso y en una de sus versiones más recientes la cual es la del año 2018.

#### **4.2 Fase II: Analizar los defectos que sucedan en el proceso de colada continua del aluminio AA1100.**

Es posible que haya defectos en las superficies de las placas y hojas laminadas o defectos estructurales internos. Los defectos son indeseables no sólo porque degradan la apariencia de la superficie, sino también porque pueden dañar la resistencia, formabilidad y otras características de fabricación.

Como fue mencionado en el capítulo II “Marco Teórico” tendremos los defectos más usuales y otros dados por el programa

#### 4.2.1 Macro segregación o segregación inversa:

Este fenómeno sucede cuando hay enfriamientos bruscos en una aleación a alta temperatura, ocasionando que la difusión de un metal en otro no sea uniforme, generando una segregación sin equilibrio durante la transición de su estado líquido a sólido.

Dependiendo la rapidez de enfriamiento, el porcentaje de difusión de un metal en otro puede verse afectada durante el cambio de fase, obteniendo un rendimiento mayor o menor al estimado en los diagramas de fases. Ocurre en distancias grandes abarcando la superficie y la parte central del material, teniendo una mayor concentración de metal difundido en la superficie en comparación a la región central, no es posible tratarse por homogeneización para eliminar la distribución sin equilibrio. Puede ser tratado por trabajo en caliente, reconstruyendo la pieza nuevamente. Algunos tipos de segregación pueden ser los siguientes:

**Homogeneización:** El tratamiento térmico de homogeneización reduce los efectos de fragilidad y segregación irregular al calentar la pieza debajo de la temperatura por debajo del sólido sin equilibrio, se pueden eliminar las diferencias de distribución en un tiempo relativamente corto.

**Microsegregación:** La microsegregación o segregación central, es un fenómeno similar a la segregación sin equilibrio, se genera en distancias pequeñas. Puede ocasionar fragilidad en caliente en el punto de fusión más bajo a temperaturas por debajo del sólido en equilibrio.

**Macrosegregación:** Ocurre en distancias grandes abarcando la superficie y la parte central del material, teniendo una mayor concentración de metal difundido en la superficie en comparación a la región central, no es posible tratarse por homogeneización para eliminar la distribución sin

equilibrio. Pude ser tratado por trabajo en caliente, reconstruyendo la pieza nuevamente.

#### **4.2.2 Línea de segregación:**

La línea de segregación va estrechamente relacionada con el Sump Depth, por lo que la minimización de esta zona es de suma importancia, sin embargo, la desaparición de este defecto es casi imposible, ya que, allí se aloja la mayor cantidad de precipitados producto del rechazo de soluto hacia el centro de la lámina por ser la última zona en solidificar, por lo que el espesor de esta dependerá, como se mencionó anteriormente, del Sump Depth.

#### **4.2.3 Grietas en los bordes:**

Las grietas en los bordes aparecen en la colada de muchas aleaciones y pueden afectar a una zona de varios milímetros. El aluminio comercialmente puro presenta este fenómeno en pequeña escala. Otras variables importantes del proceso son las dimensiones finales de la lámina, tales como variación longitudinal, perfil, ancho, espesores y corona, en donde estas dimensiones son críticas para la calidad de la lámina en las siguientes etapas del proceso. El perfil de banda depende principalmente del acabado superficial en el proceso de rectificado del cilindro, es decir, la ovalidad y excentricidad. Por otra parte, la variación longitudinal dependerá de tres factores que son la ovalidad, excentricidad y el estado de los rodamientos de las chumaceras.

Por tal razón, es de suma importancia, la evaluación dimensional de la lámina mediante un análisis de espesores con la finalidad de obtener las condiciones reales a la cual se encuentra el proceso. La variación longitudinal y el perfil son variables que no son fáciles de controlar mientras la máquina se encuentra operativa, a continuación, se muestra una lista con los parámetros que rigen el comportamiento de las variables mencionadas:

Sistema de enfriamiento interno de los cilindros de colada.

Deformación de las camisas de los cilindros de colada.

Apriete inadecuado de los cilindros de colada.

Falla de los rodamientos.

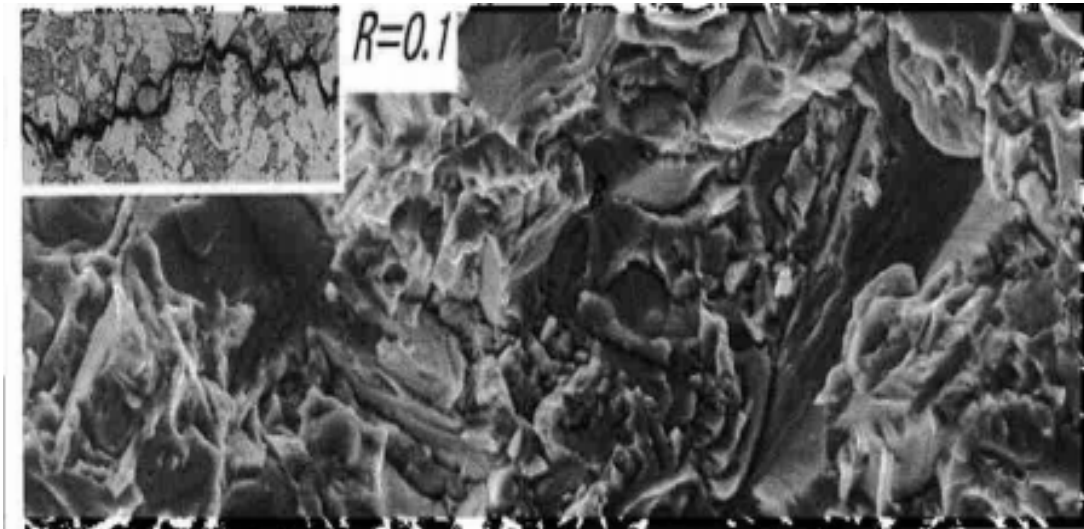
Calibración inadecuada de la abertura de los cilindros.

Variación en el sistema de precarga y de velocidad de la máquina.

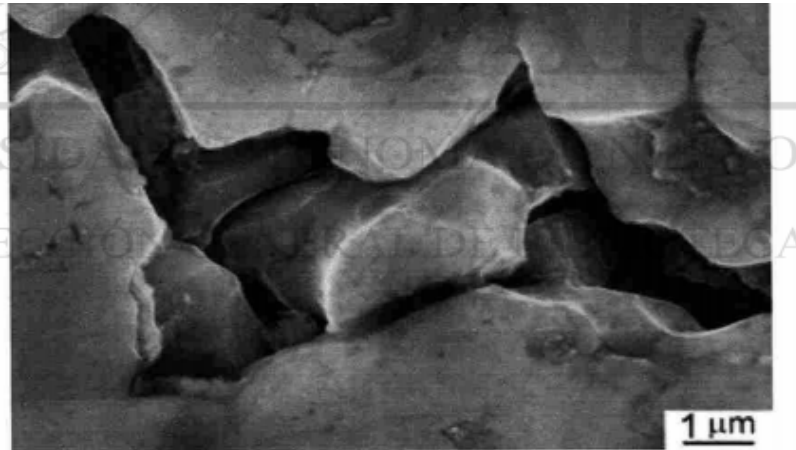
Variación del nivel de metal en la caja de colada.

El ancho de la lámina depende básicamente de: variación del nivel de metal en la caja de colada y colocación inadecuada de las cuñas en la boquilla.

Existen 3 tipos de propagación de grietas, los cuales pueden ser: transgranular (ver figura 33), intergranular (ver figura 34) y mixta. La primera de ellas (transgranular) corresponde a la grieta que se propaga atravesando el interior de los granos, En cuanto a la propagación de grietas intergranulares corresponde a las grietas que se propagan siguiendo las fronteras de grano sin penetrar al interior.



**Figura 33** Fractura típica transgranular con radio de 0.1m  
Fuente Guerrero (2015)



**Figura 34** Fractura típica intergranular de 1 micrómetro.

Fuente Guerrero (2015)

Por último, se habla de propagación de grieta mixta cuando se presentan ambos tipos de propagación de manera simultánea.

#### **4.2.4 Poros:**

El término poro es aquel que se utiliza para designar a todos los pequeños huecos (ver figura 32) de aire que pueden encontrarse en una superficie. Estos huecos de aire pueden tomar forma concreta y transforman una superficie que de otra manera sería lisa en una superficie porosa. La presencia de poros en cualquier tipo de superficie significa que es una superficie más delicada ya que el aire puede pasar a través suyo y por lo tanto no está hecha completamente de materia. El término se utiliza en varios campos, incluyendo farmacia, cerámica, metalurgia, materiales, fabricación, ciencias de la tierra, mecánicas de suelos e ingeniería. La porosidad aparece en muchos componentes metálicos de fundición, aunque es especialmente prevalente en las fundiciones por moldeo de aluminio y magnesio. Existen tres tipos de porosidad:

**Porosidad por flujo:** Produce defectos superficiales o internos generados por una presión insuficiente o por las condiciones de flujo de metal en el proceso.

**Porosidad por gases:** Generalmente se da a nivel interno, y está causada por gases de varios tipos atrapados en el molde. La porosidad por gases proviene de tres fuentes principales en las fundiciones por moldeo: aire atrapado, vapor y lubricante quemado.

**Porosidad por contracción:** La más habitual y la más difícil de controlar, causada por un cambio en el volumen del metal al pasar de estado líquido al estado sólido.

La porosidad de las piezas de fundición afecta a todos los eslabones de la cadena de suministro de la producción, puesto que está presente en distinta medida en todas las piezas de fundición.

**Clasificación de los poros según su tamaño: microporos, mesoporos y macroporos:** Como se sabe los sistemas porosos pueden ser de naturaleza muy diferente, lo que da lugar a que sus poros constituyentes presenten una variedad de formas y tamaños (ver figura 35). De las diferentes dimensiones que caracterizan a un dado poro, es de especial interés su dimensión transversal  $w$ , es decir, el diámetro de un poro cilíndrico o la distancia entre las placas en el caso de poros formados por planos paralelos. La importancia de conocer el tamaño de los poros radica en que las características de los procesos de transporte y adsorción en el interior del poro están fuertemente influenciadas por su tamaño. Una conveniente clasificación de los poros de acuerdo a su dimensión transversal  $w$ , fue propuesta originalmente por Dubinin y posteriormente adoptada oficialmente por la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

Dimensión transversal $w$	
Microporo	Menor a $\approx 20 \text{ \AA}^{\S}$
Mesoporo	Entre $\approx 20 \text{ \AA}$ y $\approx 500 \text{ \AA}$
Macroporo	Mayores que $\approx 500 \text{ \AA}$

$\S 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$

**Figura 35** Clasificación de poros de acuerdo con su dimensión transversal

Fuente Lopez (2016)

Los límites de distinción entre los distintos tipos de poros son sólo aproximados ya que las propiedades que presentan en el proceso de adsorción son dependientes de su geometría y de las características de la molécula que se adsorbe. Si bien la mayoría de los materiales poseen las tres clases de poros en su red interna, es común referirse a materiales micro, meso o macroporosos. Con esta nomenclatura se da cuenta de que la porosidad de dicho material esta principalmente concentrada en una determinada zona del rango de poros. También es común en la literatura denominar sólido no poroso a aquel que no posee ni microporos ni mesoporos.

**Distribución de tamaños de poros, PSD (Pore Size Distribution):**

Dado que tanto las características que posee el fenómeno de adsorción como el de transporte de fluidos en el interior de un medio poroso están gobernadas por las dimensiones que tienen los poros que forman su estructura, es importante conocer la denominada “función de distribución de tamaños de poros”  $f(w)$ , la que nos brinda información sobre la abundancia de poros de un dado tamaño que existe en el material. Actualmente, los métodos más utilizados para medir el tamaño de los poros son:

Experimentos de adsorción-desorción.

Porosimetría de Mercurio.

SAS (small-angle scattering).

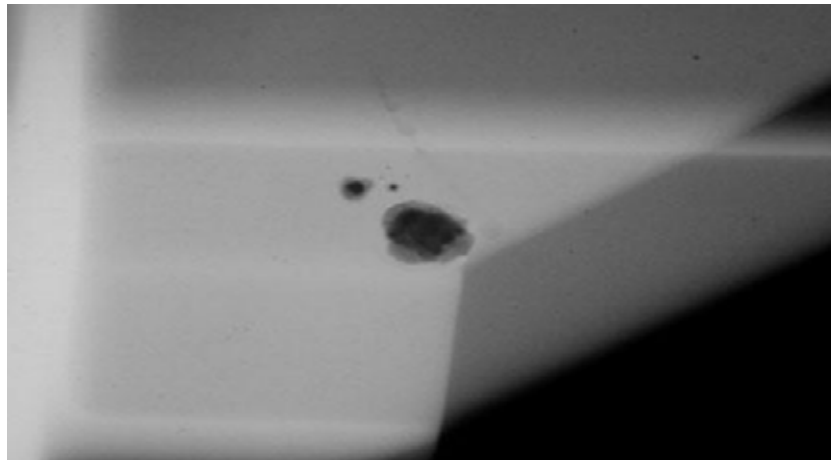
NMR (nuclear magnetic resonance).

Cada uno de estos métodos posee su propio rango de aplicabilidad dado los límites que imponen los supuestos e hipótesis que adoptan. Los dos primeros

han sido extensivamente probados y son técnicas experimentales de uso común en la mayoría de los laboratorios de caracterización, mientras que los dos últimos son técnicas más nuevas (y más costosas), que están demostrando ser muy útiles para caracterizar este tipo de materiales.

#### **4.2.5 Inclusiones de impurezas:**

Las inclusiones de arena y la escoria son óxidos no metálicos, que aparecen en la radiografía como manchas oscuras irregulares (ver figura 36). Estas provienen de porciones desintegradas de paredes de molde, del núcleo o de óxidos (formados en la masa fundida) que no han sido desprendidos antes de la introducción del metal en el molde. El control cuidadoso de la masa fundida, el tiempo de retención adecuado en el cucharón y la prevención de formación de óxidos en la superficie de la masa fundida durante el vertido, minimizarán o evitarán esta fuente de problemas. En un proceso de inspección radiográfica, aparecería como una impureza en el metal sólido.



**Figura 36** Impurezas vistas con ensayo radiográfico

Fuente Sanz (2017)

#### **4.2.6 Rechupes:**

Los rechupes son un defecto originado por una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición, debido a la contracción por solidificación que

restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. El problema se puede resolver frecuentemente con un diseño apropiado de la mazarota. El encogimiento asume diversas formas, pero en todos los casos se produce porque el metal fundido se encoge a medida que se solidifica en todas las porciones de la colada final. Se evita el encogimiento asegurándose de que el volumen de la pieza fundida se alimenta adecuadamente por medio de tubos ascendentes que retiren la parte que sufre la contracción. La retracción en sus diversas formas puede ser reconocida por una serie de características en las radiografías, que es uno de los métodos más usados para su detección.

### **4.3 Fase III: Encontrar las posibles causas de los defectos de la solidificación del proceso de colada continua**

#### **4.3.1 Causa de la Macro segregación o segregación inversa**

La segregación fuera de equilibrio sucede cuando hay una distribución no uniforme de un metal en otro provocada por cambios de temperatura repentinos durante el cambio de fase. Este fenómeno sucede cuando hay enfriamientos bruscos en una aleación a alta temperatura, ocasionando que la difusión de un metal en otro no sea uniforme, generando una segregación sin equilibrio durante la transición de su estado líquido a sólido. Dependiendo la rapidez de enfriamiento, el porcentaje de difusión de un metal en otro puede verse afectada durante el cambio de fase, obteniendo un rendimiento mayor o menor al estimado en los diagramas de fases.

#### **4.3.2 Causa de la línea de segregación**

La línea de segregación es un defecto inevitable que aparece en cualquier solidificación, ya que, a mayor cantidad de solutos, mayor segregación, esto se debe a que no es una aleación 100% pura, la segregación ocurre durante la solidificación de una aleación y es un rechazo de soluto el cual se va segregando hacia la zona donde se va a solidificar el metal la cual mayormente es en el medio

### **4.3.3 Causa de las grietas en los bordes**

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

### **4.3.4 Causa de los poros**

**Porosidad de gas:** Se producen por el gas atrapado durante el proceso de colada.

**Porosidad por contracción de solidificación:** 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 más tarde.

### **4.3.5 Causa de los rechupes:**

**Rechupes de cavidad:** Son generadas por contracciones del metal, frecuentemente por una desigualdad de rata de enfriamiento, intersecciones de diferente espesor.

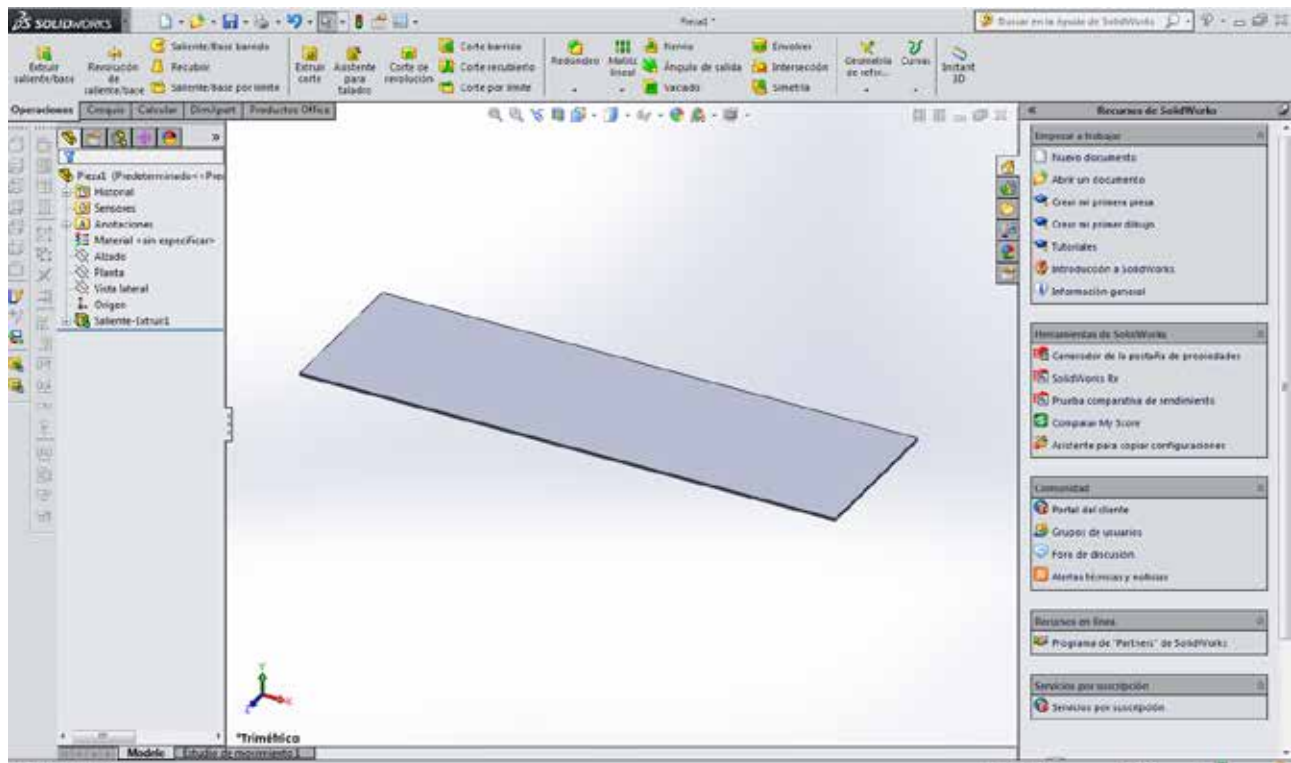
**Rechupes esponjosos:** Es una discontinuidad causada por el encogimiento en una zona concentrada en el momento del moldeo, frecuentemente ocurren en las zonas más delgadas.

## **4.4 Fase IV: Estudiar detalladamente cada defecto para encontrar disminuirlos.**

Una vez cumplidas las tres fases anteriores, obtenidos los modelos matemáticos, geométricos, selección de la herramienta computacional, haber estudiado los defectos que aparecen y sus causas. Se procedió la realización de la simulación con los datos estadísticos previstos por la empresa por ALUCASA CVG los cuales son del año 2017 (ver Anexo A). El estudio se dividió en 3 partes “Precast” “DataCast” “ProCast” que son las fases necesarias para simular.

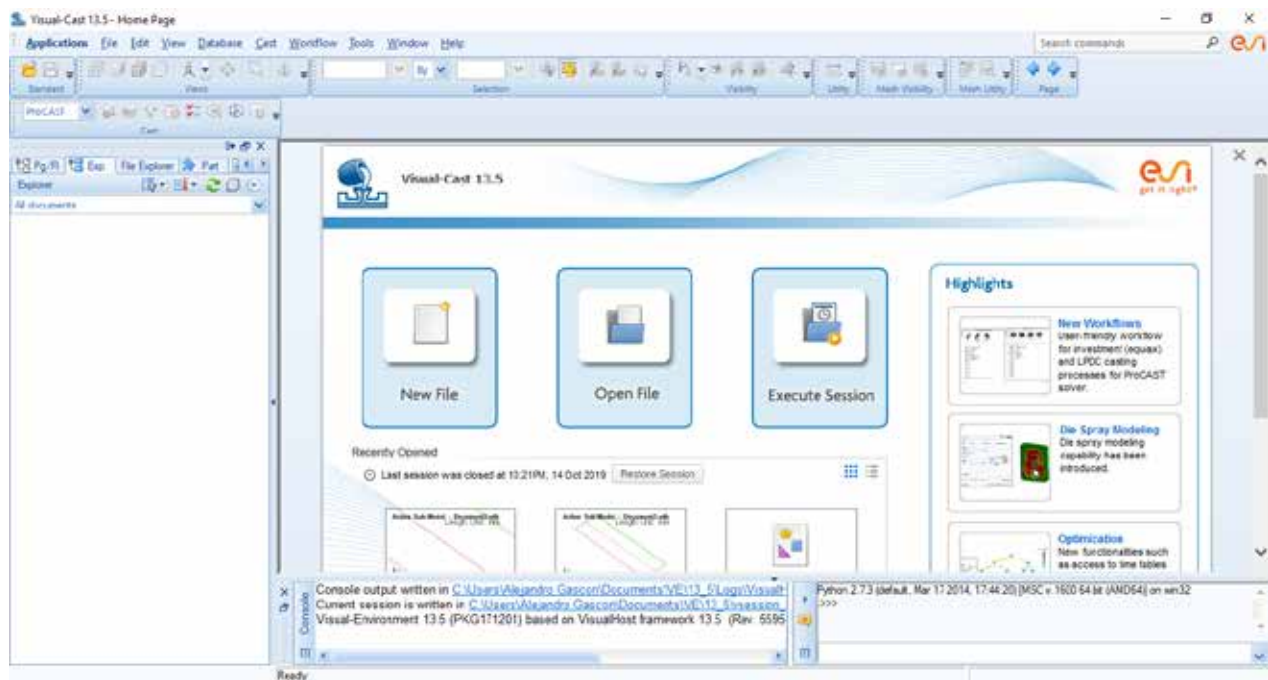
#### 4.4.1 PreCast.

Inicialmente para el software Procast, es necesario crear el modelo en 3D el cual se realizó la simulación. Se uso el software SolidWorks, el cual es una herramienta muy útil y versátil para este crear y diseñar sólidos en formato CAD. El estudio se hizo a una escala menor, esto ya que las características del equipo no son suficientes para este tipo de simulación a escala real, los valores reales de las láminas suministradas por ALUCASA CVG, tienen las siguientes dimensiones 1370mm ancho x 2000mm largo x 6mm espesor. Por esta razón se realizaron dos láminas de las mismas dimensiones unidas manteniendo el espesor a estudiar, de tal manera que al momento de la simulación ellas se solidificaran como una sola y así poder estudiar el perfil de la lámina en la mitad, para si tener 1350mm ancho x 400mm largo x 6mm de espesor (Ver Imagen 1).



**Imagen 1** Plano vista isométrica en solidworks de la lámina.  
**Fuente** Gascón y Tovar (2019).

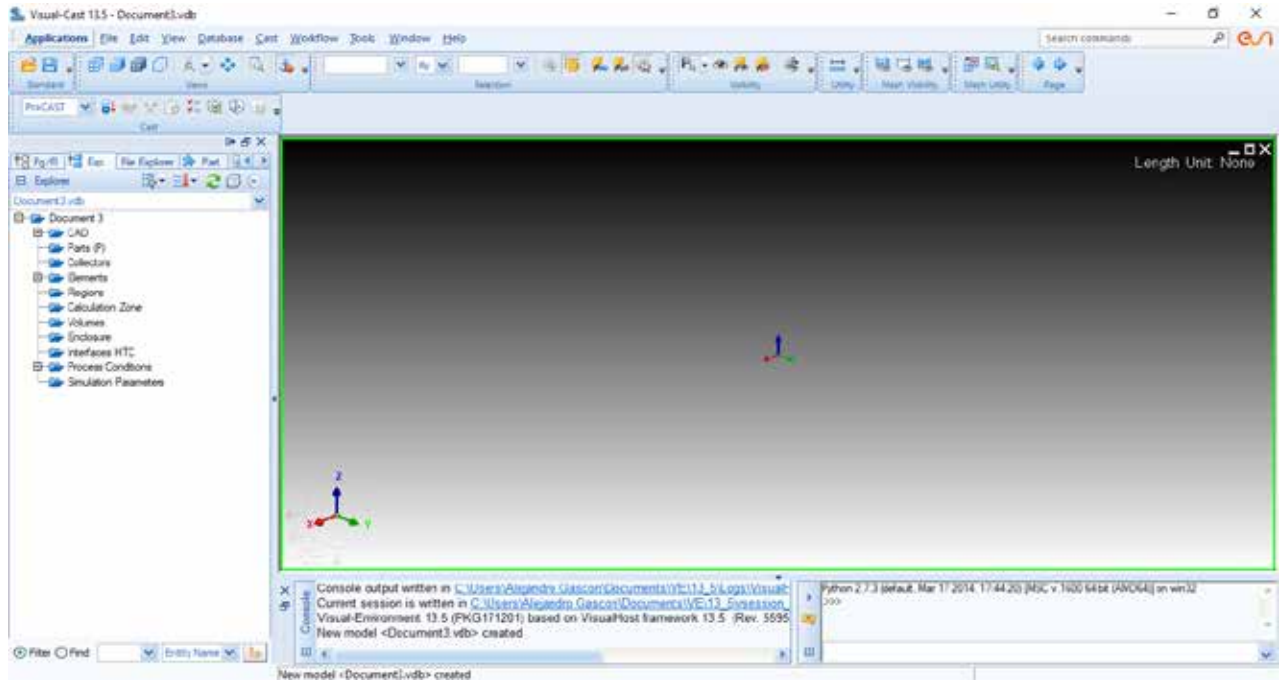
Una vez obtenido el diseño CAD de la lámina se procede a iniciar el software Procast y nos muestra su interfaz de usuario principal. Donde se pueden observar la barra de herramientas en la parte superior donde destacan las principales opciones del software los cuales son “Applications”, “File”, “Edit”, “Database”, “Cast”, “WorkFlow”, “Tools”, “Windows” y “Help” (ver imagen 2).



**Imagen 2** Interfaz inicial Procast

Fuente Gascon y Tovar (2019)

En la parte central de la interfaz de usuario, se encuentran tres botones “New File”, “Open File” y “Execute Session”. Se crea un nuevo archivo, seleccionando el botón “New file” de esta manera software nos muestra nueva interfaz, donde destaca una ventana vista isométrica con unos ejes ordenados donde se observará el sólido a simular. (Ver imagen 3).

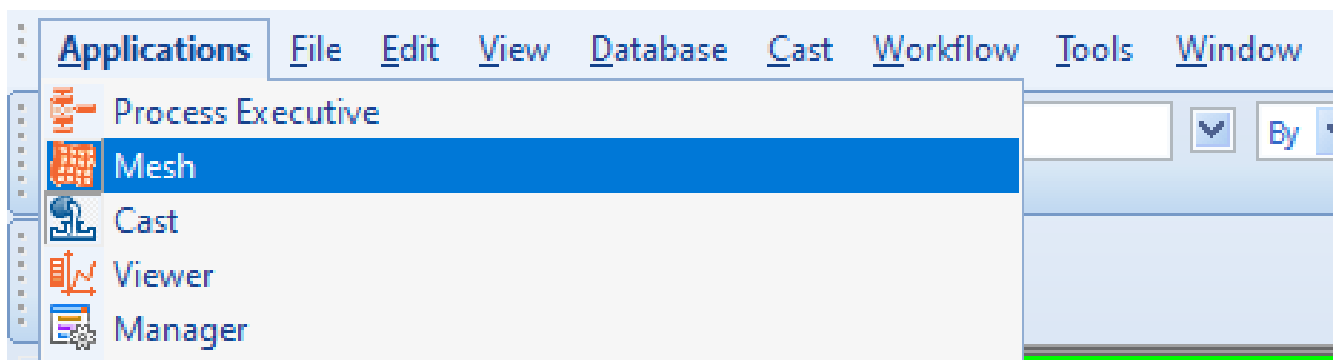


**Imagen 3** Interfaz “New File”

Fuente Gascón y Tovar (2019).

Luego de tener el archivo nuevo creado, se necesita importar la geometría de la lámina para eso se abre la pestaña “Applications” y se selecciona “Mesh” (ver imagen 4).

#### Visual-Cast 13.5 - Document3.vdb

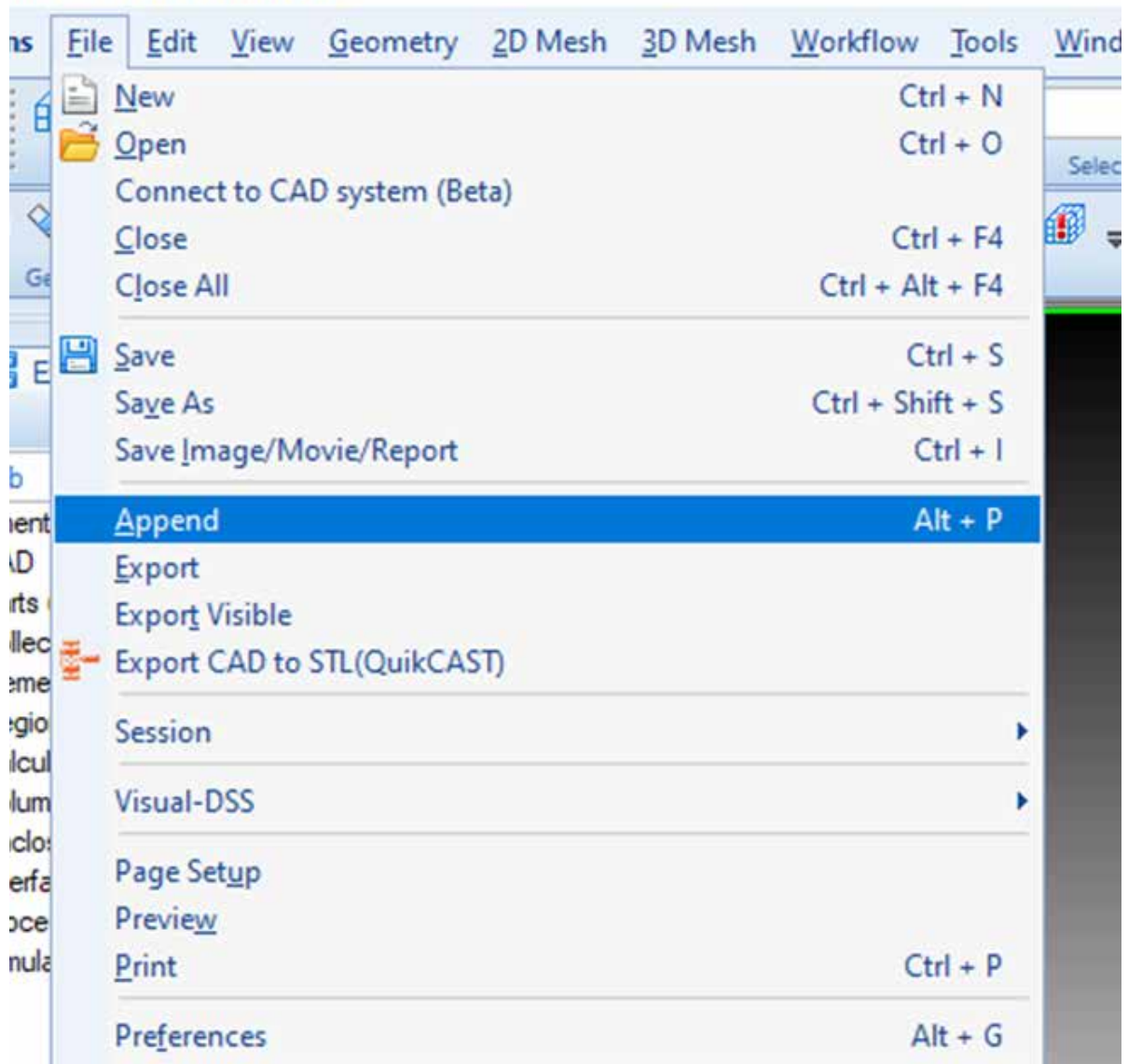


**Imagen 4** Selección de la aplicación Mesh

Fuente Gascón y Tovar (2019).

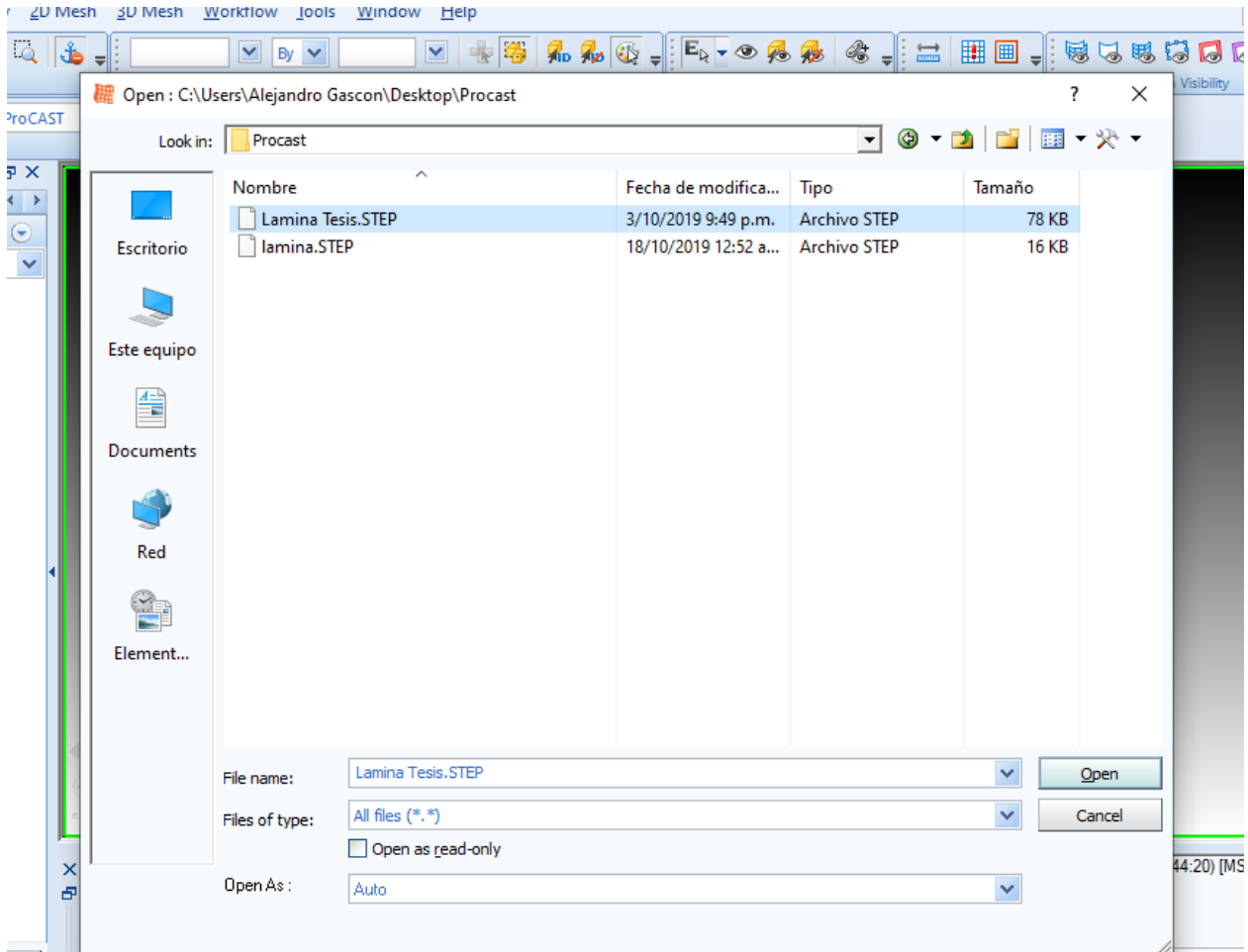
Esta aplicación “Mesh” nos permite realizar el mallado en 2D y 3D. En la barra de herramientas se abre “File” y se selecciona “Append” para importar el archivo de “SolidWorks” en formato “STEP”. (Ver imagen 5)

sh 13.5 - Document3.vdb



**Imagen 5** Importar archivo  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

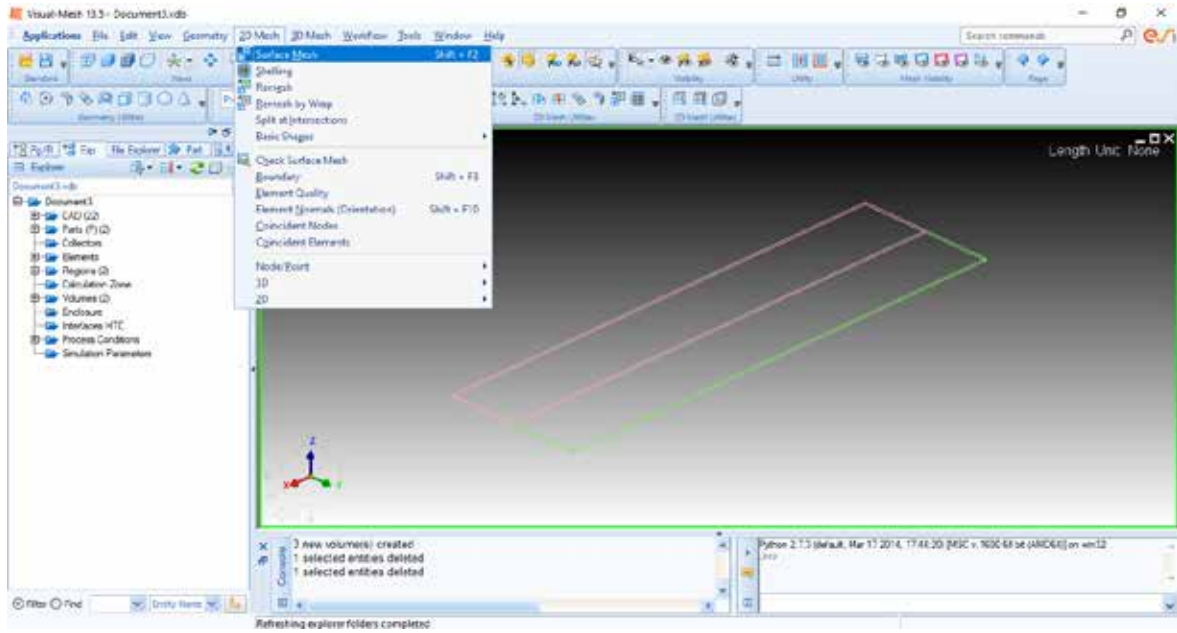
Se busca el archivo y se selecciona el sólido “Lamina Tesis.STEP” (Ver imagen 6).



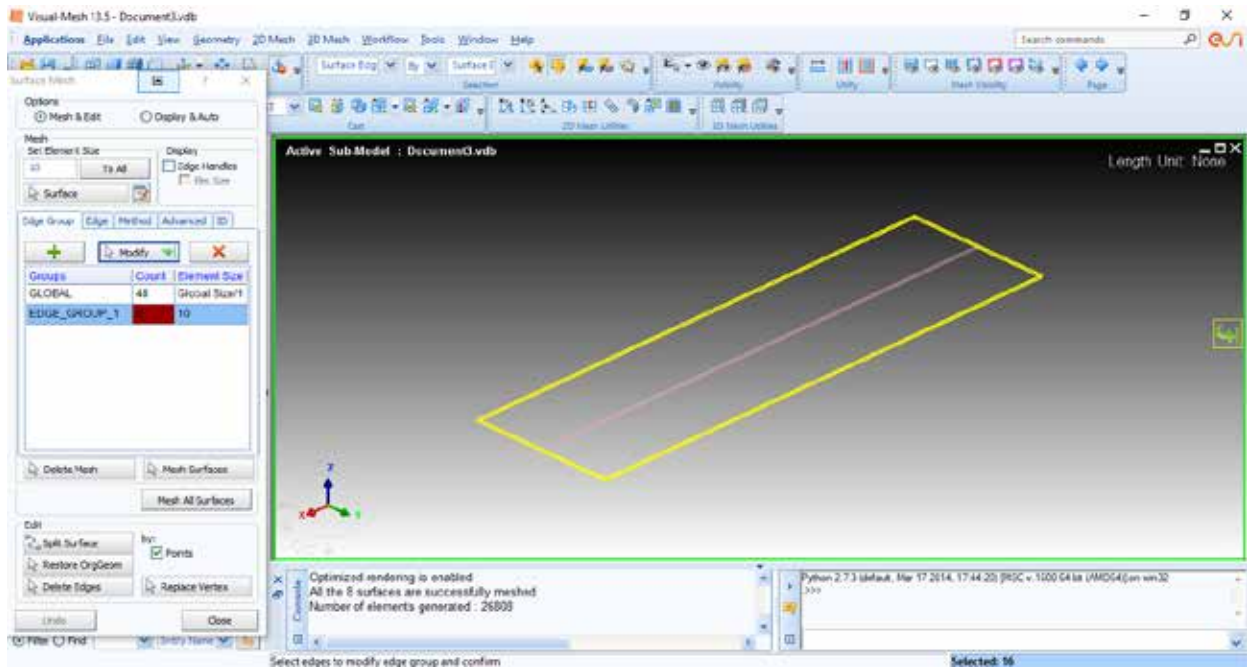
**Imagen 6** Selección del archivo “Lamina Tesis.Step”

Fuente Gascón y Tovar (2019)

Una vez abierto el archivo como se observa en la imagen 6, solo muestra las líneas de los planos creados. Se selecciona la herramienta “2D Mesh” y de manera siguiente “Surface Mesh” para crear las caras de la lámina (Ver Imagen 8).

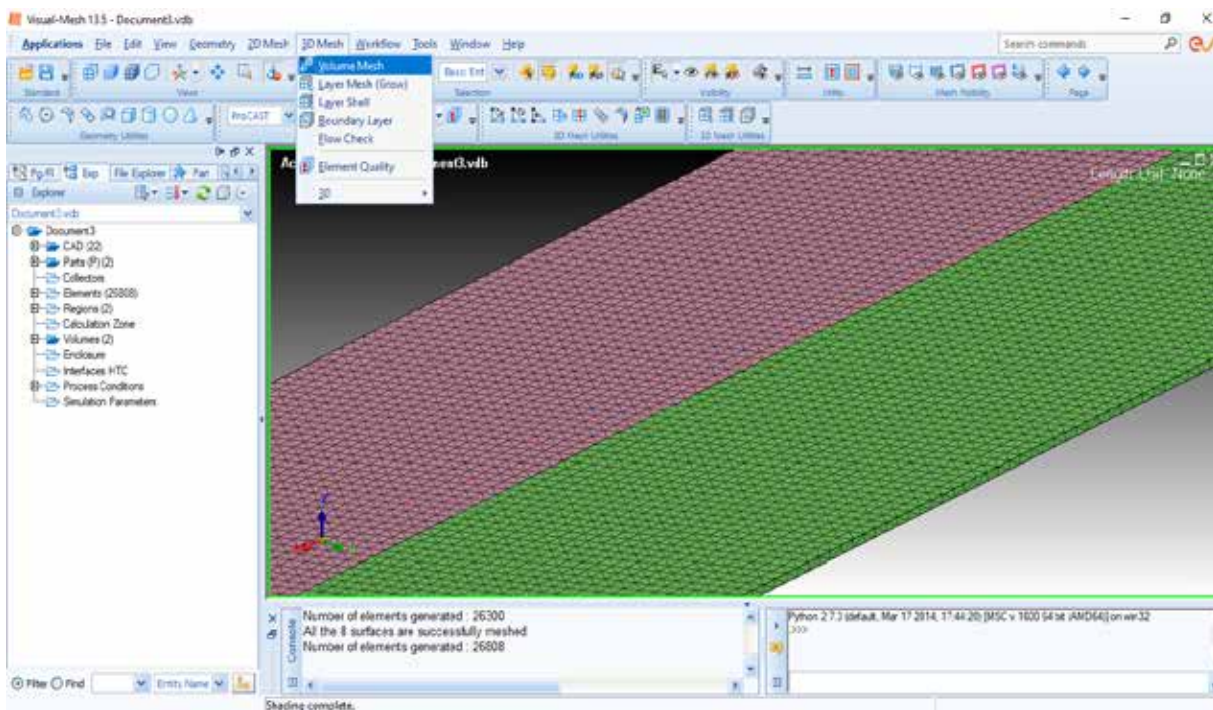


**Imagen 7** Inicio del mallado en 2D  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

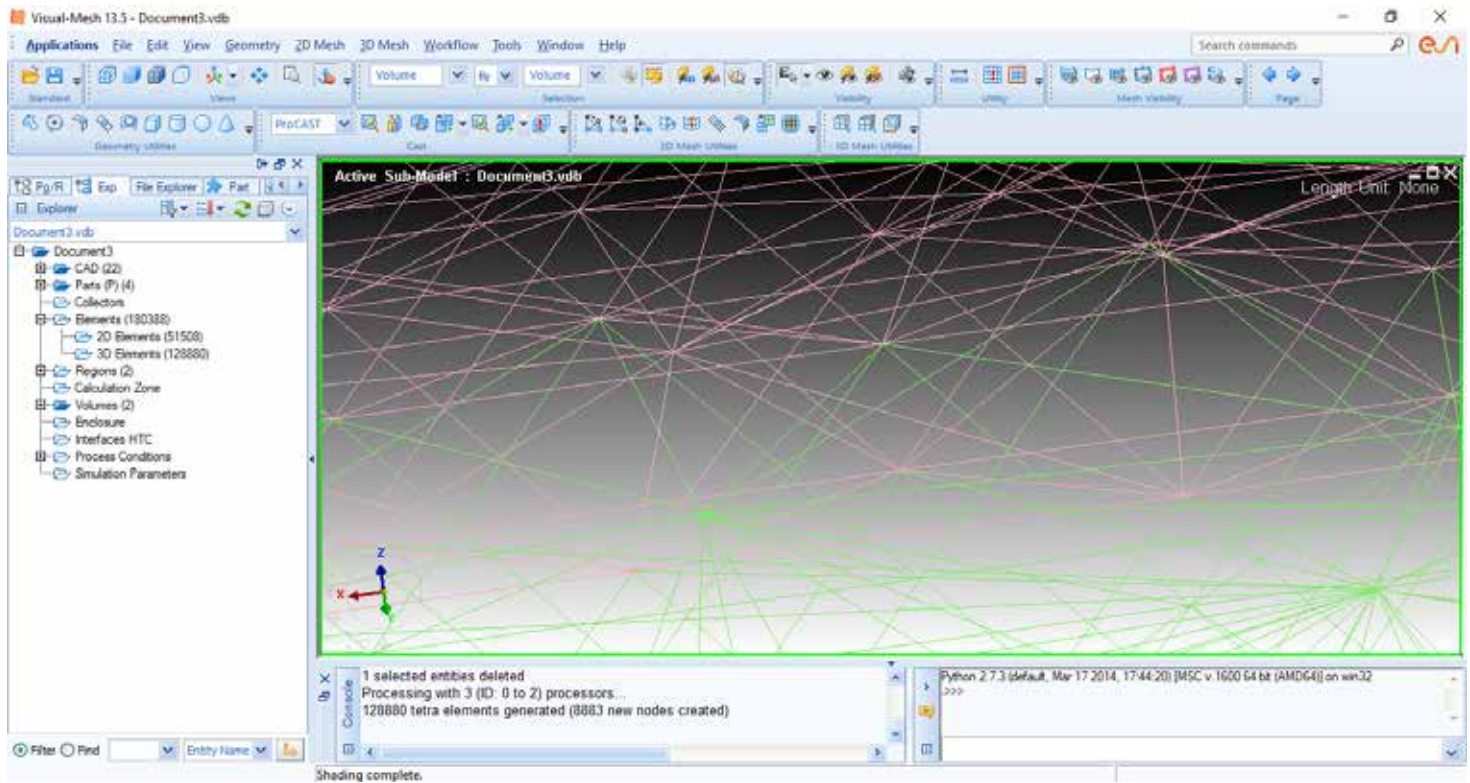


**Imagen 8** Selección de las caras a realizar el mallado.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

Después de haber realizado el mallado en 2D se procedió a realizar el mallado en 3D que consiste en unir los nodos de las caras del 2D para que crean diferenciales de manera tetraédrica a lo largo del sólido como se puede observar en la imagen 9, se selecciona en la barra de herramientas “3D mesh”, luego se selecciona todo el sólido y se crea el mesh como se aprecia en la imagen 10. El mesh nos dio como resultado que el sólido tiene se dividió en 128.880 partes para los cálculos de las ecuaciones diferenciales a resolver durante la simulación.



**Imagen 9** Inicio del mallado en 3D.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)



**Imagen 10** Mallado en 3D.

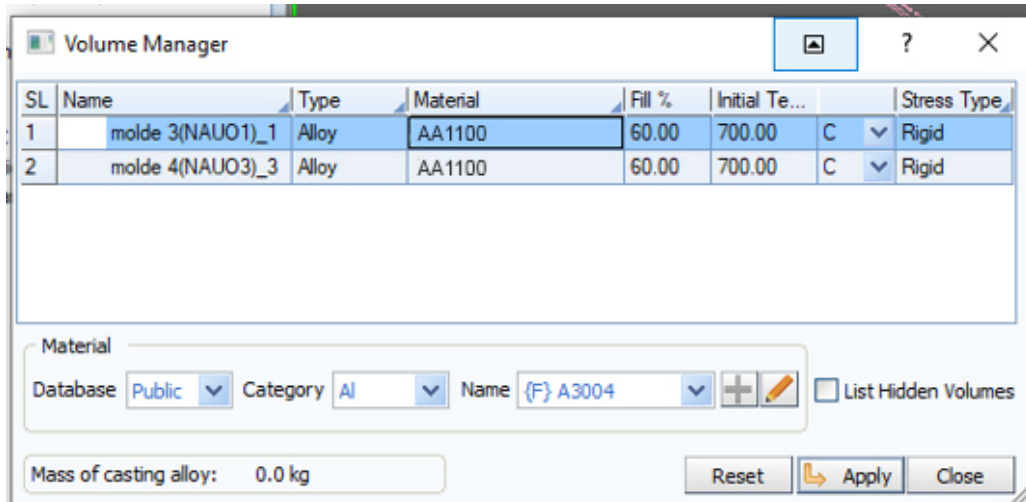
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.2 DataBase

Una vez terminado el precast se inicia la fase del “DataBase” en este módulo, las características de los sólidos como aleación, rigidez. Para esto se seleccionó la herramienta “Volume manager”, (ver imagen 11) que permite seleccionar entre la base de datos del programa los tipos de aleaciones. Las características como velocidad de la gravedad y las superficies donde se aplicarán la fuerza de los rodillos.

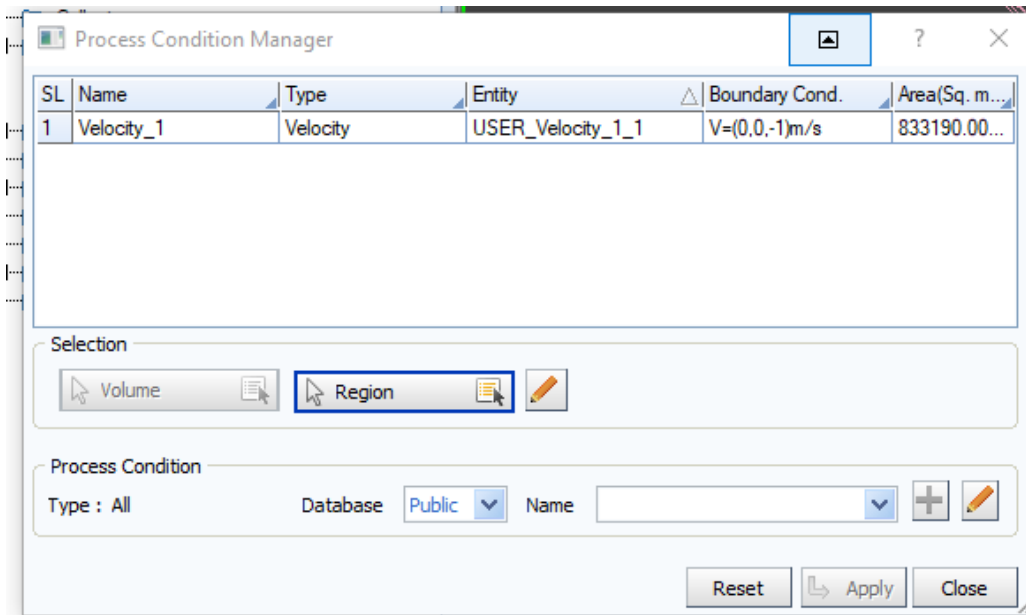
Luego se añadieron las condiciones del proceso, se seleccionó la herramienta “Process condition manager” (Ver imagen 12) que permite elegir entre una gama de condiciones del proceso, como velocidad del fluido, presión, calor, temperatura entre otros. La condición seleccionada fue “Velocidad del

fluido”, ya que se trata de un proceso de colada continua por gravedad el flujo de la aleación en estado líquido trabaja bajo estas condiciones iniciales.



**Imagen 11** Volume Manager.

Fuente Gascon y Tovar (2019)

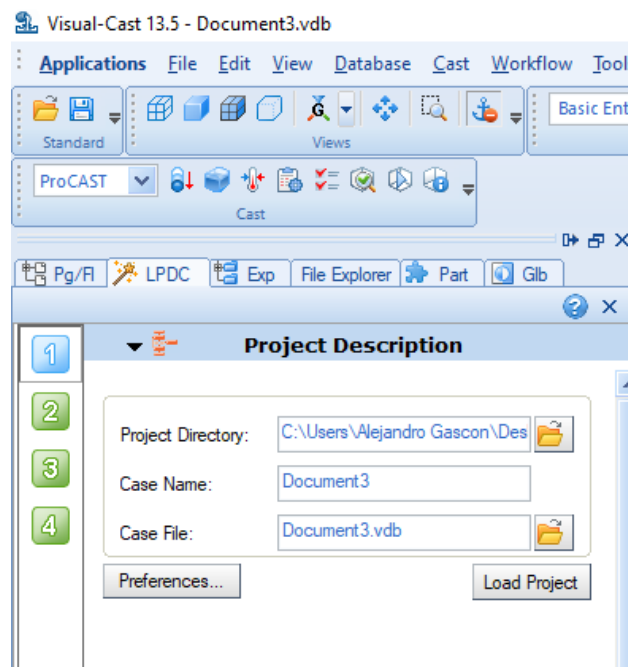


**Imagen 12** Volume Manager.

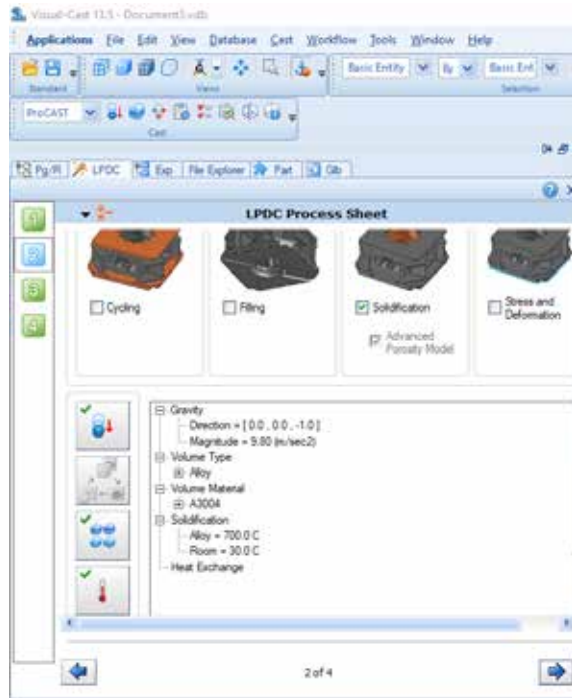
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.3 ProCast

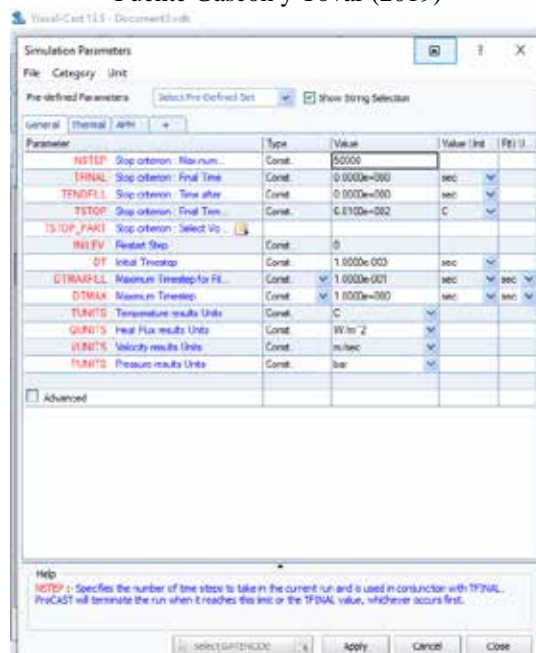
Una vez agregado los datos iniciales con los que se realizó la simulación, se abre la herramienta “Work Flow” que nos permite elegir el tipo de simulación que queremos realizar, se selecciona el módulo “LPDC”. En esta parte se selecciona donde se guardará el proyecto (ver imagen 13), se verifican las condiciones del solido guardadas en el “database” (ver imagen 14), se verifican las variables de la simulación (ver imagen15), en este caso se dejaron estándar, se realizó a 50.000 pasos, la cual tuvo una duración de más de 24 horas para procesarla en su 100%. La cantidad de núcleos que se usaron durante la simulación son 4, esta condición es dada por el software. A pesar de que el equipo que se usó para esta simulación es de 8 núcleos. Una vez verificados todos estos parámetros se inicia la simulación como se observa en la imagen 16 y 17.



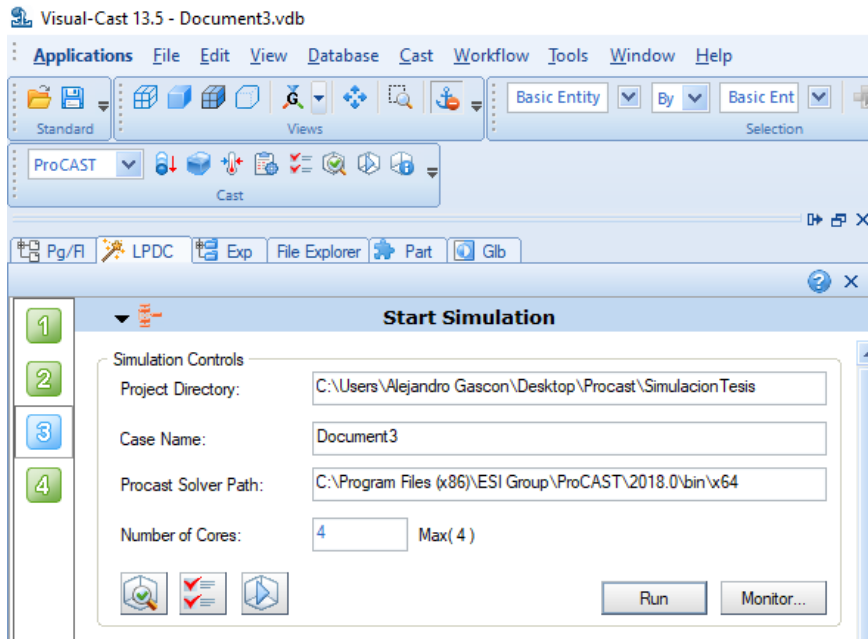
**Imagen 13** Descripción del proyecto.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)



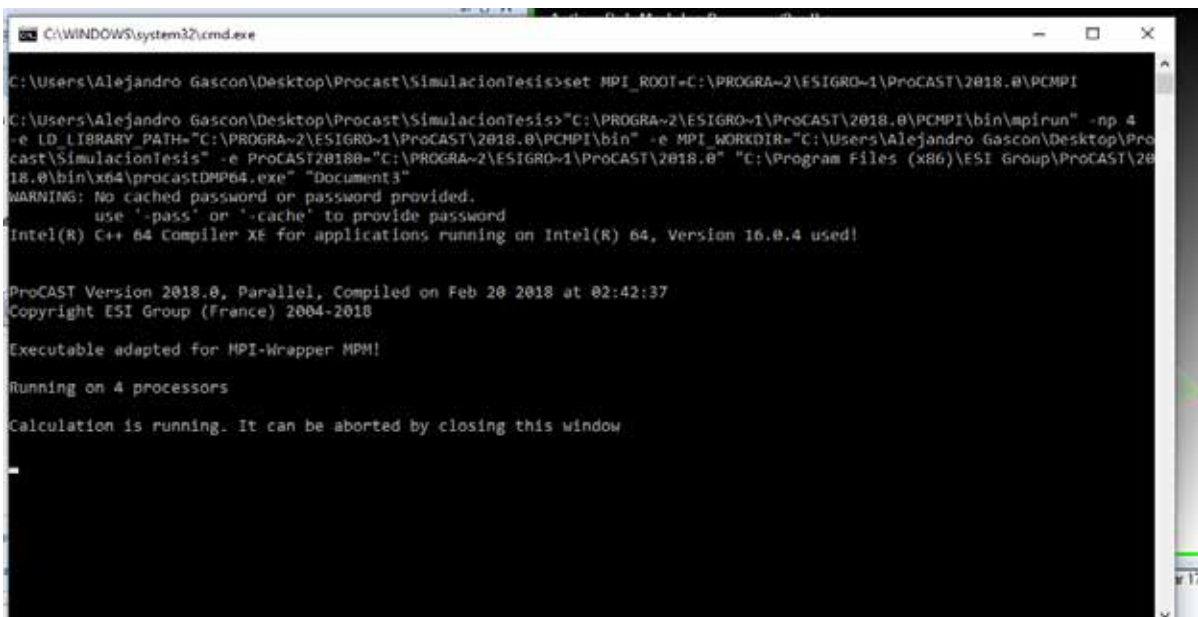
**Imagen 14** Verificación de parámetros iniciales.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)



**Imagen 15** Parámetros de la simulación.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)



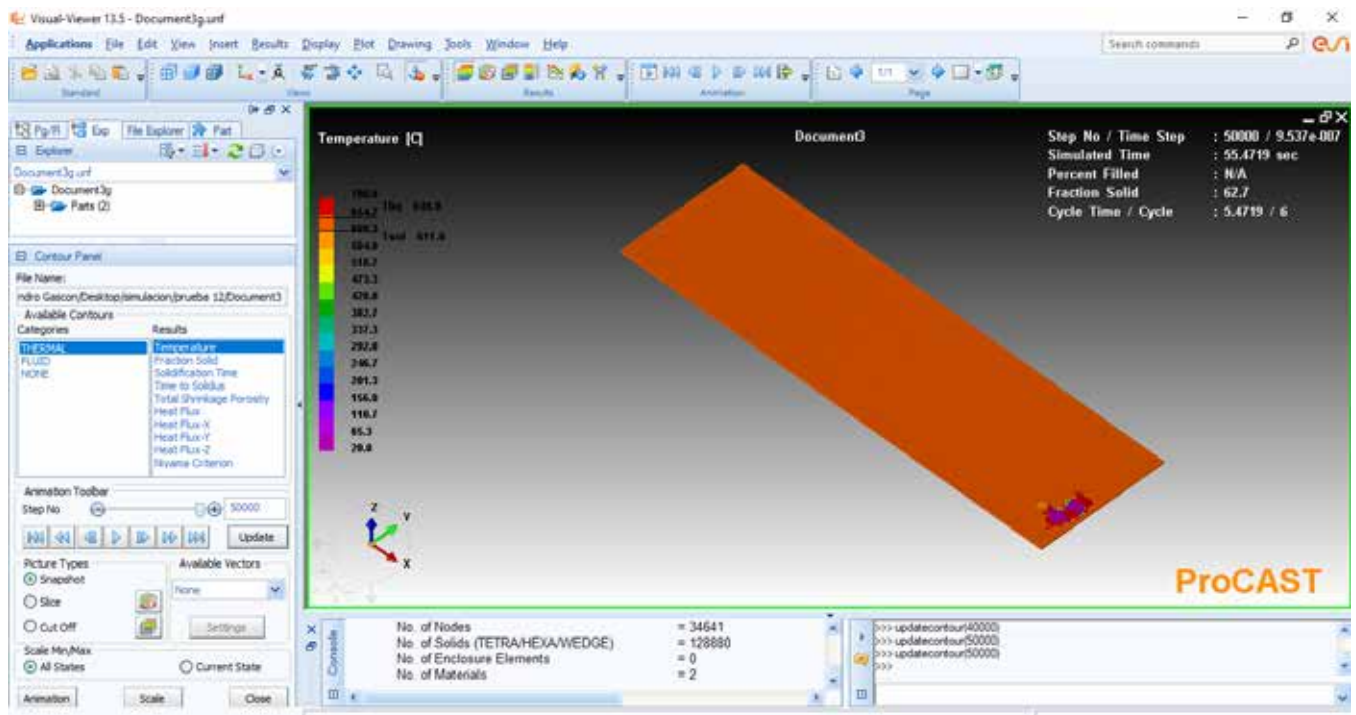
**Imagen 16** Inicio de la simulación.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)



**Imagen 17** Inicio de cálculos de la simulación.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.4 Resultados.

Luego de realizada la simulación se seleccionó la aplicación “Visual-Viewer” esta nos permite ver los resultados en 3D y obtener los gráficos correspondientes a los estudios indicados, en este caso fue la solidificación. Nos arrojó resultados de: Temperatura, fracción sólido, tiempo de solidificación, tiempo para solidificar, porcentaje de porosidad, flujo de calor y criterio de niyama. En la imagen 18 se puede ver la interfaz del “Visual-Viewer”, donde tenemos en la parte central la escala de los valores obtenidos por la simulación.



**Imagen 18** Interfaz Visual-Viewer.

Fuente Gascon y Tovar (2019)

En la simulación a 50.000 pasos se puede observar que el tiempo total es de 60 segundos aproximadamente, los resultados visuales, denotan una parte que está más fría que los demás (temperatura Ambiente aproximadamente 27°C). Esto quiere decir que es la primera parte en solidificarse en ese tiempo ya que en el proceso de colada continua los rodillos estarían en contacto con esa fracción

de la lámina y es la primera en estar en contacto con el medio ambiente. Mientras que el resto de la lámina está a una temperatura aproximada de 610°C ya en un estado sólido.

Los parámetros asignados coinciden con el proceso de la empresa ALUCASA CVG. El tiempo de colada es de 50 segundos que es el tiempo transcurrido desde que se inicia la colada hasta salir de los rodillos.

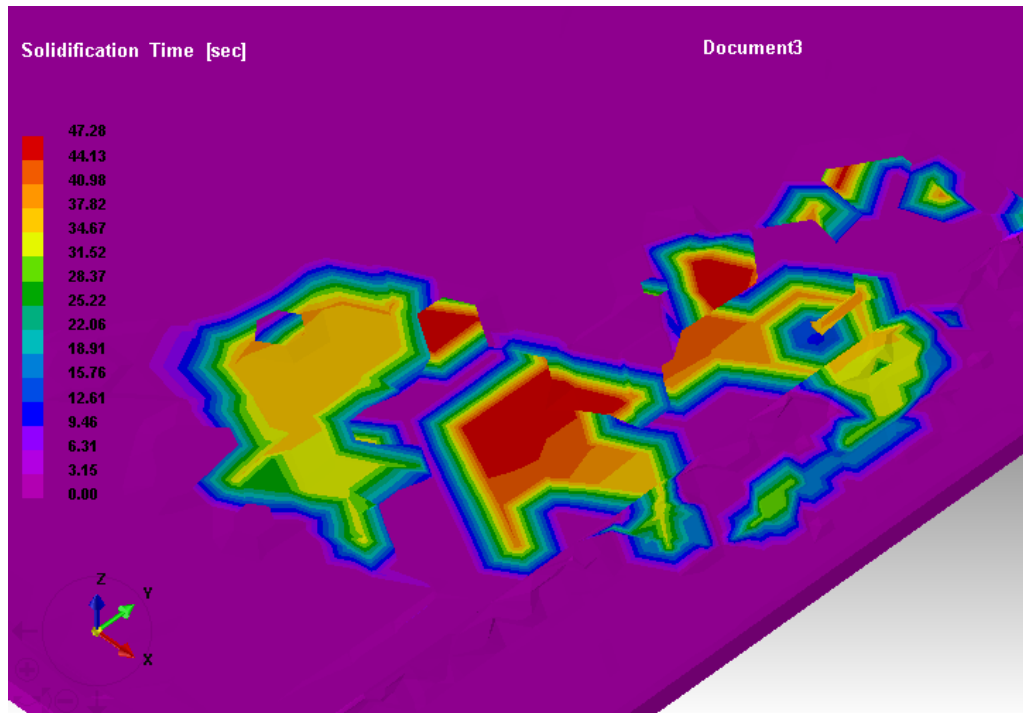
De 0 a 30 segundos, existe una transferencia de calor entre los rodillos y la lámina, y de 30 segundos a 50 segundos hay una transferencia de calor entre la lámina y el medio ambiente.

La temperatura ambiente se tomó a 30°C un promedio general del año, tomando en cuenta que se encuentra un horno industrial de gran tamaño que aumenta la temperatura interna de la planta.

4.4.4.1 Tiempo de solidificación

#### **4.4.4.1 Tiempo de solidificación.**

En la imagen 19 muestran los resultados del tiempo de solidificación de la simulación, permitiendo con una escala de colores observar el tiempo en que tarda en solidificar cada parte de la lámina bajo las condiciones establecidas, lo más importante son las áreas que tardan más en solidificar, como lo establecido que la primera área en contacto con los rodillos y el medio ambiente “Procast” focalizo la simulación en esa parte de la lámina. El área en morado significa el estado inicial 0 segundos y en rojo el final 47 segundos aproximadamente que es el tiempo máximo que tarda en solidificar la lámina.

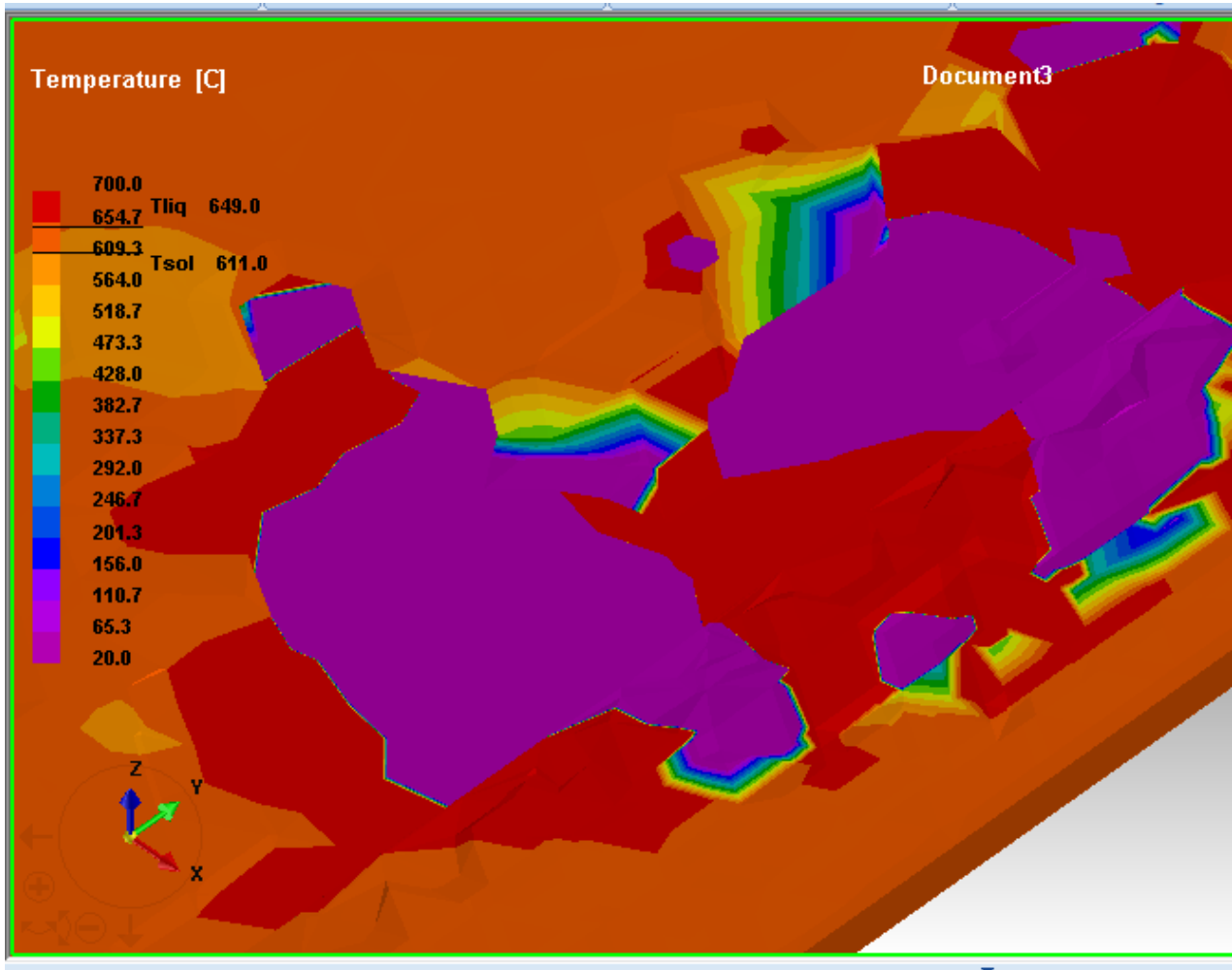


**Imagen 19** Tiempo de solidificación.

Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.4.2 Temperatura.

En el área de temperatura nos muestra una escala donde la temperatura menor es de  $20^{\circ}\text{C}$  que esta mostrada de color morado y la temperatura más alta es de  $700^{\circ}$  y es de color rojo. Nos muestra la temperatura de en el estado sólido y líquido. Los resultados obtenidos en temperatura tenemos que el estado líquido de la aleación es de  $650^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y se empieza a solidificar en  $611^{\circ}\text{C}$  como se muestra en la imagen 20. Permitiendo así saber qué estado se encontrará la lámina en un instante de tiempo determinado.

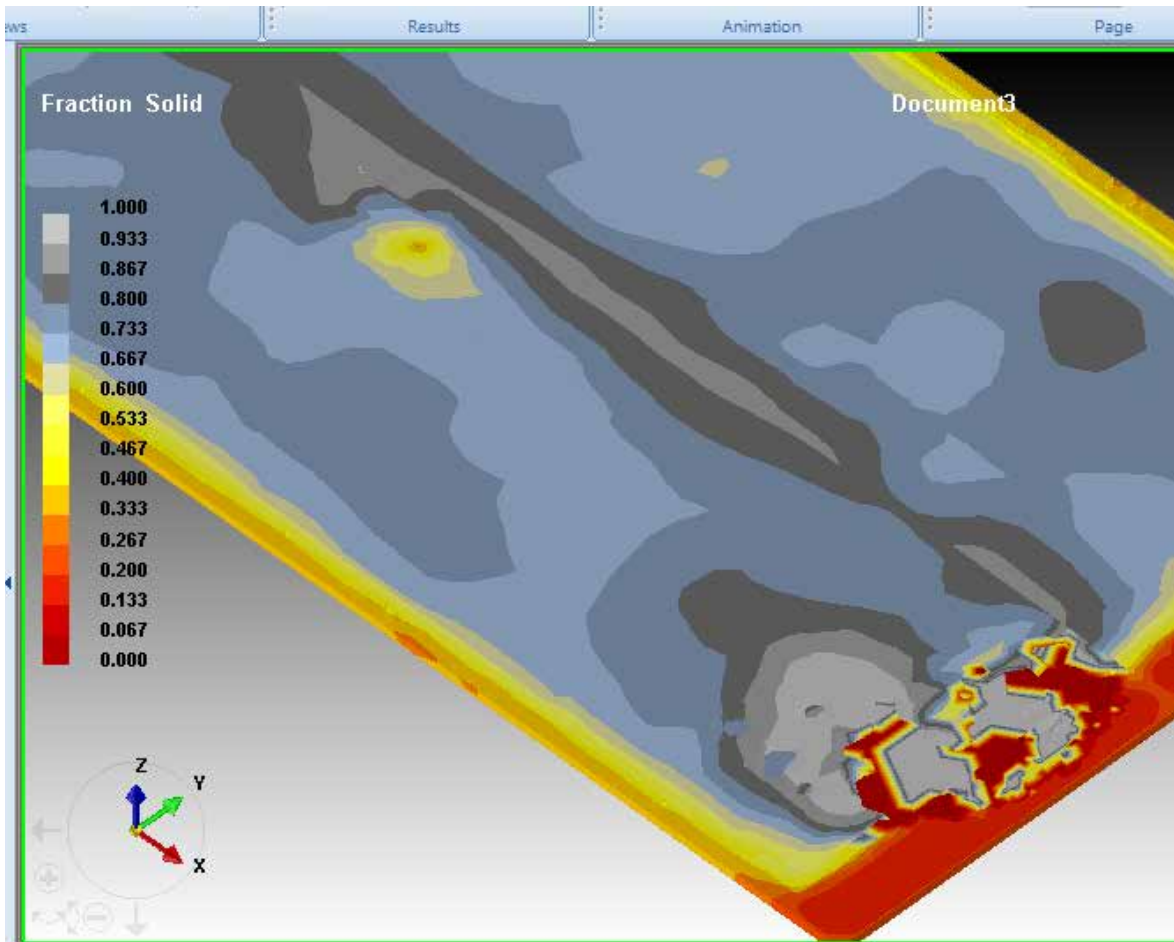


**Imagen 20** Temperatura.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.4.3 Fracción sólido.

En este módulo nos muestra una escala de 0 a 1 que va de rojo a gris respectivamente, representando así la fracción solido de la lámina, como se puede observar en la imagen 21, en el área en estudio de la lámina, se encuentra en algunas áreas en 1 es decir que están ya totalmente solidificadas. Esto nos permite ver en las otras áreas de la fracción de solido no es totalmente constante debido a las direcciones de la solidificación y para llegar a 1 es necesario dejar más tiempo la simulación debido al crecimiento de las dendritas, si estas dendritas no

tienen las presiones necesarias se pueden crear flujos los cuales posteriormente se pueden convertir en grietas.

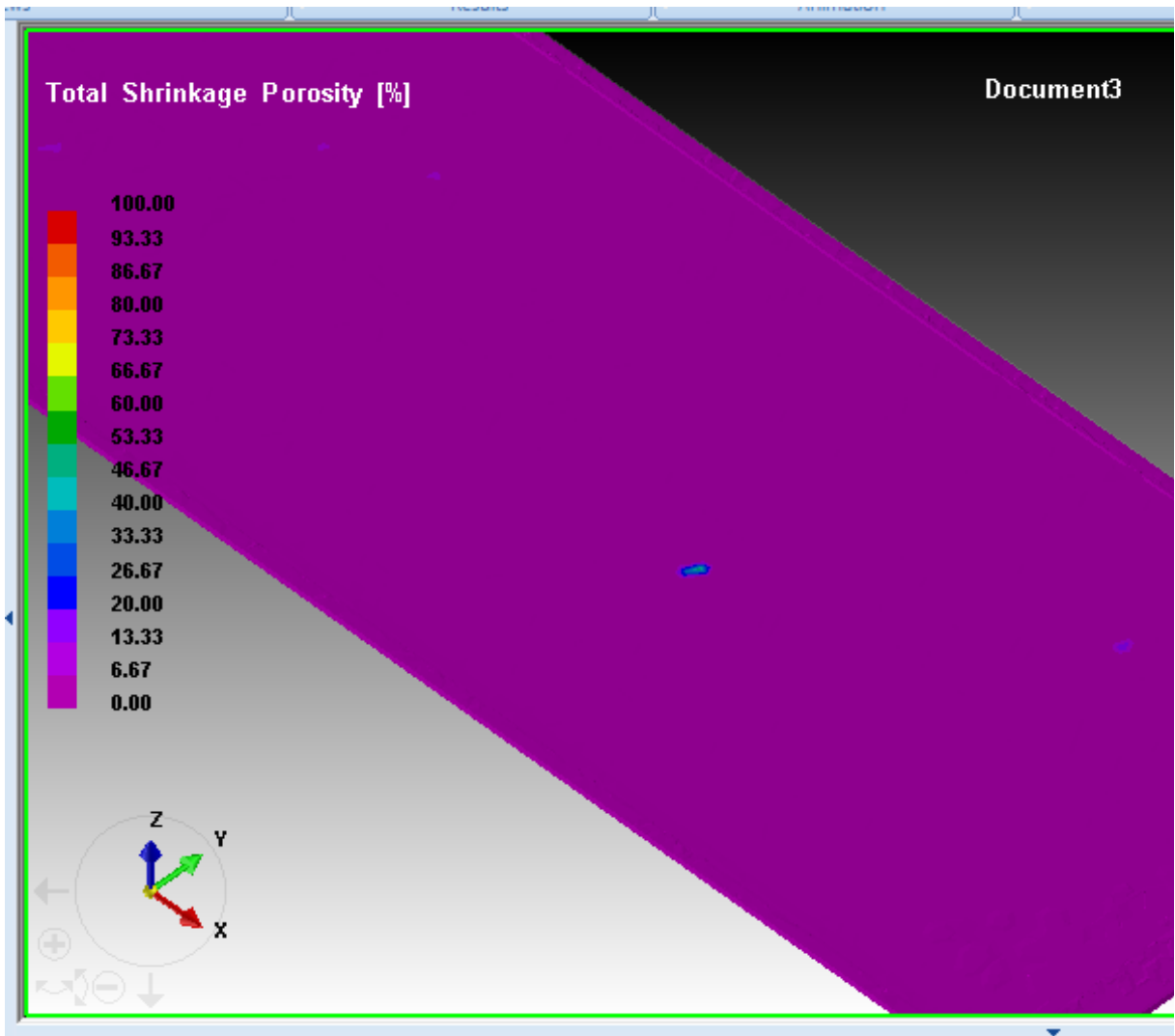


**Imagen 21** Fracción Solido.

Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### **4.4.4.4 Porcentaje de porosidad.**

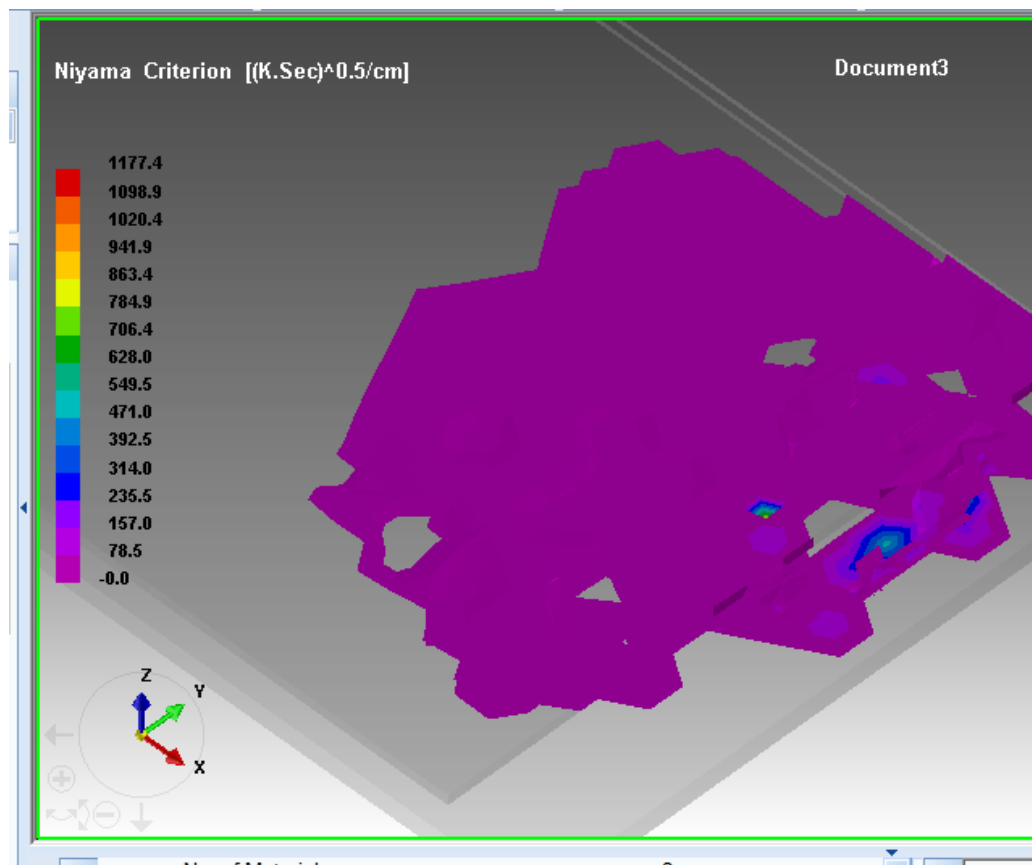
En el porcentaje de porosidad nos muestra una escala porcentual de va de 0% en morado al 100% en rojo. Como resultado tenemos que algunas áreas a lo largo de la lámina presentan un porcentaje máximo de 40%, este es un alto porcentaje y es debido a los gases atrapados durante la colada continua (ver imagen 22).



**Imagen 22** Porcentaje de porosidad.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.4.4.5 Criterio de Niyama

En el resultado del criterio de niyama nos muestra una escala que va desde -0.00 a 1744.1 (K.sec)<sup>0.5</sup>/cm, este criterio mencionado en la fase 1, nos muestras las microporosidades debidas a las contracciones de la lámina en la solidificación, como se muestra en la imagen 23 en el área que solidifico primera existe un crecimiento de este criterio, debido al flujo de calor presente en la transferencia de calor.



**Imagen 23** Criterio de Niyama.

Fuente Gascon y Tovar (2019)

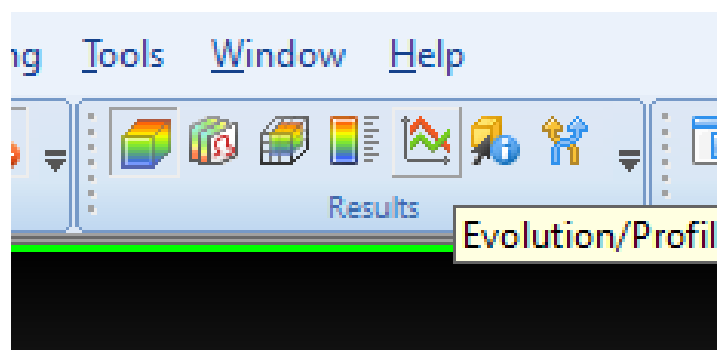
Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se observó que el software nos muestra los defectos a través de las porosidades. Ya que los poros se forman durante la solidificación por contracciones de la aleación de aluminio,

gases atrapados, para poder disminuir estos defectos de la solidificación se recomendaría modificar variables del proceso como tiempo o velocidades del ciclo de colada con la finalidad de optimizar el proceso y tener una reducción de estos defectos.

#### **4.5 Fase V: Comparar resultados de simulación con resultados reales para verificar exactitud de los resultados.**

En esta fase de la investigación, se compararon los resultados obtenidos de la herramienta computacional “Procast” y se comparó con los reales dados por la empresa ALUCASA CVG y datos provistos por bibliografías como curvas de enfriamiento y comportamiento del aluminio de manera teórica.

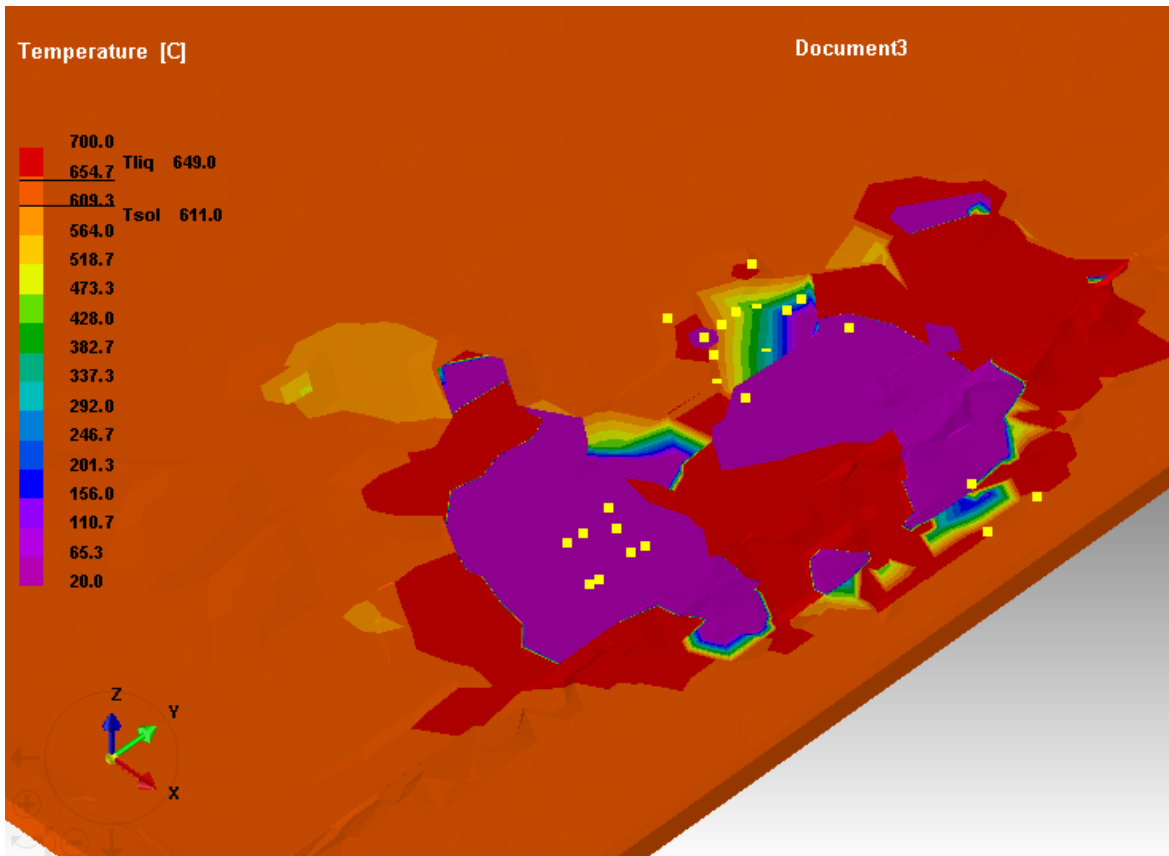
“ProCast” es capaz de representar en gráficos las curvas de los comportamientos evaluados anteriormente, tales como “temperatura vs tiempo”, “fracción sólido vs tiempo”, “Porcentaje de porosidad vs tiempo” y “Criterio de niyama vs tiempo”. Para esto se debe estar en la aplicación de “Visual-Viewer” y acceder en la herramienta “Evolution/Profile” como se puede observar en la imagen 24 esta misma es la que se encarga de representar de manera individual o grupal los nodos del mallado.



**Imagen 24** Evolution/Profile.  
Fuente Gascon y Tovar (2019)

#### 4.5.1 Temperatura Vs Tiempo.

Para evaluar estas curvas primero se seleccionó un grupo de nodos que está dentro del área de estudio de la solidificación como se muestra en la imagen 25.

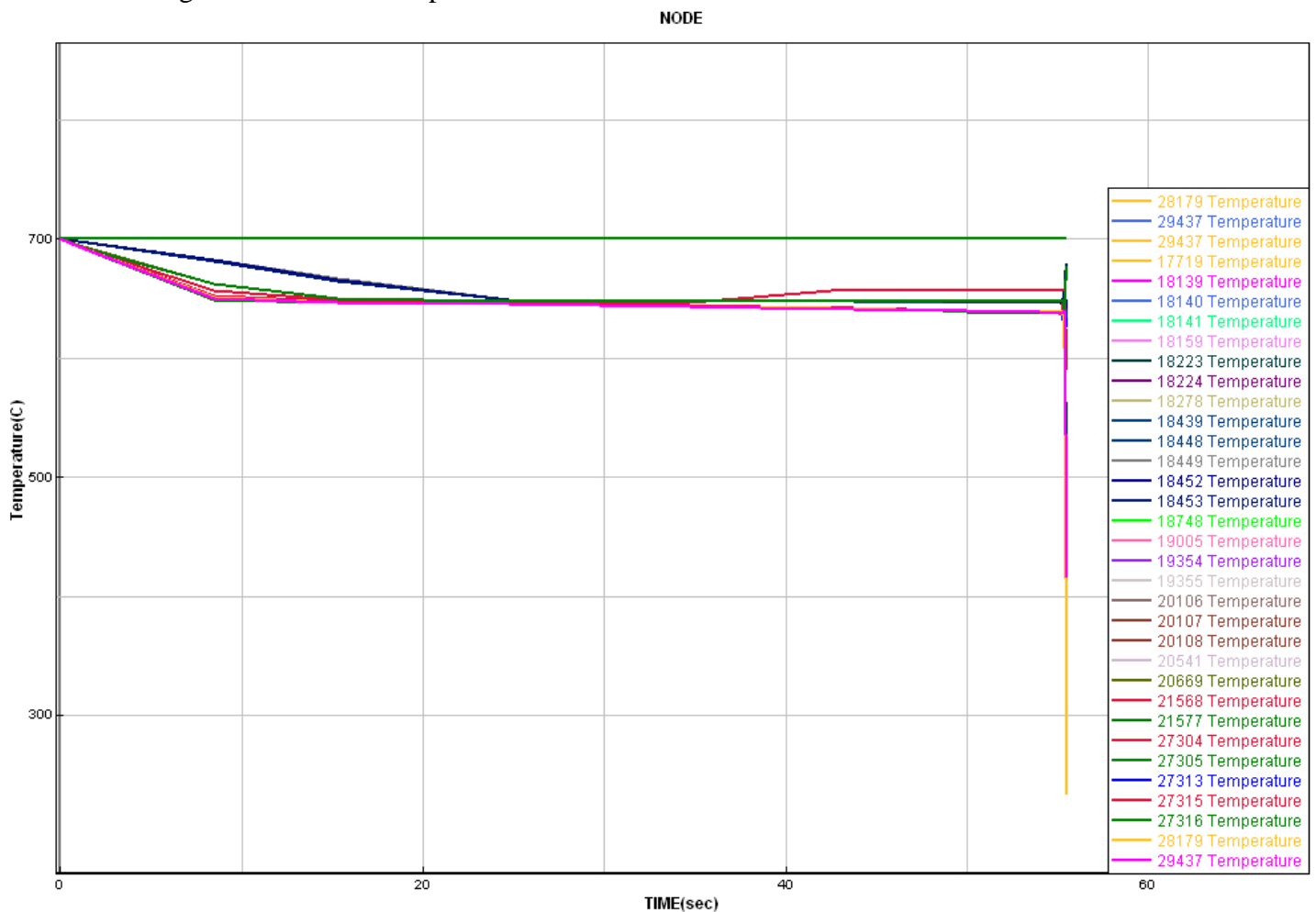


**Imagen 25** Selección de nodos a estudiar.

Fuente Gascón y Tovar (2019)

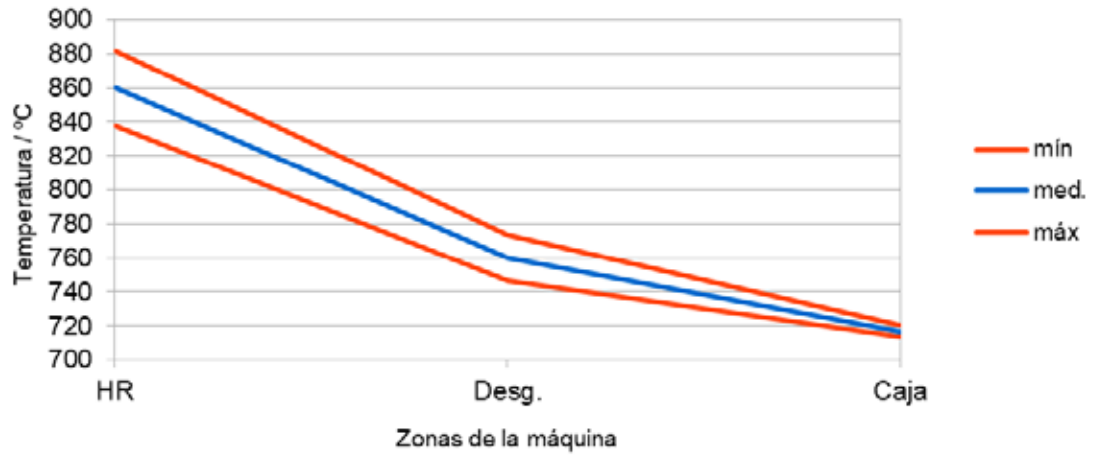
Los resultados obtenidos de ProCast los podemos observar en la imagen 25, en el cual podemos destacar que la mayoría de los nodos tienen un comportamiento similar al comportamiento teórico de la curva de enfriamiento del aluminio mostrado en la fase 1 (figura 26). También se puede observar que algunos nodos tienen un comportamiento constante eso se debe a que el proceso

de solidificación es más lento en estos nodos. Y con respecto a la curva obtenida dentro del proceso de colada continua de la empresa ALUCASA CVG, la cual representa las pérdidas de temperatura en el proceso, tenemos que el comportamiento es similar, una curva decreciente con cambios de temperatura a lo largo del tiempo como se puede ver en la figura 37 y en la imagen 27 se observa más a detalle la primera fase de los nodos en estudio con la que se comparó el grafico suministrado por ALUCASA CVG.

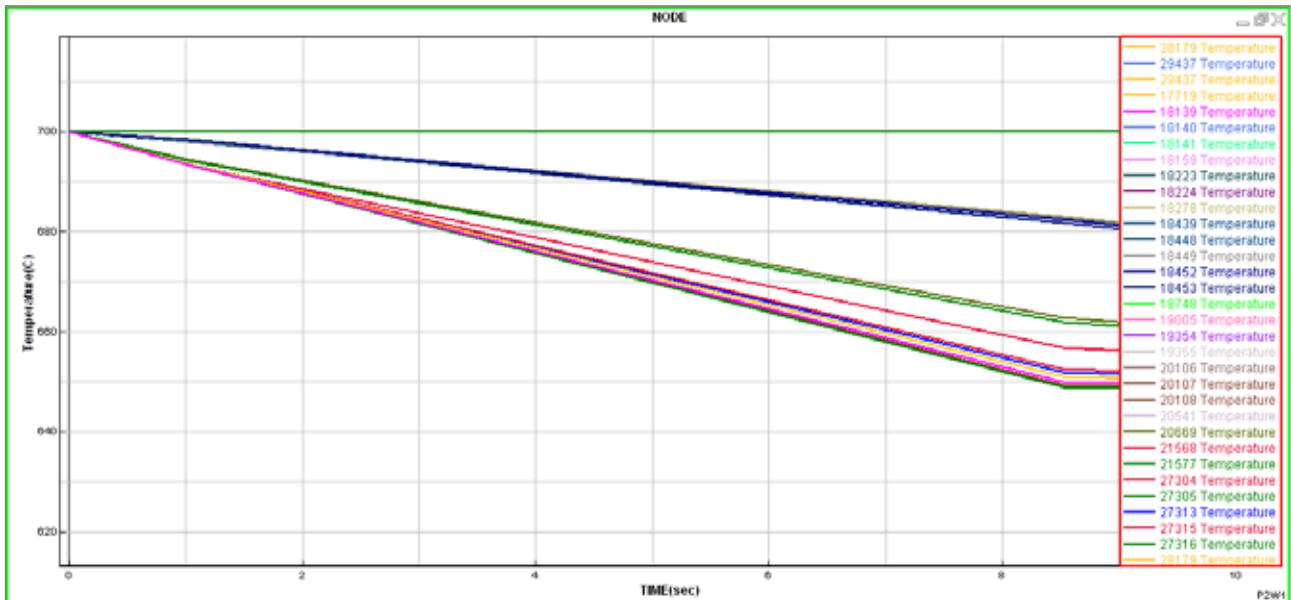


**Imagen 26** Curva Temperatura vs Tiempo  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

### Pérdidas de temperatura Colada 154



**Figura 37** Perdidas de temperatura  
Fuente ALUCASA CV



**Imagen 27** Curva Temperatura vs Tiempo  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

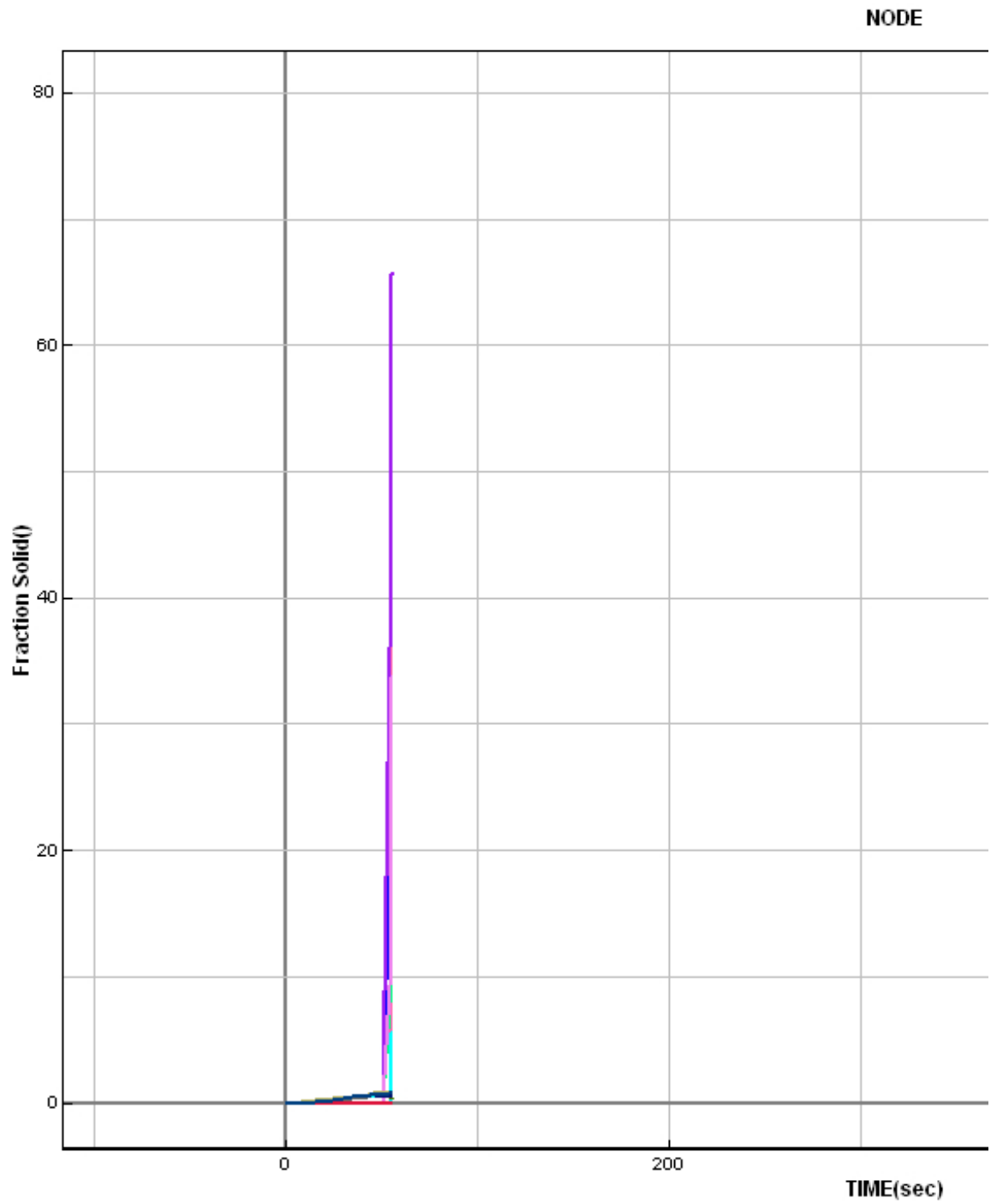
Una vez analizadas estas curvas de enfriamiento, podemos determinar que los cambios de temperatura en la solidificación en la simulación están bastante aproximado a los datos reales y teóricos del proceso de colada continua de aleación.

#### **4.5.2 Fracción sólido vs tiempo**

Los nodos evaluados es el mismo grupo mencionado anteriormente, una vez obtenidas las curvas “Fracción sólido vs tiempo” se puede observar en la imagen 28 que la mayoría tienen un comportamiento creciente, significando así que las dendritas se forman se crean de una manera progresiva.

El tiempo máximo mostrado es el mencionado anterior mente de 57 segundos aproximadamente y en este tiempo lo máximo alcanzado en el eje de las abscisas es de 60% aproximadamente, con esto se puede determinar que existe una diferencia en la solidificación a lo largo de la lámina. Para poder alcanzar el 100% es necesario que toda la pieza este fría en su totalidad. Existe un grupo de nodos que se crecen de manera más rápida, esto es debido a que el enfriamiento es mayor en ese intervalo de tiempo y alcanza un porcentaje mayor.

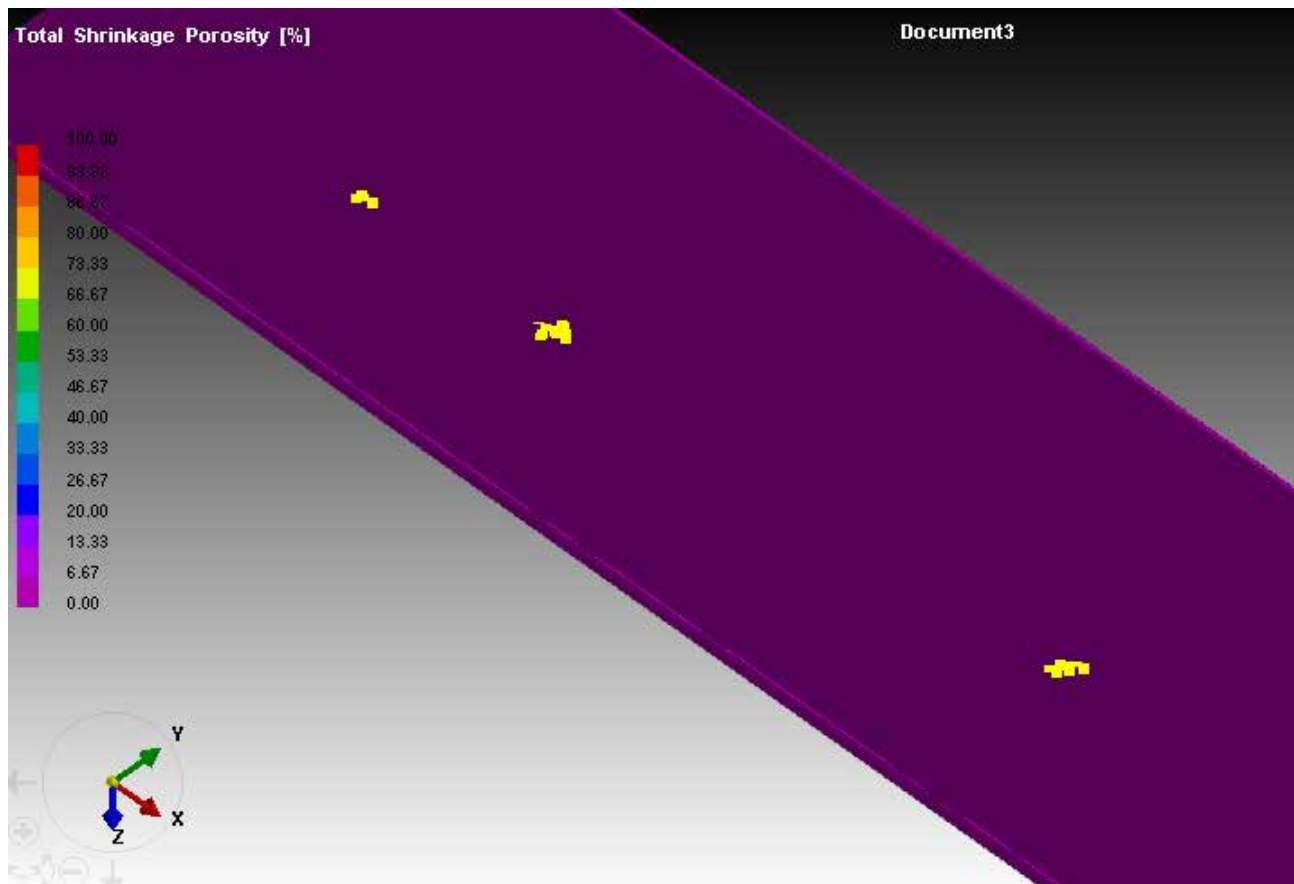
Estos resultados son comparados con los reales debido a que la información suministrada por la empresa ALUCASA CVG, no tiene resultados de este estudio.



**Imagen 28** Curva fracción solido vs Tiempo.  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

### 4.5.3 Porcentaje de porosidad vs tiempo.

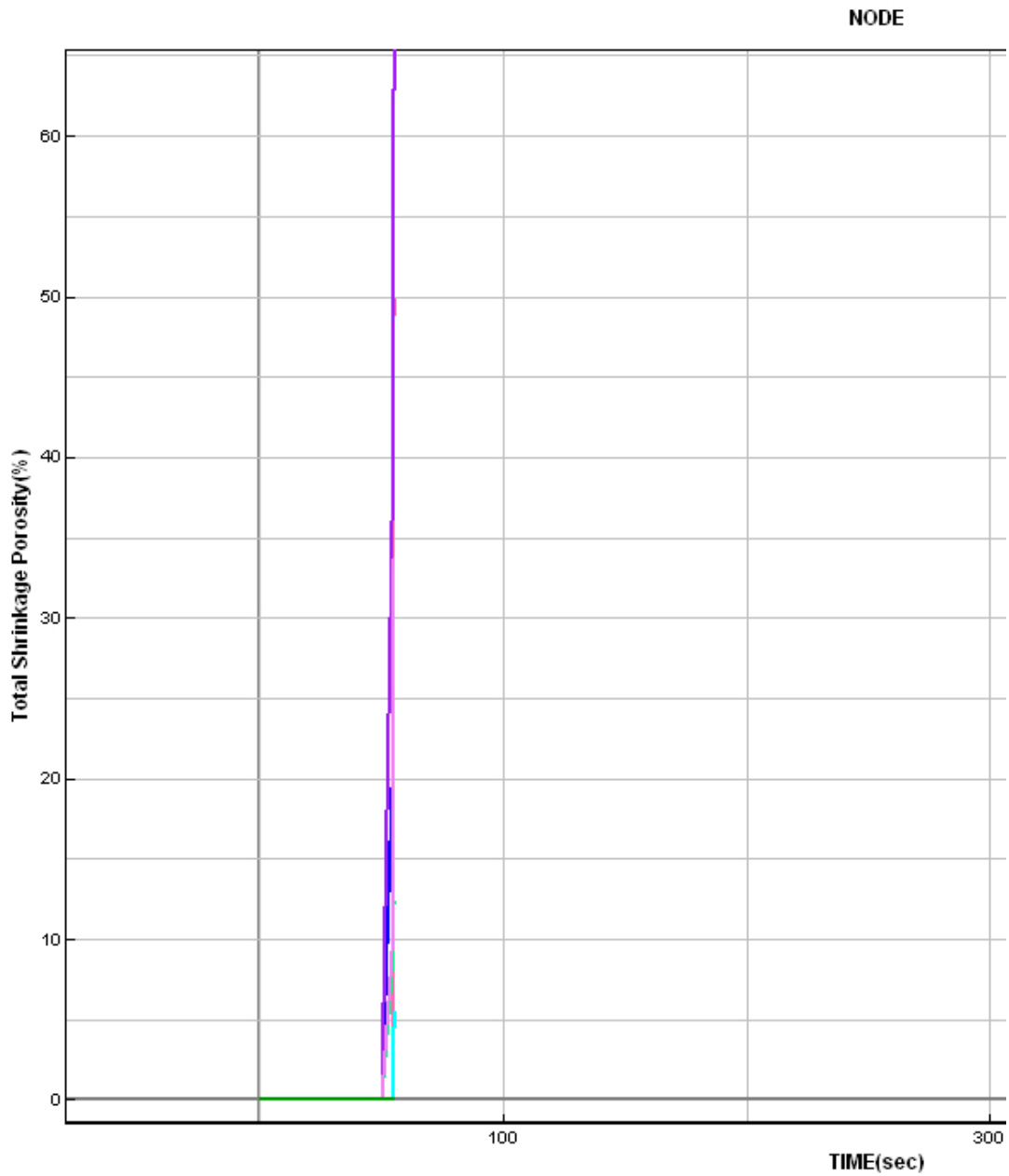
Los nodos seleccionados para el estudio se la curva fueron los que se observan en la imagen 29, representados en amarillo, se seleccionó ese grupo de nodos debido a que el modelo en 3D están visibles como la zona afectada por este porcentaje de porosidad.



**Imagen 29** Nodos seleccionados  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

En la imagen 30 se muestra la curva del crecimiento de porcentaje de porosidad a través del tiempo, como se puede observar en esta curva se trata de un crecimiento rápido al final de la simulación, esto es debido a que en esas zonas debe existir contracciones o gases acumulados, para que este porcentaje se mayor

a un 60%. De igual manera estos resultados no fueron comparados debido a que esa información en el estado real no está disponible por parte de la empresa ALUCASA CVG.

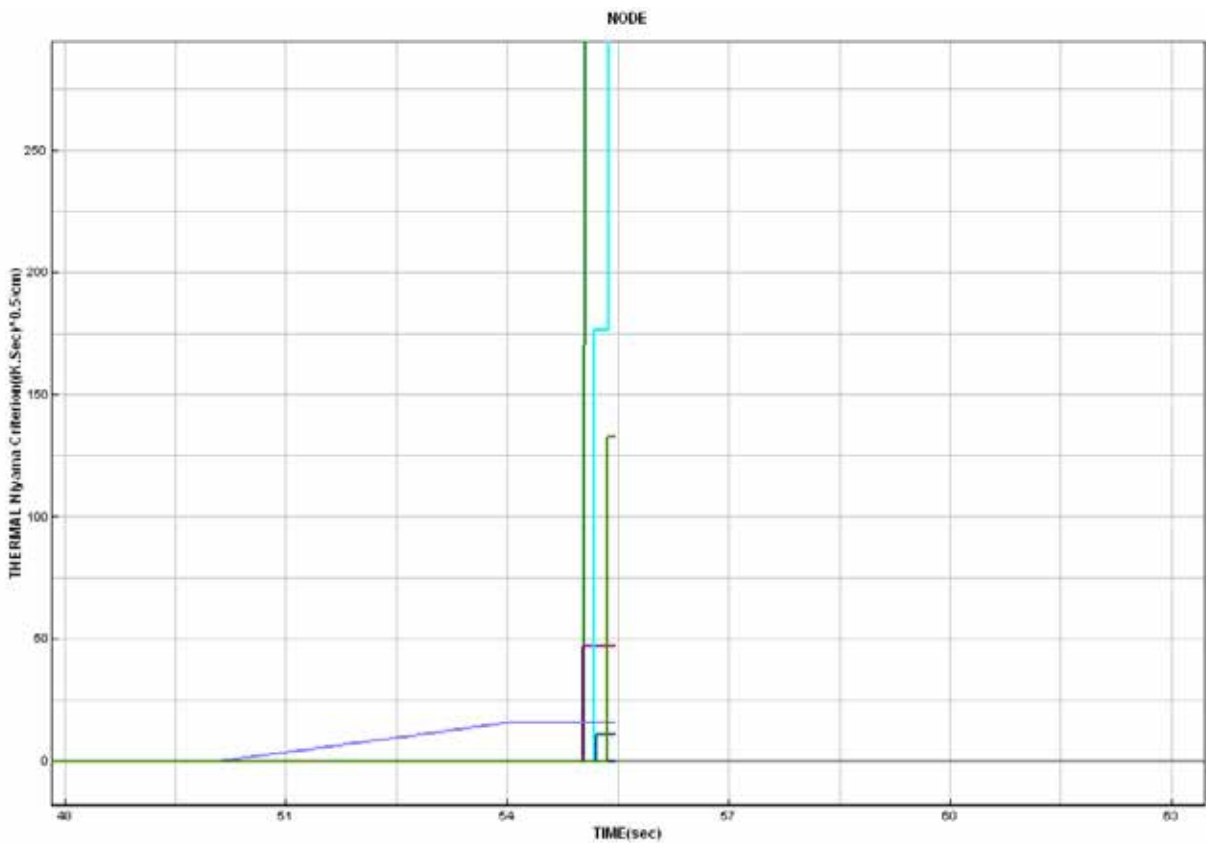


**Imagen 30** Curva Porcentaje de porosidad vs tiempo  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

#### 4.5.4 Criterio de Niyama vs Tiempo.

Para este análisis de resultado, se estudiaron los mismos nodos de la parte 4.5.1 y 4.5.2. Una vez obtenida la curva de “criterio de Niyama vs tiempo” como se observa en la imagen 31 podemos destacar que tiene un comportamiento en el cual cuando crece en el eje de las ordenadas, no crece en el eje de las abscisas y viceversa, esto es debido a que el criterio de Niyama es un valor tomado por el gradiente del flujo de calor.

Estos valores representan el módulo del vector en el cual se está moviendo el flujo. Para el crecimiento de microporosidades depende de la contracción de esta aleación y las presiones presentes durante el proceso.



**Imagen 31** Curva Porcentaje de porosidad vs tiempo  
Fuente Gascón y Tovar (2019)

#### **4.5.5 Análisis de los resultados de las comparaciones**

Como conclusión esta fase de la investigación es necesario acotar, que no todos los resultados fueron comparados con los reales, el único que si fue comparado con los reales fue la de la temperatura de solidificación, esto es debido a que los otros estudios son exclusivos de predicción de defectos y son desarrollados por el programa.

La comparación de los resultados de la simulación con los datos reales del proceso de colada continua de aluminio realizada en el 2017 por la empresa ALUCASA CVG, nos permitió dar la conclusión de que la simulación es muy aproximada a la realidad, ya que tiene comportamientos de pérdidas de temperatura de tal manera que se puede tomar esta simulación como una herramienta confiable para la predicción de los defectos presentes en la solidificación de la aleación AA1100.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones.

Según los resultados obtenidos mediante la simulación realizada se puede concluir con los siguientes aspectos:

1.- La simulación a través de la herramienta computacional “ProCast” es de gran utilidad ya que nos ayuda a predecir la formación de los defectos del proceso de colada continua, mostrándonos defectos como porosidades, porcentaje de porosidades, criterio de Niyama, fracción sólido, entre otra gama de herramientas disponibles.

2.- El software represento resultados visibles en 3D de manera eficiente, mostrándonos la evolución a través del tiempo.

3.- La simulación en comparación a los datos reales tienen unos comportamientos aproximados a los datos reales de la empresa ALUCASA CVG.

4.- Un paso indispensable en una simulación del proceso de solidificación es la simulación térmica. Este paso permite comprobar la curva de enfriamiento del aluminio que realiza la herramienta durante la simulación inicial coincide con la curva teórica, de manera de proseguir con la simulación.

5.- Hay que tener en cuenta que la herramienta computacional no considera la humedad del ambiente, factor básico que afecta la solubilidad del hidrogeno en el aluminio y, por ende, puede afectar los resultados en la formación de defectos.

#### 5.2 Recomendaciones.

Con lo expuesto anteriormente se pueden sugerir algunas medidas para mejorar los resultados de la simulación:

1.- Estas simulaciones se han realizado para la aleación de aluminio AA1100 con espesor de 6mm, pero también se podrán aplicar en cualquier tipo de aluminio o algún otro metal disponible en “ProCast” para así observar el

comportamiento de otras aleaciones, ya que existen otras opciones disponibles para llevar a cabo simulaciones.

2.- Se recomienda para controlar el proceso de solidificación de aluminio en la colada continua, incluir más variables en la simulación hasta lograr considerar todas las que influyan en el proceso.

3.- Se recomienda incluir en el programa de estudios de la Universidad José Antonio Páez, una asignación en la cual se puedan hacer uso tipo de herramientas computacionales en el área del “Cast” ya que es de gran importancia y de unidad en el mundo laboral estar avanzando con las nuevas tecnologías disponibles.

4.- Se recomienda un adiestramiento a los ingenieros encargados de las pruebas de colada continua en la empresa ALUCASA CVG, para que puedan realizar las pruebas para comprobar la veracidad y eficacia de este.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Impresas

Arias, Fidas (2006) **Introducción a la Metodología Científica**. Caracas, Venezuela. Editorial: Caracas. [Consulta: Abril, 10, 2019]

Hurtado, I. y Toro, G. (2000). **Paradigmas y Métodos de Investigación en Tiempos de Cambio**. Editorial Episteme. Cuarta Edición. Valencia-Venezuela. [Consulta: Abril, 25, 2019]

Tamayo y Tamayo, Mario (2012) **El proceso de la investigación científica**. Editorial: Noriega Editores. Cuarta Edición México. [Consulta: Marzo, 23, 2019]

### Referencias electrónicas

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista P. (2004) **Metodología de la investigación**. Disponible en:

[https://investigar1.files.wordpress.com/2010/05/1033525612-mtis\\_sampieri\\_unidad\\_1-1.pdf](https://investigar1.files.wordpress.com/2010/05/1033525612-mtis_sampieri_unidad_1-1.pdf) [Consulta: 20 Abril, 2019]

Sabino, C. (2004) **El proceso de la investigación**. Disponible en: [http://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso\\_investigacion.pdf](http://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso_investigacion.pdf) [Consulta: Abril, 15, 2019]

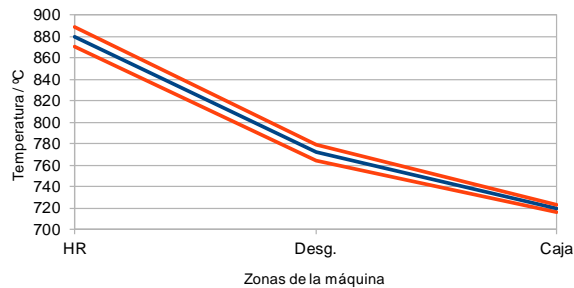
Tamayo, M. (2012) **Definición del Marco teórico**. Disponible en: <http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/2013/08/definicion-del-marco-teorico.html> [Consulta: Abril, 15, 2019]

# **ANEXO A**

**TABLA DE VALORES REALES**  
**ALUCASA CVG**

Nº de Rollos	ancho	% Fe	% Si	% Ti	% Ti (horno)	% Ti efectivo	V (banda) m/min	V (Ti) cm/min	V (Ti) teórico	Temperaturas en °C						Desg)	Caja)	Arco de contacto		
										HR	Desg.	Caja	Desg)	Caja)						
1,53231E+12	1370	0,841	0,571	0,019	0,0103	0,0087	1	26	27,81648	900	880	783	768	723	715	114,5	56,5	171	64	55
1,53241E+12	1370	0,849	0,559	0,021	0,011	0,01	1	26	27,81648	866	876	768	770	710	709	102	59,5	161,5	54,5	
2001	1370	0,849	0,584	0,02	0,0125	0,0075	1	26	27,81648	877	876	761	765	711	717	113,5	49	162,5	59	
2002	1370	0,849	0,584	0,02	0,0125	0,0075	1	26	27,81648	878	882	773	772	720	718	107,5	53,5	161	64	
3001	1370	0,855	0,601	0,021	0,0121	0,0089	1	26	27,81648	880	880	770	781	719	720	104,5	56	160,5	64,5	
3002	1370	0,832	0,586	0,022	0,0121	0,0099	1	26	27,81648	884	883	783	781	722	721	101,5	60,5	162	66,5	
1,53251E+12	1370	0,843	0,591	0,021	0,0086	0,0124	1,01	26	28,09464	884	884	778	777	723	719	106,5	56,5	163	66	
1002	1370	0,846	0,603	0,022	0,0086	0,0134	1,01	26	28,09464	883	883	778	781	717	721	103,5	60,5	164	64	
2001	1370	0,889	0,623	0,021	0,0087	0,0123	1	30	27,81648	875	868	785	779	717	711	89,5	68	157,5	59	
3001	1370	0,859	0,6	0,024	0,0081	0,0159	1	30	27,81648	870	875	773	771	718	716	100,5	55	155,5	62	
3002	1370	0,874	0,601	0,024	0,0081	0,0159	1	30	27,81648	874	868	773	773	716	715	98	57,5	155,5	60,5	
1,53261E+12	1370	0,866	0,584	0,022	0,0081	0,0139	1,01	26	28,09464	870	866	782	770	725	712	92	57,5	149,5	63,5	
1002	1370	0,894	0,616	0,018	0,0081	0,0099	1	26	27,81648	878	873	768	776	712	717	103,5	57,5	161	59,5	
2001	1370	0,83	0,605	0,021	0,0109	0,0101	1	26	27,81648	880	872	786	783	716	721	91,5	66	157,5	63,5	
3001	1370	0,882	0,596	0,022	0,0111	0,0109	1	26	27,81648	878	876	786	787	720	720	90,5	66,5	157	65	
3002	1370	0,872	0,584	0,042	0,0111	0,0309	1	26	27,81648	873	880	785	780	720	720	94	62,5	156,5	65	
1,53271E+12	1370	0,854	0,579	0,021	0,0106	0,0104	1	26	27,81648	873	864	786	775	712	714	88	67,5	155,5	58	
1002	1370	0,802	0,559	0,021	0,0106	0,0104	1,01	26	28,09464	864	865	769	775	714	718	92,5	56	148,5	61	
2001	1370	0,791	0,568	0,024	0,0093	0,0147	1,01	26	28,09464	866	870	777	766	718	715	96,5	55	151,5	61,5	
2002	1370	0,775	0,59	0,02	0,0093	0,0107	1,01	26	28,09464	878	870	775	772	716	715	100,5	58	158,5	60,5	
3001	1370	0,824	0,58	0,02	0,0083	0,0117	1	26	27,81648	862	863	772	771	720	716	91	53,5	144,5	63	
3002	1370	0,825	0,584	0,02	0,0083	0,0117	1	26	27,81648	860	856	777	782	719	720	78,5	60	138,5	64,5	
1,53281E+12	1370	0,812	0,558	0,0198	0,0081	0,0117	1	26	27,81648	857	856	772	779	712	719	81	60	141	60,5	
2001	1370	0,836	0,566	0,017	0,0076	0,0094	1	26	27,81648	862	875	773	776	719	720	94	55	149	64,5	
3001	1370	0,85	0,572	0,02	0,0072	0,0128	1	26	27,81648	879	881	784	777	723	717	99,5	60,5	160	65	
3002	1370	0,86	0,572	0,02	0,0072	0,0128	1	28	27,81648	877	880	781	790	719	720	93	66	159	64,5	
1,53291E+12	1370	0,896	0,583	0,02	0,0072	0,0128	1	28	27,81648	875	880	775	779	720	720	100,5	57	157,5	65	
2001	1370	0,896	0,585	0,02	0,0083	0,0117	1	28	27,81648	878	874	778	786	719	719	94	63	157	64	
2002	1370	0,809	0,574	0,019	0,0083	0,0107	1,01	28	28,09464	877	875	785	757	716	720	105	53	158	63	
1,53301E+12	1370	0,896	0,602	0,022	0,0105	0,0115	1,01	28	28,09464	844	862	755	787	720	718	82	52	134	64	
1002	1370	0,882	0,586	0,025	0,0105	0,0145	1	28	27,81648	868	875	779	768	719	715	98	56,5	154,5	62	
2001	1370	0,856	0,617	0,026	0,0123	0,0137	1	31	27,81648	878	876	772	772	720	711	105	56,5	161,5	60,5	
3001	1370	0,819	0,592	0,02	0,009	0,011	1	31	27,81648	872	874	776	778	710	714	96	65	161	57	

Pérdidas de temperaturas  
Colada 153



	873,31	776,1	717,4
	880	772	720
	875	776,5	718
	8,74	7,23	3,59
	871,26	880	888,7
	764,77	772	779,2
	716,41	720	723,6