



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA EN MATERIALES**



---

**“ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS  
DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN DE UNA  
EMPRESA”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN  
MATERIALES**

PRESENTA:

**DANIEL MORALES RAMÍREZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DRA. PAULINA ARELLANES LOZADA**

CO-DIRECTOR DE TESIS:

**DRA. JANETTE ARRIOLA MORALES**

H. Puebla de Z. a 06 de junio del 2023





"HUP, 50 años de enseñanza y salud"

Oficio No. FIQ/AC/069/2023  
Asunto: Registro de Tema de Tesis

**C. DANIEL MORALES RAMÍREZ**  
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN  
INGENIERÍA EN MATERIALES  
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la **Licenciatura en Ingeniería en Materiales** cuyo título es el siguiente:

"Estudio de los parámetros críticos de los procesos de fundición de una empresa"

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesis: Dra. Paulina Arellanes Lozada.  
Co-Directora: Dra. Janette Arriola Morales.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**

Atentamente  
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"  
H. Puebla de Z., a 21 de Abril de 2023

**Dra. Valeria Jordana González Coronel**  
Secretaria Académica

C.c.p. Directora de Tesis: Dra. Paulina Arellanes Lozada.  
C.c.p. Co-Directora: Dra. Janette Arriola Morales.  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C. P. 72590  
01 (222) 229 55 00  
Exts. 7250 y 7251

---

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre, Piedad, por su sacrificio y esfuerzo para sacarme adelante. Este logro es gracias a ti.*

*A mis dos pilares de toda la vida, Celia e Isabel, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente. Todo ha sido más fácil con ustedes, les estoy profundamente agradecido.*

*A mis hermanos, familiares y amigos que siempre estuvieron ahí para apoyarme y motivarme.*

*A mis profesores de la carrera y de mi trayectoria académica que influyeron en mí, nunca me olvido de ustedes. Gracias por ser el peldaño para llegar a convertirme en un profesional.*

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Facultad de ingeniería química, por ser un libro que imparte conocimiento. Gracias por la experiencia y enseñanza de estos años.*

---

# ÍNDICE

Resumen.....	11
Introducción .....	12
Planteamiento del problema.....	13
Justificación .....	13
Objetivos .....	14
General .....	14
Específicos .....	14
Hipótesis.....	14
Capítulo 1. Marco teórico.....	15
1. Antecedentes históricos de la fundición .....	15
1.2 Práctica de moldeo.....	16
1.2.1 Tipo de molde.....	16
1.2.2 Fusión y colada .....	17
1.2.2.1 Etapas críticas.....	17
1.2.2.2 Hornos de fundición .....	19
1.3 Ruta de fabricación.....	20
1.4 Técnica de fundición a la cera pérdida.....	21
1.4.1 Ceras.....	22
1.4.1.1 Características de las ceras.....	22
1.4.2 Molde cerámico.....	23
1.4.2.1 Componentes del molde .....	23
1.4.2.2 Características del molde cerámico .....	24
1.4.3 Operaciones secundarias .....	24
1.5 Técnica de fundición por arena .....	25
1.5.1 Tipos de arena .....	25
1.5.1.1 Características de la arena .....	26
1.5.2 Partes del molde de arena .....	26
1.5.3 Moldeo en arena verde .....	27
1.5.3.1 Composición de la arena verde .....	27
Capítulo 2. Descripción de los procesos de fundición.....	28

2.1 Proceso de cera pérdida.....	28
2.1.1 Diseño y fabricación del molde .....	28
2.1.2 Inyección de cera.....	28
2.1.3 Acabado y ensamblaje.....	29
2.1.4 Armado de árboles .....	30
2.1.5 Construcción de molde cerámico.....	30
2.1.6 Extracción de cera (descerado) .....	31
2.1.7 Fundición de conchas cerámicas.....	32
2.1.8 Remoción cerámica y acabado.....	33
2.2 Proceso de arena verde.....	34
2.2.1 Diseño y fabricación del molde .....	34
2.2.2 Preparación de la arena .....	34
2.2.3 Elaboración de moldes .....	35
2.2.4 Fundición de moldes de arena .....	35
Capítulo 3. Resultados y discusión .....	36
3.1 Análisis e identificación de las variables y problemas que causan defectos .....	36
3.1.1 Clasificación de las variables y problemas según su origen .....	37
3.1.1.1 Diseño de moldes .....	37
3.1.1.2 Operaciones llevadas a cabo manualmente por los operarios .....	37
3.1.1.3 Maquinaria .....	38
3.1.1.4 Material del proceso .....	38
3.1.1.4.1 Cera .....	38
3.1.1.4.2 Cerámicos.....	39
3.1.1.4.3 Arena .....	39
3.1.1.4.4 Metal .....	40
3.1.1.5 Fundición .....	40
3.2 Defectos de fundición en el proceso .....	41
3.2.1 Inclusiones.....	41
3.2.1.1 Orígenes, causas e influencia de las inclusiones .....	43
3.2.2 Porosidad.....	44
3.2.2.1 Orígenes, causas e influencia de la porosidad .....	46

---

3.2.3 Cola de rata .....	47
3.2.3.1 Orígenes, causas e influencia de la cola de rata.....	48
3.2.4 Discontinuidades superficiales .....	49
3.2.4.1 Orígenes, causas e influencia de las discontinuidades.....	50
3.2.5 Rugosidad .....	50
3.2.5.1 Orígenes, causas e influencia de la rugosidad.....	51
3.2.6 Llenado incompleto.....	52
3.2.6.1 Orígenes, causas e influencia del llenado incompleto .....	52
3.2.7 Exceso de material .....	53
3.2.7.1 Orígenes, causas e influencia del exceso de material .....	53
3.3 Recomendaciones .....	54
3.3.1 Tipo de cera y tratamiento .....	54
3.3.2 Parámetros de operación en la inyección .....	57
3.3.3 Material cerámico y su cuidado .....	60
3.3.3.1 Tipo de material .....	60
3.3.3.2 Cuidado de las etapas del proceso de cerámicos.....	64
3.3.3.3 Mantenimiento y limpieza del área .....	67
3.3.4 La arena verde y su control de las propiedades.....	70
3.3.4.1 Composición y mezclado .....	71
3.3.4.1.1 Composición .....	71
3.3.4.1.2 La molienda de la arena verde .....	73
3.3.4.2 Arena caliente .....	74
3.3.4.3 Granulometría y morfología de los granos de la arena.....	75
3.3.5 Proceso de fundición de metales .....	78
3.3.5.1 Prácticas y condiciones de fundición .....	78
3.3.5.2 Mejora en la desgasificación .....	81
Conclusiones.....	82
Bibliografía.....	83

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Clasificación general de los procesos de fundición .....	16
Figura 2.	Clasificación general de los metales.....	17
Figura 3.	Puntos de fusión de diferentes metales y aleaciones.....	18
Figura 4.	Ruta de fabricación de fundición.....	20
Figura 5.	Etapas de la fundición por cera pérdida: 1) se producen los moldes y patrones de cera; 2) armado del árbol de fundición; 3) aplicación de capas cerámicas; 4) secado del revestimiento cerámico; 5) descerado y cocción del cerámico; 6) precalentamiento de la concha cerámica y fundición del metal; 7) desmoldeo y limpieza de piezas.....	21
Figura 6.	Secuencia de las etapas de producción en la fundición por arena .....	25
Figura 7.	Esquema de las partes principales de un molde de arena.....	26
Figura 8.	Interiores de un molde de aluminio .....	28
Figura 9.	Inyección de cera en molde de aluminio.....	29
Figura 10.	Extracción del patrón de cera del molde de aluminio .....	29
Figura 11.	Proceso de armado de un árbol de fundición .....	30
Figura 12.	Árbol de fundición .....	30
Figura 13.	Aplicación de lodo cerámico .....	31
Figura 14.	Secado de capa cerámica .....	31
Figura 15.	Revestimientos cerámicos ingresados a una autoclave de vapor.....	32
Figura 16.	Colada de metal fundido en conchas cerámicas.....	32
Figura 17.	Árboles de fundición sin cerámica .....	33
Figura 18.	Ejemplo de un prototipo utilizado para reproducir piezas por arena.....	34
Figura 19.	Moldes de arena verde.....	35
Figura 20.	Pieza con inclusiones.....	41
Figura 21.	Inclusión cerámica.....	42
Figura 22.	Inclusión de arena a 180 mm en una fundición de hierro dúctil de sección gruesa .....	43
Figura 23.	Inclusión de arena a 5 mm en una fundición de hierro gris producida en un molde seco de arena verde	43
Figura 24.	Pieza con porosidad.....	44
Figura 25.	Pieza con defecto de contracción (rechupe).....	45
Figura 26.	Clasificación de los tipos de porosidades.....	45

---

Figura 27.	Colas de rata en superficies planas de fundiciones de hierro.....	47
Figura 28.	Pieza fisurada .....	49
Figura 29.	Pieza agrietada .....	49
Figura 30.	Pieza fracturada.....	49
Figura 31.	Superficie rugosa de una pieza de aluminio.....	51
Figura 32.	Pieza incompleta debido a la falta de material.....	52
Figura 33.	Exceso de material en una pieza .....	53
Figura 34.	Pieza con rebaba .....	53
Figura 35.	Cera sólida con impurezas.....	55
Figura 36.	Cera que contiene dos formas de relleno (A) y (B) que contiene una forma de relleno ....	56
Figura 37.	Depósito de cera susceptible a contaminación.....	57
Figura 38.	Polvo en rack con patrones de cera .....	57
Figura 39.	Burbujas en patrón de cera .....	58
Figura 40.	Rebaba en patrón de cera .....	58
Figura 41.	Escape de material debido a grietas en concha cerámica .....	60
Figura 42.	Exceso de material cerámico seco en contenedor a) interior b) exterior.....	67
Figura 43.	Resultados de una prueba que muestra las colonias de bacterias .....	68
Figura 44.	Porcentaje de humedad variante .....	70
Figura 45.	Arena con materiales extraños .....	70
Figura 46.	Resistencia a la compresión en verde con % de adición de agua .....	72
Figura 47.	Arena verde grumosa reutilizada .....	73
Figura 48.	Clasificación de los granos según su redondez y esfericidad .....	76
Figura 49.	Solubilidad del nitrógeno en función de los elementos aleantes .....	80

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Hornos de fusión para diferentes aplicaciones .....	19
Tabla 2.	Clasificación de ceras.....	22
Tabla 3.	Propiedades de la cera que preocupan a las industrias.....	54
Tabla 4.	Parámetros de operación en la inyección .....	58
Tabla 5.	Composiciones nominales y propiedades típicas de los refractarios comunes para la fundición por cera pérdida.....	62
Tabla 6.	Aspectos que cuidar en las diferentes etapas de cerámicos.....	64
Tabla 7.	Composición promedio de la arena verde .....	71
Tabla 8.	Clasificación de la arena según el índice AFS .....	76

---

## Resumen

Los defectos de fundición son los principales obstáculos, problemas y limitaciones en la producción de piezas metálicas en una empresa de fundición del estado de Puebla, causando impactos negativos y significativos de varias maneras.

A fin de evitar la mayor cantidad de defectos de una empresa dedicada a la fabricación de piezas por las técnicas de cera pérdida y arena verde, se hizo el análisis y diagnóstico de las etapas del proceso, para identificar y clasificar las principales variables que provocan defectos en el producto terminado. Además, se generó una ruta de corrección y recomendaciones de los parámetros críticos a cuidar.

Las principales recomendaciones abarcan los siguientes aspectos: la adecuación o diferente elección de materiales, cuidado de las propiedades de estos, ajuste de parámetros de trabajo y operación, limpieza de áreas, así como, control de las condiciones de fundición.

Si bien dichas recomendaciones ayudan a la disminución de defectos en piezas metálicas, la implementación de un riguroso sistema de inspección, control de calidad, capacitación del personal e inversión en diversos equipos con mayor avance tecnológico en la empresa, ayudará a estandarizar la producción de piezas metálicas de alta calidad.

---

## Introducción

La fundición de metales es uno de los procesos de manufactura más antiguos, importantes y conocidos por la humanidad para la fabricación de piezas con formas y geometrías complejas, que ha pasado de ser un arte a una ciencia aplicada en los últimos años [1]. Hoy en día existen diversas técnicas de fundición de metales, que son empleadas para la producción de piezas, que serán utilizadas en amplias áreas industriales. Sin embargo, aunque las técnicas de fabricación han evolucionado y se cuenta con avances tecnológicos en la industria de la fundición, se tienen varios desafíos [2].

Los defectos de fundición son los principales problemas y limitaciones a los que se enfrentan las industrias de la fundición [3]. Debido a que estos efectos no deseados afectan las propiedades y calidad de las piezas producidas. Esto conlleva a diversas consecuencias negativas para las empresas, principalmente pérdidas económicas.

Los defectos pueden producirse por distintas causas en las diferentes etapas del proceso de fundición. Por lo tanto, es crucial identificar los orígenes para tomar medidas, que ayuden a la empresa a eliminar los defectos y garantizar la calidad de sus productos.

Con el fin de prever y eliminar la mayor cantidad de defectos de fundición, identificados en una empresa de fundición, que utiliza las técnicas de cera pérdida y arena verde, se ha hecho un análisis del proceso para identificar las variables y problemas que causan los distintos defectos. Para proponer recomendaciones de los parámetros críticos a cuidar en la empresa, para garantizar la calidad de las piezas producidas.

---

## **Planteamiento del problema**

Durante la fundición existen diversos procesos y técnicas, estos conllevan a la producción de piezas con formas complejas y únicas. Las cuáles serán empleadas en diferentes áreas tecnológicas. Entre las diferentes técnicas de fundición las más comunes son: fundición en arena, en yeso, en espuma, a presión y cera pérdida. El principio de estas técnicas parece ser simple, se funde el metal, se vacía en un molde, se deja enfriar, solidificar y se desmoldea. Todos estos pasos son exigentes y repercuten en la calidad de la pieza, sin embargo, en ocasiones dentro de la etapa de producción, no se cuenta con las metodologías bien establecidas para tomar las mejores decisiones y obtener productos de alta calidad. Esto se debe, a que muchos factores y variables importantes pasan desapercibidas o no son consideradas durante el proceso. En consecuencia, existen pérdidas económicas, debido a la producción de piezas fundidas con defectos no deseados, que comprometen la calidad del producto final. Es por ello, que el presente trabajo hace un análisis de los parámetros más importantes a considerar; en un proceso de fundición por las técnicas de cera pérdida y arena verde de una empresa analizada.

## **Justificación**

El estudio de las condiciones óptimas del proceso de fundición de la técnica de arena verde y cera pérdida es importante en la industria metalúrgica, debido a las amplias aplicaciones que tienen los materiales fundidos. Es por esa razón, que el conocer los factores y parámetros críticos en el diseño y armado de molde, calidad de la cera, condiciones y aplicación de cerámico, secado de moldes, descerado, estado de la arena, problemas de contracción y velocidad de fundición, entre otros, es de gran importancia para garantizar la calidad del producto final. Debido a que cada variable involucrada en cada técnica; puede afectar e influir en las distintas etapas del proceso de fundición, como resultado pueden tenerse piezas con mayor o menor cantidad de defectos, determinadas propiedades y confiabilidad. El proceso de fundición de cera pérdida, es considerado importante, debido a la producción de piezas con geometrías complejas y reducción de costos en terminado final. Mientras que, en arena verde la producción de piezas fundidas es más rápida y económica. Debido a lo anterior, el presente trabajo analizará las diferentes etapas

---

del proceso de fundición de cera pérdida y arena verde, para la producción de piezas de mejor calidad.

## **Objetivos**

### **General**

Describir los aspectos más importantes durante el proceso de fundición de piezas metálicas, por las técnicas de cera pérdida y arena verde. A fin de, garantizar la calidad de las piezas fundidas para una empresa localizada en el estado de Puebla.

### **Específicos**

1. Realizar un análisis del proceso de los puntos vulnerables que afectan la calidad de la fundición.
2. Localizar los factores críticos que afectan la calidad de la pieza por las técnicas de cera pérdida y arena verde.
3. Hacer un análisis del proceso y brindar recomendaciones para que la calidad del producto no se vea comprometida.

## **Hipótesis**

El conocimiento de las variables y parámetros críticos que involucra el proceso de fundición por moldeo de cera pérdida y arena verde garantizará una mejor calidad de las piezas fundidas.

---

# Capítulo 1. Marco teórico

## 1. Antecedentes históricos de la fundición

La metalurgia comprende el estudio de los metales y aleaciones, desde su obtención hasta sus aplicaciones debidas a sus propiedades (físicas, químicas y mecánicas), pasando por los tratamientos térmicos, mecánicos-químicos, métodos de conformación y ensayos [4].

La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza como óxidos metálicos. Estos óxidos metálicos se refinan en metales puros a través de un proceso llamado fundido, en el cual, el metal se extrae de su óxido a través del uso de un agente reductor químico. Una vez que el metal puro se forma, éste es procesado hacia la forma deseada por diversas técnicas [5].

La fundición puede citarse hasta alrededor de 4000 a.C. El oro fue el primer metal descubierto y usado por las civilizaciones antiguas; era maleable y se martillaba con facilidad para darle forma a temperatura ambiente. Parecía que no hubiera necesidad de otras maneras para dar forma al oro. Fue el descubrimiento posterior del cobre, lo que originó la necesidad de la fundición [6], su desarrollo, difusión y creación de diversas técnicas de este arte. Históricamente, existe la evidencia del empleo de la técnica de la cera pérdida en Egipto y Mesopotamia, para obtener piezas moldeadas pequeñas. Así como del empleo del moldeo en arena, practicado en China hacía el año 800 a. C. [4].

Hoy en día, existen una variedad de técnicas y métodos de fundición para la obtención de productos con diversas formas. Su innovación y empleo se debe, a que los metales siguen siendo fundamentales y necesarios. Además ahora se usan más que hace 150 años y la industria genera una gran diversidad de aleaciones en las que los componentes mezclados, a partir de pequeñas variaciones en su proporción, se ajustan a las propiedades necesarias para la función en la que será empleado el material [7]. Esto hace que sea uno de los procesos de manufactura más versátiles y utilizados por diversas áreas tecnológicas.

## 1.2 Práctica de moldeo

Cualquiera de las técnicas de fundición emplea la práctica del moldeo, que comprende de tres etapas principales: preparación del molde, fusión de los metales que integran el material y colada del metal fundido dentro de las formas requeridas [8].

### 1.2.1 Tipo de molde

De acuerdo con el tipo de molde utilizado, los procesos de fundición se clasifican en: 1) fundición con moldes desechables y 2) fundición con moldes permanentes. En las operaciones de fundición con moldes desechables, los moldes se destruyen para extraer la pieza fundida. Sin embargo, con los moldes permanentes, debido a que están diseñados generalmente con dos o más secciones, que se abren para permitir el retiro de la pieza, el desmoldeo es fácil y permite reutilizar el molde para ser usado una y otra vez en numerosos fundidos [9]. La Figura 1 muestra la clasificación general de los procesos de fundición según el tipo de molde empleado.

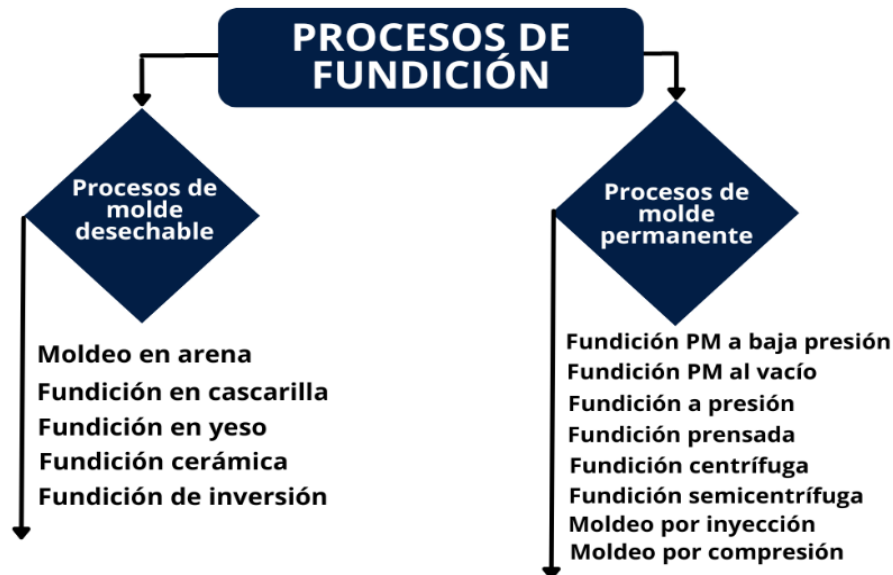


Figura 1. Clasificación general de los procesos de fundición

### 1.2.2 Fusión y colada

En la etapa de fusión y colada, el metal, que puede ser ferroso o no ferroso (Figura 2) es calentado por encima de su punto de fusión (Figura 3) en un horno industrial, después es vertido en la cavidad del molde utilizado, es dejado enfriar y solidificar. Durante estas etapas, el metal transfiere su calor al molde por convección, irradiación y mediante conductibilidad térmica. Al pasar el metal líquido o gaseoso al estado sólido, como también transformase una fase en otra da lugar a la formación de cristales de las aleaciones en el molde [10].

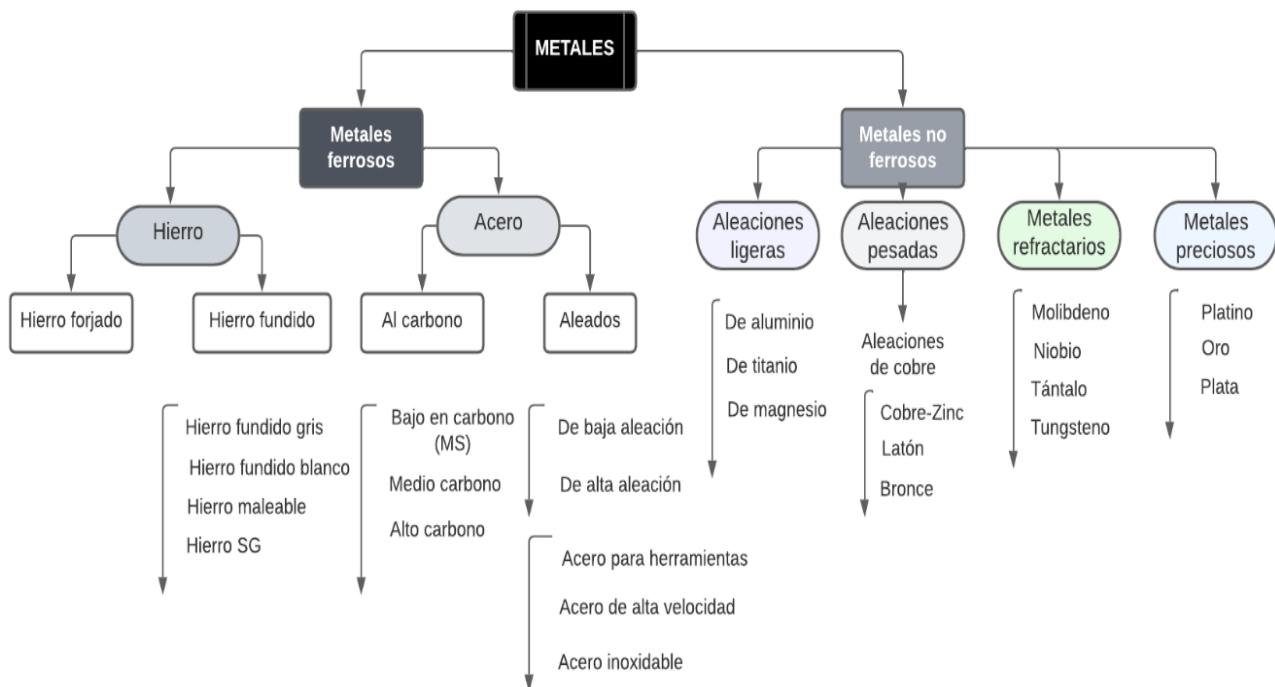


Figura 2. Clasificación general de los metales

#### 1.2.2.1 Etapas críticas

En el proceso de fusión y vertido existen varias etapas críticas que requieren del análisis ingenieril, ya que pueden afectar la operación y calidad de las piezas: temperatura a la que se vierte; velocidad de vertido; turbulencia; fluidez del metal; erosión del molde; el tiempo que necesita un metal para solidificarse; contracciones; la solidificación direccional y el diseño de la mazarota, son los principales factores asociados en el proceso [6].

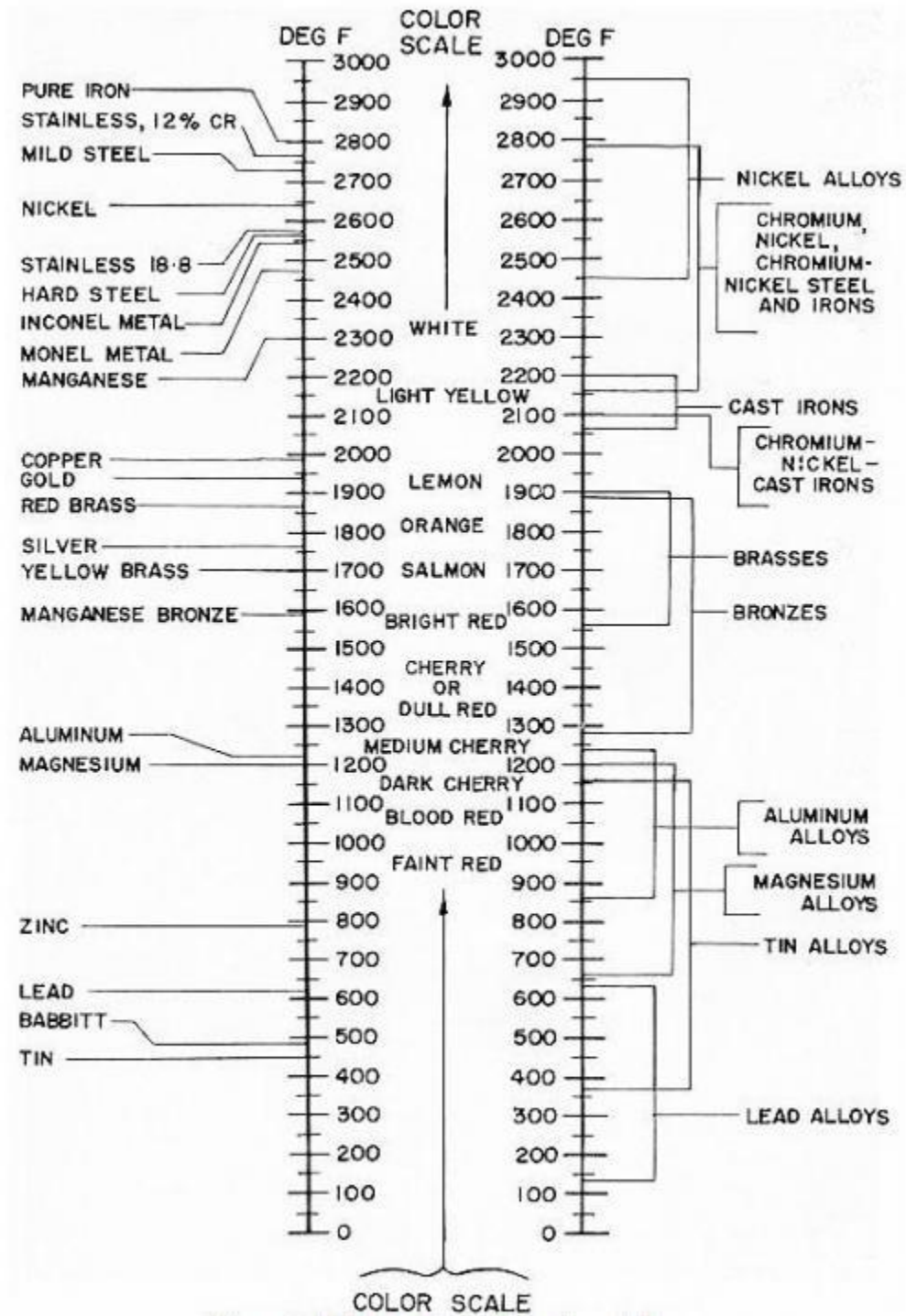


Figura 3. Puntos de fusión de diferentes metales y aleaciones

### 1.2.2.2 Hornos de fundición

Para la fusión de aleaciones metálicas existe una amplia variedad de unidades de fusión utilizadas. La Tabla 1 muestra los diferentes hornos de fusión con sus principales características. Cada tipo de horno es recomendable para una operación en particular, su elección puede ser dictada por consideraciones de costo inicial; costo relativo promedio de mantenimiento y reparación; costo base de operación; disponibilidad y costos relativos de las fuentes de energía; condiciones ambientales y nivel de ruido en operación; eficiencia de fusión; grado de control de composición química del metal; temperatura de fusión del material metálico y experticia del personal [11].

Tabla 1. Hornos de fusión para diferentes aplicaciones

Fuente de energía	Forma de la fuente de energía	Aleaciones	Horno
Carbón	Bituminoso en polvo	Hierros fundidos	Llama directa
	Antracita	Hierros fundidos	Cubilote
Coque	Tamaño medio	Hierros fundidos	Cubilote
		No ferrosos	Horno de crisol
Petróleo	Diesel o Residual	No ferrosos	Horno de crisol
		Hierro, acero	Horno de hogar Abierto
Gas	Gas licuado de Petróleo o Gas Natural Licuado	No ferrosos	Horno de crisol
		Hierro, acero	Horno de hogar
			Abierto
Electricidad	Arco directo	Acero, hierros fundidos	Horno de Arco eléctrico de una, dos o tres fases
	Arco indirecto	No ferrosos, hierros fundidos	Horno de arco Indirecto
	Resistencia	No ferrosos	Horno de resistencia central irradiante
	Inducción	Todos los metales	Horno de inducción Basculante

### 1.3 Ruta de fabricación

La fundición es una ruta rentable para la fabricación de componentes u objetos de geometría compleja cercanos a la forma neta. Sin embargo, para alcanzar todo el potencial en el rendimiento coste/complejidad, requiere de comprender toda la ruta de fabricación durante el proceso [12]. La ruta de vida de todos los productos comienza con la recolección de materias primas, seguidas por su transformación a productos; a través de series de pasos de fabricación y finalmente su venta al usuario [5]. Los diversos factores por considerar durante el proceso de fabricación de piezas metálicas pueden aumentar, dependiendo de la técnica de fundición empleada, ya que cada técnica involucra variables específicas en el proceso. La Figura 4 muestra el esquema general de la ruta de fabricación de un proceso de fundición.

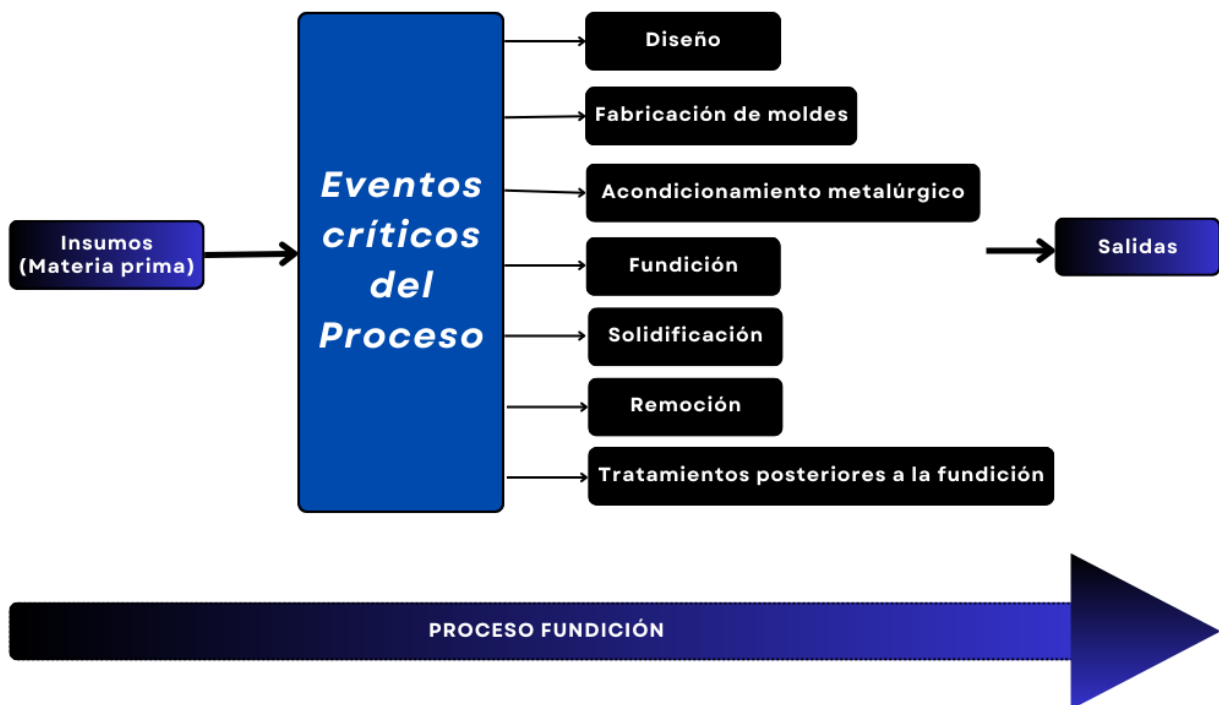


Figura 4. Ruta de fabricación de fundición

## 1.4 Técnica de fundición a la cera pérdida

Se trata de una técnica que busca la buena precisión dimensional, excelente acabado superficial, apariencia, copiado de finos detalles, eliminar al máximo los procesos de mecanizado, minimizar el desperdicio de metal y elevar propiedades mecánicas [13]. El proceso comienza utilizando cera para generar los patrones que posteriormente serán traducidos a metal. Estos patrones son puestos a punto en un árbol de fundición, después son recubiertos con un molde refractario y en el proceso de cocción de este, es eliminada la cera mediante calor (descerado). La eliminación de la cera del interior del molde, y el llenado de este con el metal fundido, dan como resultado el positivo en metal, sin ningún tipo de limitación formal [14]. La Figura 5 muestra las etapas del proceso mencionadas.

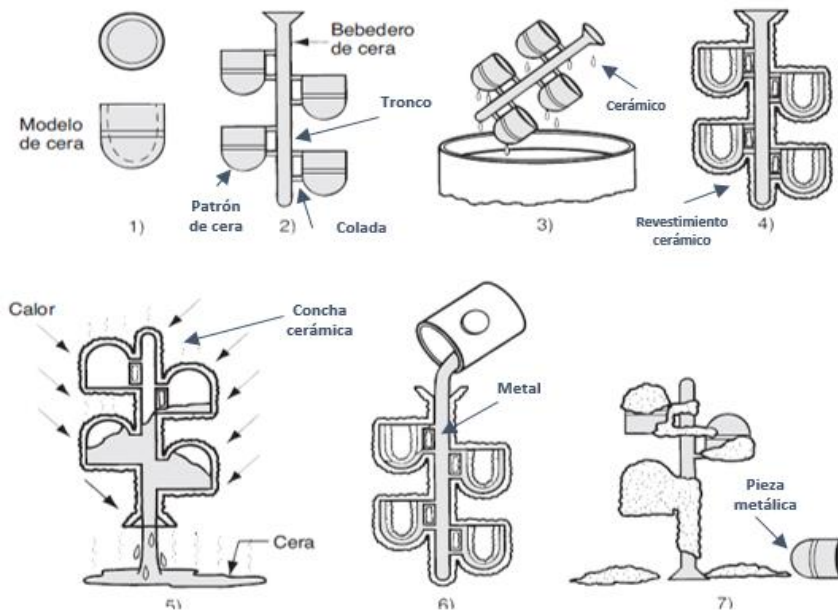


Figura 5. Etapas de la fundición por cera pérdida: 1) se producen los moldes y patrones de cera; 2) armado del árbol de fundición; 3) aplicación de capas cerámicas; 4) secado del revestimiento cerámico; 5) descerado y cocción del cerámico; 6) pre calentamiento de la concha cerámica y fundición del metal; 7) desmoldeo y limpieza de piezas.

En la fundición y colada por la técnica a la cera pérdida se emplean diversos aceros y aleaciones, como: aceros al carbono, aleados, anticorrosivos, resistentes a la oxidación a altas temperaturas, termorresistentes y aleaciones no ferrosas (de aluminio, de cobre), titanio [10].

#### 1.4.1 Ceras

Las ceras tienen orígenes diversos y múltiples variedades que presentan diversos matices a las características definidoras generales, usualmente se clasifican en naturales y sintéticas [15]. La Tabla 2 muestra la clasificación de los diferentes tipos de ceras utilizadas.

Tabla 2. Clasificación de ceras

Clasificación	Subclasificación	Ejemplos
Naturales	Vegetales	Carnauba, candelilla y de caña.
	De origen animal	Espermaceti, de insectos china y de abeja.
	Minerales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Derivadas del petróleo o hidrocarbурadas: parafinas, microcristalinas y ozoquerita.</li> <li>• Derivadas del carbón mineral: parafinas.</li> </ul>
Sintéticas	Derivados químicos	Fischer-Tropsch, de polietileno, derivadas de la cera de Montana, oxidadas, emulsificadas y clorinadas.

La producción de modelos en la técnica de cera pérdida por lo general se lleva a cabo, por medio de una operación de moldeo, vertiendo o inyectando la cera caliente en un troquel maestro diseñado con tolerancias apropiadas para permitir la contracción, tanto de la cera como del fundido metálico subsecuente [6].

##### 1.4.1.1 Características de las ceras

Entre las características principales y comportamiento que deben tener las ceras utilizadas por esta técnica se destacan: la adecuada resistencia; tenacidad y elasticidad; moldeabilidad; reducida contracción; adecuado comportamiento de solidificación; uniformidad; buenas características de envejecimiento; amplio intervalo de fusión; estabilidad al calor; contenido de cenizas reducido y buen desmoldeo [13]. Este material, es el principal intérprete de la primera

---

parte, que comprende la técnica de cera pérdida y su calidad es una variable importante por cuidar, en la elaboración de patrones de cera y en el armado de árboles de fundición, ya que, de llegar a presentar defectos, afectaría las etapas subsecuentes y el producto final.

#### **1.4.2 Molde cerámico**

El molde cerámico consiste en recubrir el árbol de fundición de cera con varias capas de cerámica, hasta lograr un revestimiento de cierto espesor. Las capas de recubrimiento del molde se ejecutan en términos de capa primaria y de respaldo secundaria. La capa primaria es muy importante para replicar con mayor exactitud las propiedades superficiales del componente. Mientras que se aplican varias capas de respaldo de acuerdo con el tamaño y complejidad del componente de fundición [16].

##### **1.4.2.1 Componentes del molde**

Los componentes del revestimiento cerámico están elaborados de materiales refractarios y aglutinantes. Los refractarios aportan el grueso del volumen del molde. Entre los utilizados se encuentran los del tipo silíceo, como el propio sílice, el circón y varios silicatos aluminicos compuestos de mullita y sílice libre. Por su parte, los aglutinantes tienen la función de unir de modo más efectivo posible los granos de los materiales refractarios, ayudándolos a conformar el molde. Los más comunes son los basados en sílice, ácido fosfórico y los orgánicos [15]. También se utilizan aditivos en ciertas ocasiones para mejorar las propiedades y calidad de la cubierta cerámica. Ya que muchas veces las cubiertas cerámicas a base de sílice coloidal carecen de suficientes propiedades, lo que provoca el agrietamiento de la cubierta y si bien, en ocasiones las reparaciones menores pueden compensar las conchas. Muchas veces la reparación de la carcasa puede no ser factible generando pérdidas económicas [17].

---

#### **1.4.2.2 Características del molde cerámico**

Las propiedades (acabado superficial, precisión dimensional, etc.) del producto fundido dependen en gran medida del molde cerámico. El revestimiento cerámico debe poseer una resistencia adecuada en verde y en cocción, baja dilatación térmica para evitar cambios dimensionales, alta estabilidad química, alta resistencia al choque térmico y suficiente permeabilidad de la concha [18].

#### **1.4.3 Operaciones secundarias**

Posterior, al llenado del molde con metal y su enfriamiento se hace el desmoldeo y limpieza de las molduras. El desmoldeo se hace en instalaciones especiales, la separación de las molduras de los bebederos se realiza en equipos vibratorios; pasando a presión el canal vertical con las molduras a través de un troquel cortador; cortando con sierras para cortar el metal, sierra de disco, con fresas y en rectificadores; cortando las mazarotas y en ocasiones el canal vertical con soplete cortador a gas; con el corte ánodo mecánico. Mientras que para la limpieza de los restos de cerámica impregnada en las piezas, se hace utilizando varios procedimientos: por vibración, a chorro de arena, a chorro de agua y arena, químico-térmico en soluciones de álcalis y ácidos, como también en sales derretidas, etc. [10].

## 1.5 Técnica de fundición por arena

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud. Es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. La técnica consiste en preparar la arena, fabricar el molde de arena, verter metal en la cavidad del molde y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar el fundido, como se muestra en la Figura 6 [6].

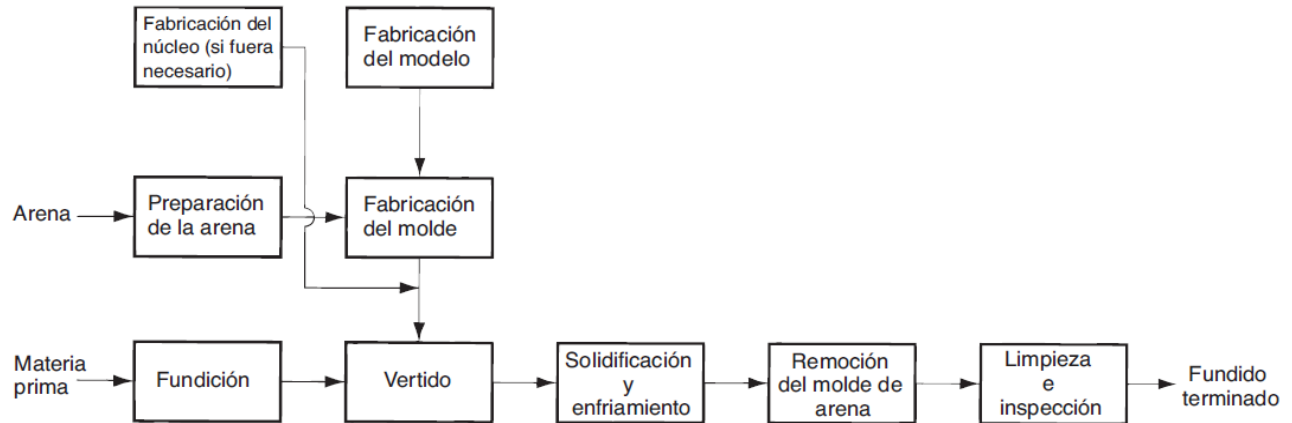


Figura 6. Secuencia de las etapas de producción en la fundición por arena

### 1.5.1 Tipos de arena

De acuerdo con sus usos y diferentes criterios, las arenas de moldeo se dividen en diferentes tipos:

- Según su contenido de arcilla
- Forma de grano
- Tamaño de grano
- En función de su aplicación
- En función de su procedencia

Por esta razón, dentro del proceso de fabricación de piezas fundidas, sus propiedades dependen, en gran medida, de las características de la arena utilizada en las operaciones de moldeo (elaboración de los moldes) y posterior colada [19].

### 1.5.1.1 Características de la arena

Entre las características más importantes que se exigen en la industria de la fundición, y que permiten la selección de una arena apropiada para la elaboración de moldes, se encuentran la composición química de la arena, la distribución granulométrica y la morfología de los granos, así como el número de fineza AFS (American Foundry Society). De igual modo, entre las propiedades más significativas de la arena de moldeo que se debe tener en consideración en el proceso de fabricación de moldes, está el contenido de humedad, la permeabilidad y la resistencia a la compresión en verde [20].

### 1.5.2 Partes del molde de arena

En el molde las bocas y conductos que se dejan en el cuerpo del molde para permitir el vertido y entrada del metal se llaman bebederos, canales y surcos de colada. El metal se desliza horizontalmente a lo largo de estos y entra en el molde por las bocas. Según la forma y tamaño de la pieza se dejan respiraderos y mazarotas, o salidas, para comprobar que el metal ha rellenado [21]. La Figura 7 muestra una pieza moldeada con las partes principales del molde.

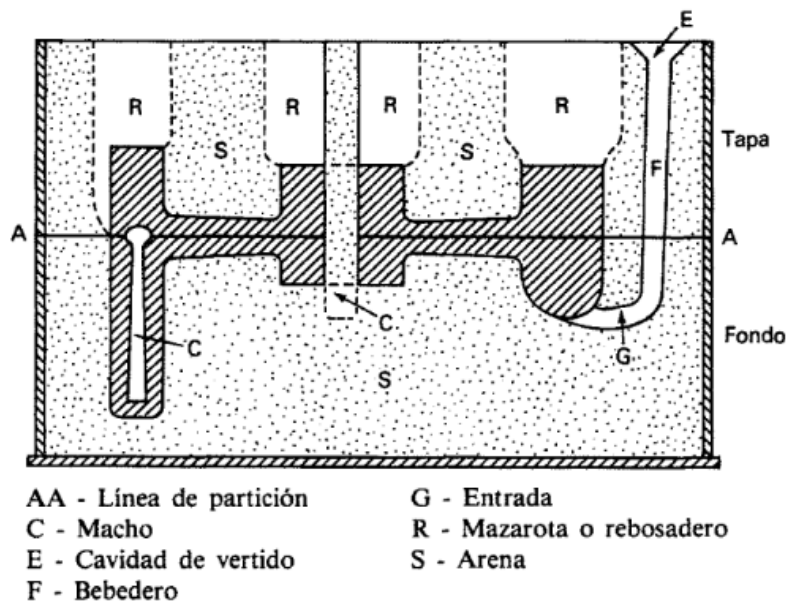


Figura 7. Esquema de las partes principales de un molde de arena

---

### **1.5.3 Moldeo en arena verde**

De las diversas arenas de fundición que existen, la arena verde, es la más utilizada en el mundo. Se trata de una mezcla de arena, arcilla y agua, que recibe el término "verde" debido a que el molde contiene humedad al momento del vaciado y porque no ha sido horneado ni curado. Las arenas son el componente principal, se utiliza generalmente sílice. Este otorga capacidad refractaria para resistir la temperatura del metal fundido sin descomponerse. Las arcillas funcionan como adhesivo para mantener la forma del molde y necesitan de agua para ser activadas. Las más usadas son las bentonitas (sódica y cálcica). El agua además de servir como activador tiene un gran efecto en la resistencia a la compresión en verde [22].

La arena verde puede ser utilizada varias veces para producir moldes para fundiciones de aleaciones ferrosas, así como de aleaciones de metales no ferrosos (magnesio, aluminio, aleaciones de cobre). Se pueden colar piezas de fundición pequeñas y precisas, así como piezas de gran tamaño de unas pocas toneladas [23].

#### ***1.5.3.1 Composición de la arena verde***

La composición promedio de la arena verde es de 85 a 95% de arena con alto contenido de sílice, 5 a 10 % de bentonita, 2 a 5 % de agua, en el caso de fabricar fundiciones ferrosas 3 a 9% de aditivos carbonosos [23]. Para disponer de arena verde correctamente preparada, deben existir tres elementos fundamentales. En última instancia, las fundiciones deben tener una pieza fundida aceptable para vender al consumidor de la pieza fundida (lo que se refleja en una superficie de fundición sin defectos) y, al mismo tiempo, mantener las propiedades de la arena verde para poder preparar un molde adecuado en el proceso de fundición de metales. Así como de emisión reducida durante el vertido, enfriamiento y sacudido del proceso de fundición [24].

---

## Capítulo 2. Descripción de los procesos de fundición

### 2.1 Proceso de cera pérdida

#### 2.1.1 Diseño y fabricación del molde

El proceso de fundición de cera pérdida inicia con el diseño y fabricación de un molde de aluminio, donde se contemplan las especificaciones de la pieza solicitada. La Figura 8 muestra el ejemplo de los interiores de un molde de dos piezas.



Figura 8. Interiores de un molde de aluminio

#### 2.1.2 Inyección de cera

Los moldes son utilizados en un área de ceras; para producir patrones de cera una y otra vez con la geometría exacta de la pieza, inyectando cera industrial por medio de una inyectora. Así como la aplicación de desmoldantes en los interiores del molde, para evitar que la cera quede adherida y aire a presión, para facilitar la extracción de los patrones del molde. Las Figuras 9 y 10 muestran las etapas descritas.



Figura 9. Inyección de cera en molde de aluminio

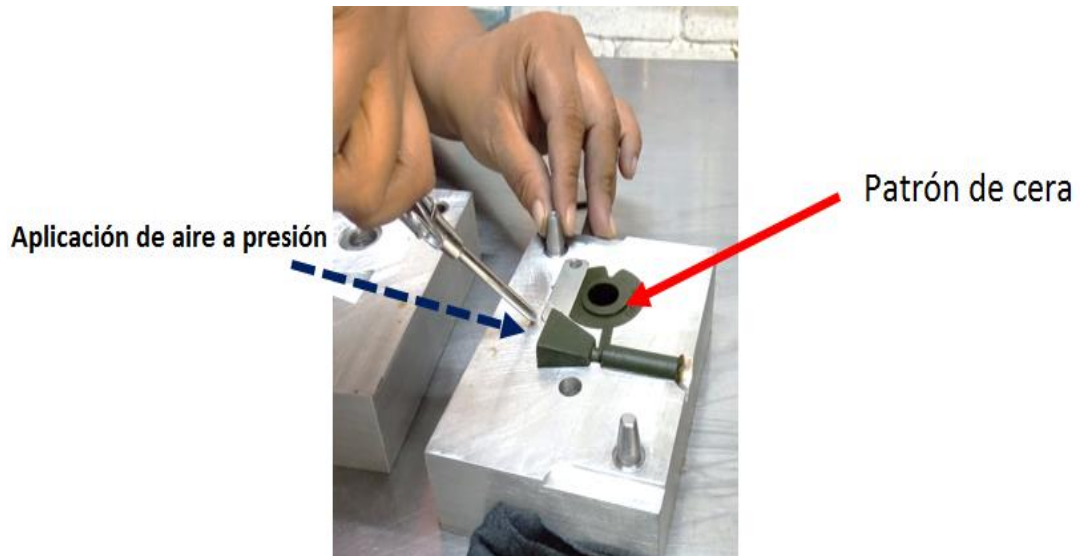


Figura 10. Extracción del patrón de cera del molde de aluminio

### 2.1.3 Acabado y ensamblaje

Los patrones de cera obtenidos son llevados a un proceso de rebabado para mejorar el acabado superficial del patrón de cera, así como a un proceso de agregado de coladas, en caso de que estas no hayan salido inyectadas directamente al patrón, debido al diseño del molde de aluminio.

---

#### 2.1.4 Armado de árboles

Los patrones de cera con sus coladas son colocados con ayuda de cera caliente y herramientas de trabajo sobre una mazarota central llamado tronco, el cual actúa como alimentador principal en la fundición. El armado final es conocido como árbol de fundición; número de patrones, orientación, tamaño, coladas, tronco, barras, marcos, copa de vaciado, soportes y todo aquello que componga e involucre el armado. Las Figuras 11 y 12 muestran el proceso de armado de un árbol y un árbol de fundición terminado.



Figura 11. Proceso de armado de un árbol de fundición



Figura 12. Árbol de fundición

#### 2.1.5 Construcción de molde cerámico

Los árboles de fundición terminados son llevados a un área de cerámicos para ser lavados, secados y sumergidos en un baño cerámico o lodo. Después se les es aplicado capas finas de arena o estuco a las superficies húmedas; se les deja secar en diferentes intervalos de tiempo para que puedan endurecerse. El proceso es repetido n número de veces usando grados más gruesos de material cerámico hasta formar un revestimiento que sea capaz de resistir las altas temperaturas

---

y el estrés por fundición. Las Figuras 13 y 14 muestran la aplicación de primera capa de lodo cerámico en un árbol de fundición y el secado de revestimiento cerámico.



Figura 13. Aplicación de lodo cerámico



Figura 14. Secado de capa cerámica

### **2.1.6 Extracción de cera (descerado)**

Una vez que el molde cerámico cuenta con las capas necesarias y cumple con sus tiempos de secado, es llevado e introducido a una autoclave (Figura 15). Donde la cera contenida dentro de los revestimientos cerámicos es removida por medio de vapor y es reciclada para volverla a usar en el proceso.

Después de ser eliminada la cera se produce también el proceso de cocción del molde cerámico, el cual favorece el endurecimiento, la resistencia y permeabilidad de las conchas cerámicas resultantes (moldes cerámicos sinterizados sin cera en su interior).



Figura 15. Revestimientos cerámicos ingresados a una autoclave de vapor

### **2.1.7 Fundición de conchas cerámicas**

Dependiendo de la aleación a fundir, se hace el cálculo de carga y la planeación de número de conchas a fundir, por parte del departamento encargado. Antes de la fundición las conchas se precalientan en un horno; para reducir la diferencia de temperatura con el metal fundido (choque térmico), se prepara el tipo horno a utilizar que puede ser de inducción o de gas. Una vez que las conchas están precalentadas, éstas son colocadas en el área donde se llevará a cabo la colada del metal fundido, se toma la temperatura al metal y concha para asegurar que se encuentran dentro de las especificadas, si esto se cumple, es vaciado el metal fundido como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Colada de metal fundido en conchas cerámicas

---

### 2.1.8 Remoción cerámica y acabado

Las conchas después de ser coladas son trasladadas a un área de acabado. En esta área se retira la concha cerámica del árbol aplicando diversas técnicas, una de ellas, es usando medios mecánicos: martillo neumático, mesa vibracional y disparos de agua a alta presión. O bien por limpieza química, usando una solución de sosa cáustica caliente (NaOH) o de potasa cáustica (KOH). Dentro de los procedimientos de limpieza y tratamiento superficial de esta área se encuentran también el granallado, sandblast, decapado y flapeado. La Figura 17 muestra árboles fundidos libres de cerámica.



Figura 17. Árboles de fundición sin cerámica

Al final de la colada las piezas son cortadas, rectificadas, pulidas, enderezadas, soldadas, tratadas térmicamente, para posteriormente realizarles pruebas de calidad por medio del uso de líquidos penetrantes. Debido a la necesidad del control las piezas finales pueden ser sometidas a maquinado, dependiendo de la aplicación que estas vayan a tener o son llevadas a ensayos mecánicos.

---

## 2.2 Proceso de arena verde

### 2.2.1 Diseño y fabricación del molde

El proceso de fundición por arena verde utiliza un prototipo de la pieza a reproducir (Figura 18), el cual servirá para la elaboración de n número de moldes de arena verde compuesta de la mezcla de arena de sílice, bentonita (arcilla) y cierto porcentaje de humedad.



Figura 18. Ejemplo de un prototipo utilizado para reproducir piezas por arena

### 2.2.2 Preparación de la arena

En un principio la arena es preparada de acuerdo con las especificaciones para cumplir con la resistencia, permeabilidad, cohesión, moldeabilidad, entre otras propiedades o parámetros adecuados. Posteriormente en su reutilización, sólo es acondicionada la arena, agregando cierto porcentaje de humedad, mezclando la arena dentro de un molino y separando la arena de partículas extrañas haciéndola pasar por una malla. Esto da lugar a la arena de careo y de relleno que será utilizada en la fabricación de moldes.

---

### 2.2.3 Elaboración de moldes

Se reproduce el modelo de la pieza solicitada en un molde de arena n número de veces utilizando diversas herramientas, instrumentación y técnicas particulares del moldeador. Dependiendo de la pieza a reproducir, el proceso puede volverse más complejo y tardado. La Figura 19 muestra diversos moldes de arena verde elaborados.



Figura 19. Moldes de arena verde

### 2.2.4 Fundición de moldes de arena

Una vez que son elaborados los moldes, son tapadas sus cavidades de colada para evitar que ingresen contaminantes en el interior; y son fundidos siguiendo los mismos criterios que se mencionaron en el proceso de cera pérdida. Posteriormente son abiertos con ayuda de una herramienta, para que las piezas obtenidas se enfríen y después son trasladadas al área de acabado.

---

## Capítulo 3. Resultados y discusión

### 3.1 Análisis e identificación de las variables y problemas que causan defectos

En cualquier industria de fundición, la producción de piezas metálicas es un proceso complejo en el que intervienen varias materias primas y etapas subsecuentes, que pueden generar diferentes tipos de defectos, ya que todos los procesos de fundición generan un cierto nivel de defectos, que está estrechamente relacionado con el tipo de fundición, proceso utilizado y el equipo disponible [25]. Estos defectos generan efectos adversos en una empresa, principalmente pérdidas económicas e insatisfacción de los clientes. Por tal motivo, es necesario detectarlos inmediatamente y tomar medidas correctivas para evitarlos.

Para dar soluciones a dichas problemáticas, la clasificación e identificación de cada variable, problema y defecto en el proceso de una empresa es fundamental para determinar las causas y adoptar las medidas necesarias. Además, se requiere que las industrias metalúrgicas implementen técnicas que mejoren la calidad del producto, así como, su productividad [26]. En la literatura existen varios enfoques para clasificar las causas y tipos de defectos de fundición. Sin embargo, sólo pueden tomarse como una guía, debido a que cada uno de ellos está basado en el análisis y estudio de una zona o empresa de fundición en particular.

Basado en la experiencia de trabajo, lo cual implica las horas de estancia en la empresa, el análisis de las áreas, etapas, estandarización, conocimiento del equipo y herramientas utilizadas para el funcionamiento y desarrollo del proceso, vivencia de incidentes e identificación de problemas del proceso, entrevistas con el personal laborando, la observación y la investigación científica; se reconoce e identifica, cuáles son los principales problemas que sufre la empresa de estudio; analizada y que afectan la calidad de las piezas finales obtenidas en el proceso de fundición de cera pérdida y arena verde utilizado en dicha empresa.

La siguiente clasificación muestra las variables y problemas identificados según la fuente que origina los diversos problemas, defectos de fundición y rechazo de piezas.

---

### **3.1.1 Clasificación de las variables y problemas según su origen**

#### ***3.1.1.1 Diseño de moldes***

Son problemas relacionados al diseño inadecuado del molde utilizado en las diversas técnicas, los cuales generan e incrementan los defectos de fundición:

- Piezas demasiado juntas
- Grosor de las secciones de fundición
- Orientación de las piezas
- Diseños asimétricos
- Cambios bruscos o drásticos
- Relación volumen-superficie
- Disposición del alimentador, mazarota o colada

#### ***3.1.1.2 Operaciones llevadas a cabo manualmente por los operarios***

Son problemas asociados a las operaciones que dependen de la manipulación y técnicas particulares del operador, la claridad de las instrucciones de operación y trabajo de la hoja de proceso, así como de la capacitación del personal para desempeñar una tarea:

- Operación de inyección de cera en el molde (cera pérdida)
- Uso de desmoldante
- Manipulación física de los patrones de cera (cera pérdida)
- Limpieza del árbol de fundición y conchas cerámicas (cera pérdida)
- Aplicación de capas de aglutinante y material refractario (cera pérdida)
- Eliminación de material refractario suelto (cera pérdida)
- Moldeo en arena (arena verde)
- Compactabilidad de la arena (arena verde)
- Movimiento prematuro del molde después de la fundición
- Mala técnica de vertido en la fundición

---

### **3.1.1.3 Maquinaria**

Se trata de problemas asociados a las herramientas, instrumentación, equipo implementado o a los parámetros de operación utilizados en el funcionamiento de dicho equipo:

- Desgaste o daño del molde (cera pérdida y arena verde)
- Parámetros de inyección que ocasionan en la cera (cera pérdida):
  - Burbujas
  - Rebaba
  - Hundimiento
  - Agrietamiento
  - Variaciones dimensionales
  - Inclinación
  - Líneas
- Descerado en autoclave
- Cuchara y crisol contaminado

### **3.1.1.4 Material del proceso**

Se trata de problemas relacionados con el material utilizado, sus propiedades y comportamiento durante el proceso de fundición:

#### **3.1.1.4.1 Cera**

- Tipo de cera utilizada (cera pérdida)
  - Reciclaje de cera descerada (cera pérdida)
  - Propiedades de la cera (cera pérdida):
    - Contracción y cavitación
    - Punto de congelación o punto de fusión
    - Contenido de cenizas
    - Dureza y elasticidad
    - Viscosidad
    - Acabado superficial
-

---

Velocidad de fraguado

Estabilidad a la oxidación

Recuperabilidad

- Contaminación de la cera (cera pérdida)

#### **3.1.1.4.2 Cerámicos**

- Aire en el aglutinante (cera pérdida)
- Calidad del aglutinante y material refractario (cera pérdida)
- Tiempo y velocidad de secado de revestimientos cerámicos (cera pérdida)
- Cocción de la concha (cera pérdida)
- Propiedades del revestimiento cerámico:

Refractariedad

Permeabilidad

Adherencia y elasticidad

Resistencia

Viscosidad

Granulometría

Resistencia en verde

-Grosor de capa cerámica

#### **3.1.1.4.3 Arena**

- Composición de la arena verde (arena, arcilla y humedad)
- Propiedades de la arena de moldeo:

Permeabilidad

Refractariedad

Cohesión

Adhesividad

Plasticidad

Colapsabilidad

---

## Granulometría

- Impurezas en la arena verde
- Arena caliente
- Arrastre de arena

### **3.1.1.4.4 Metal**

- Contaminación de la carga (por humedad, óxido o lubricantes)
- Composición química inadecuada

### **3.1.1.5 Fundición**

Son problemas asociados a las condiciones y formas de llevar a cabo la fundición del metal en las diversas técnicas:

- Temperatura de vertido
- Vertido interrumpido
- Altura de vertido
- Velocidad de vertido
- Salpicaduras durante el vaciado
- Gases/Desgasificación
- Temperatura del molde (cera pérdida)
- Uso de filtro
- Uso de polvo exotérmico
- Uso de fundentes
- Mezcla del fundido (ingreso de oxígeno)
- Tiempo de solidificación
- Presión metalostática

La base de datos de variables y problemas generada de los procesos de fundición de ambas técnicas anteriormente mencionada, sirven como base de estudio para el control del proceso de

---

fundición, reducción de la mayor cantidad de problemas y defectos en las piezas finales producidas por las técnicas de cera pérdida y arena verde de dicha empresa.

Las variables críticas y su importancia relativa son utilizadas para crear la ruta de corrección y recomendaciones en ambos procesos de fundición, para prevenir y tomar acciones antes los siguientes defectos:

### 3.2 Defectos de fundición en el proceso

#### 3.2.1 Inclusiones

Las inclusiones son "Partículas de material extraño en una matriz metálica (Figura 20). Las partículas suelen ser compuestos (como óxidos, sulfuros, nitruros, carburos o silicatos), pero pueden ser cualquier sustancia o material extraño a la matriz (esencialmente insoluble en ella)" [27] y [28]. Estas partículas pueden limitar las propiedades mecánicas y el rendimiento ante la fatiga, así como provocar defectos estéticos [29].

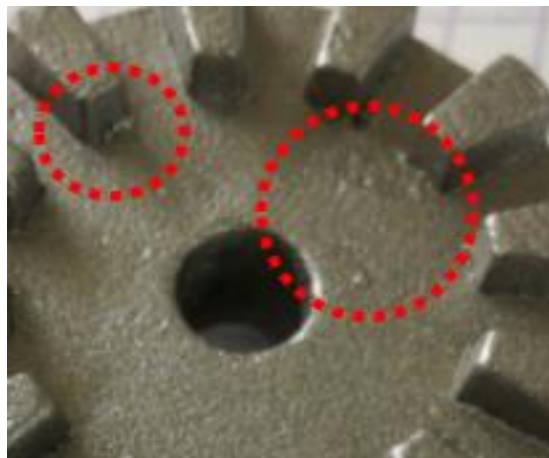


Figura 20. Pieza con inclusiones

En la fundición por cera pérdida, las inclusiones causadas por el material cerámico suelen ser más angulares o irregulares, con depresiones o cavidades de varios tamaños y pueden contener fragmentos de cerámica incrustados (Figura 21), ubicándose comúnmente en la superficie externa de la pieza fundida, donde la "inclusión" impidió que la aleación llenara la cavidad del molde hasta la superficie de la concha cerámica [30] y [31].



Figura 21. Inclusión cerámica

En el proceso de arena, el desgarro de esta durante la preparación de la sección del molde se manifiesta cerca de los bordes de colada para causar dicho defecto.

La mayoría de las inclusiones de arena se producen en posiciones variables, dando lugar a un defecto localizado [32]. La versión de baja severidad de este defecto es la presencia de una pequeña cantidad de granos de arena, llamada "gota de arena", si el defecto es más extenso e incluso afecta la geometría original de la pieza fundida, puede denominarse "corte de arena" (Figura 22). Finalmente, un defecto muy grave en la pieza fundida, donde los moldes se han dañado gravemente y aparecen inclusiones de arena con protuberancias metálicas en zonas próximas o en otras secciones, es conocido como "lavado de arena" [27], como se observa en la Figura 23.



Figura 22. Inclusión de arena a 180 mm en una fundición de hierro dúctil de sección gruesa



Figura 23. Inclusión de arena a 5 mm en una fundición de hierro gris producida en un molde seco de arena verde

### **3.2.1.1 Orígenes, causas e influencia de las inclusiones**

La inclusión no metálica en la técnica de cera pérdida puede deberse a la cera y el cerámico. En las ceras el relleno que se asienta o la ceniza, puede quedar contenida en el molde y flotar en la aleación fundida, presentándose en la parte superior de las piezas. En el caso de la cerámica, el molde puede romperse en el descerado, manipulación, parchado y colada o debido también a la rotura de bordes dentados de las copas de vertido, ocasionando que puedan ingresar trozos en el interior [30].

El defecto por inclusión en arena proviene de otros defectos como: escama de expansión, erosión, compresión, penetración por explosión o debido a que se presenta: exceso de friabilidad del molde, mala limpieza, colocación inadecuada de corazones, un cierre incorrecto del molde y por un contenido elevado de arcilla activa en la mezcla [33].

Las inclusiones de escoria (por alto punto de fusión) se encuentran junto con porosidades de gas, debido a que los compuestos que forman la escoria pueden oxidarse y reaccionar con el carbono disuelto en las fundiciones de hierro fundido para dar monóxido de carbono (CO). Dependiendo de la densidad de la escoria, las inclusiones pueden permanecer dentro de la masa fundida, si la densidad es alta o aparecer en las superficies superiores si la densidad es baja [27].

---

Las inclusiones también pueden aparecer como resultado de la contaminación del crisol utilizado para hacer el vaciado, contaminación de la carga o por reacciones entre el metal y el molde [34].

### 3.2.2 Porosidad

Describe la presencia de huecos o poros en el interior de las piezas de fundición (Figura 24), los cuales pueden ser de diferente tamaño, forma y superficie [29].



Figura 24. Pieza con porosidad

Son resultantes del aire atrapado o de la contracción volumétrica de la pieza fundida. La contracción es una característica del metal durante el enfriamiento y solidificación (Rechupe) (Figura 25), mientras que las porosidades gaseosas están relacionadas con el gas atrapado o precipitado tras disolverse en el metal fundido [27]. En el arrastre de aire, el tamaño de las burbujas atrapadas en la fundición no sólo se ajusta al cambio de la temperatura, sino también a la presión, la presión del metal líquido (carga metalostática) aumenta a medida que se desciende en la colada [35].

En función de sus características superficiales, los huecos y porosidades se pueden clasificar de acuerdo con el esquema que se muestra en la Figura 26. Este tipo de defecto influye en las propiedades físicas y mecánicas de las piezas. La presencia de estas irregularidades en una zona sometida a esfuerzos; puede actuar de punto de partida para generar roturas, fallos a fatiga y otros defectos [36].



Figura 25. Pieza con defecto de contracción (rechepe)

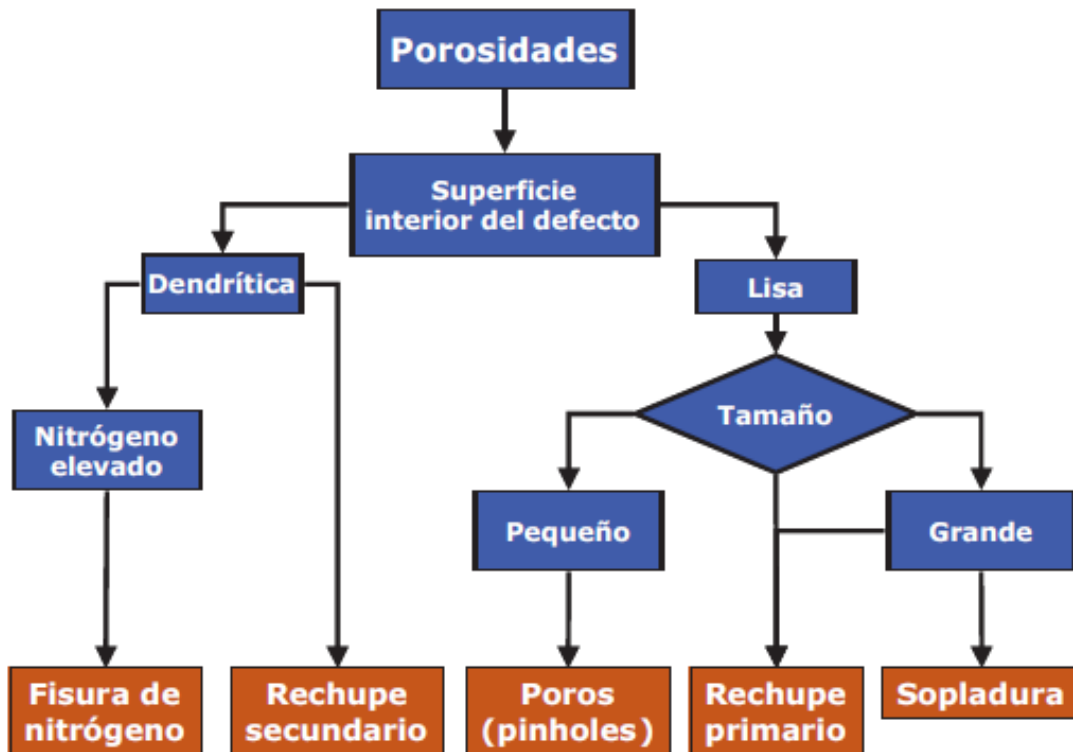


Figura 26. Clasificación de los tipos de porosidades

---

### **3.2.2.1 Orígenes, causas e influencia de la porosidad**

En ambas técnicas de fundición, las causas pueden deberse a diferentes problemas que existen en las diferentes etapas del proceso [29] y [30]:

- Falta de respiraderos en la parte superior del molde para permitir la salida de aire
- Complejidad en la geometría de la fundición o diseño inadecuado
- Descerado incompleto
- Baja permeabilidad de las conchas cerámicas
- Humedad elevada de la arena de moldeo
- Alta compactabilidad de la arena de moldeo
- Tamaño de grano de la arena de moldeo
- Baja permeabilidad de la arena de moldeo
- Mala práctica de desgasificación
- Turbulencia durante el llenado del metal
- Velocidad de vertido lenta
- Altura inadecuada de vaciado
- Baja presión ferrostática (diseño del molde)
- Mayor concentración de metal en una región específica
- Metal con contenido de humedad, óxido o lubricantes
- Baja temperatura del metal durante la fundición

En la fundición de acero por la técnica de cera pérdida, la fuente principal de los defectos son los productos gaseosos de termodestrucción del material del molde durante la cocción, y la interacción con la masa metálica fundida durante la colada [37].

---

### 3.2.3 Cola de rata

Es un defecto que consta de imperfecciones en la superficie de una pieza de fundición, que se presenta como una o varias líneas irregulares. La Figura 27 [27] muestra la alta incidencia de este tipo de defecto en la superficie de una fundición de hierro.



Figura 27. Colas de rata en superficies planas de fundiciones de hierro

En la técnica de arena verde son causadas por la expansión de la arena en el molde, donde el agrietamiento prematuro de la zona seca al expandirse da lugar a un volumen adicional de arena, que crea un escalón en lugar de un puente en la superficie interior del molde [27]. Si la situación no es demasiado grave, se forma este defecto. Sin embargo, si la expansión de la arena es aún mayor, el defecto se denomina hebilla (buckle). Y si es aún peor, de modo que el metal fundido puede introducirse detrás de la arena combada, es conocido como una costra (scab) [38].

En cera pérdida, el defecto de cola de rata es producido por la oxidación selectiva de la superficie del metal a través de grietas o microgrietas en la cáscara cerámica. El defecto además es una combinación de los defectos de picadura y aleteo (rebaba) [30].

---

### **3.2.3.1 Orígenes, causas e influencia de la cola de rata**

En la técnica de arena verde, el origen de este defecto se debe a una preparación deficiente de la mezcla de arena verde, por el empleo de arcilla (bentonita) con baja resistencia a la tracción en húmedo [33] y por el uso de arena con baja expansión térmica y alta plasticidad en caliente.

En cera pérdida las causas provienen generalmente de la cáscara cerámica y del proceso de fundición [30]:

- Gran variación de temperatura durante el secado de la capa primaria de la cáscara cerámica
- Secado demasiado rápido de la cáscara cerámica, lo que ocasiona gran encogimiento del patrón de cera
- Secado demasiado largo de la cáscara cerámica
- Desajuste en el coeficiente de expansión entre las capas primaria y de respaldo del molde cerámico
- Baja resistencia de la capa primaria de la cáscara cerámica
- Malas propiedades de adherencia y elasticidad del lodo primario
- Estructura desigual de la cubierta en la(s) primera(s) capas
- Alta permeabilidad de la cáscara cerámica
- Alto nivel de oxígeno durante la colada o el enfriamiento
- Velocidad de enfriamiento de la fundición demasiado lenta
- Alta temperatura de la concha cerámica y tiempo excesivo en el horno (sinterizado)

---

### 3.2.4 Discontinuidades superficiales

Las fisuras, grietas y fracturas se refieren a la interrupción, aberturas o discontinuidades en la estructura del material. La fisura es una abertura superficial visible que no ha penetrado más allá de la superficie de la pieza. Una grieta por su parte es una abertura más profunda y extensa en la superficie externa o interna. Finalmente, la fractura es la separación o fragmentación total del material, la cual puede iniciar desde una grieta o defectos en dicho material [39]. Las Figuras 28, 29 y 30 muestran las diferentes discontinuidades descritas.

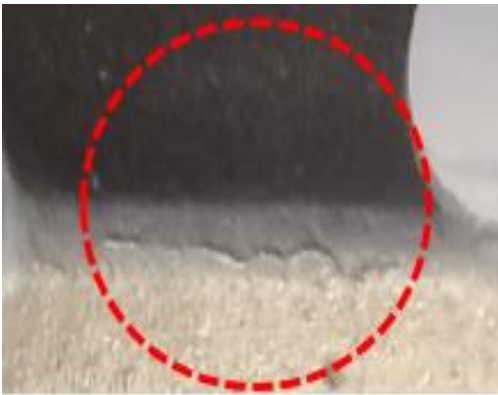


Figura 28. Pieza fisurada



Figura 29. Pieza agrietada

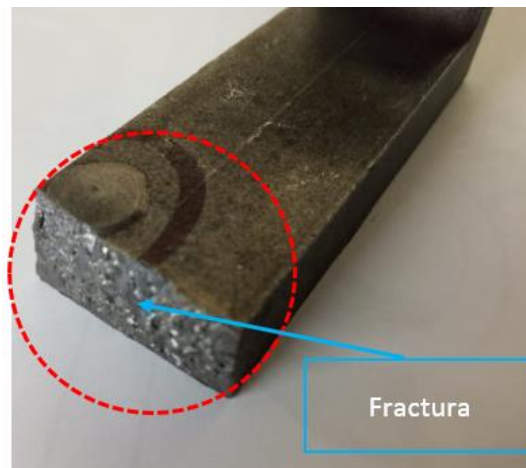


Figura 30. Pieza fracturada

---

En la solidificación y enfriamiento de las piezas fundidas muchas veces se crean tensiones, debido a los cambios de densidad y gradientes de temperatura, los cuales dan lugar a este tipo de defectos [27]. En piezas de acero, contribuye a la formación de este tipo de discontinuidades, el diseño de la fundición, la alta temperatura (fisuración en caliente, a menudo iniciada ya en la etapa final de solidificación) como durante la vida útil de la pieza, influenciada esta última por su microestructura que aumentan el rango de fragilidad [40]. Estos defectos tienen diversas causas y pueden ser producidos por otro tipo de defectos de fundición.

#### **3.2.4.1 Orígenes, causas e influencia de las discontinuidades**

Las causas principales que dan lugar a fisuras o grietas (Tears) en las piezas fundidas se deben a las tensiones desarrolladas durante el enfriamiento de las piezas, tensiones de constricción causadas por el molde, fases de bajo punto de fusión (en las regiones interdendríticas), puntos calientes aislados, gradientes térmicos desiguales en la fundición, alta temperatura de vertido, enfriamiento rápido de la fundición y a la composición química del metal [41]. También las discontinuidades y los defectos de lágrimas calientes/desgarro en caliente pueden ser causadas por un tamaño de grano de la arena demasiado grueso, la alteración del molde antes de la solidificación completa de este, alto contenido de hidrógeno, azufre, fósforo y carburos, cambios bruscos en el molde que aumentan la tensión interna, por la discontinuidad en la fundición y debido al desequilibrio de la temperatura causado durante la solidificación [32] y [42].

#### **3.2.5 Rugosidad**

Es un defecto de acabado superficial deficiente donde se presentan irregularidades, protuberancias o depresiones en la pieza fundida, los cuales, si bien no afectan la funcionalidad de la pieza, generan un aumento de costos en los procesos de acabado [27]. La Figura 31 muestra dicho defecto originado en una fundición por arena verde.



Figura 31. Superficie rugosa de una pieza de aluminio

### ***3.2.5.1 Orígenes, causas e influencia de la rugosidad***

Según la ISO 11971: 2020 [43], la rugosidad de la superficie de una pieza fundida está influenciada tanto por el proceso de fabricación (moldeo, esmerilado, acabado, etc.), por los materiales de moldeo utilizados (arena, revestimiento, etc.), el equipo disponible, así como de la aleación fundida. La técnica de cera pérdida presenta menos este defecto, en comparación a arena verde, ya que es un proceso de producción que otorga un acabado superficial liso. Sin embargo, también existen causas que generan este tipo de defecto. Como secciones transversales de los componentes, las cuales afectan directamente la rugosidad de la superficie; el acabado de la superficie es liso en las secciones más delgadas y áspero en las secciones más gruesas [44]. En cera pérdida, al utilizar el modelado por deposición fundida (FDM) para la elaboración de patrones de piezas de bajo volumen, el grosor de la capa y la orientación de las piezas tienen un efecto significativo en la rugosidad de las piezas fabricadas [45].

En la fundición por arena verde, el contenido de humedad, la temperatura de precalentamiento del molde, la dureza del molde y la temperatura de vertido pueden afectar considerablemente la rugosidad de la superficie [46]. También el uso de arena gruesa con grandes intersticios, arena de moldeo con elevada permeabilidad, alto contenido de arcilla activa y exceso de friabilidad de la arena pueden dar lugar a este defecto [33].

---

El efecto de la rugosidad de la superficie de la arena durante el llenado del molde es crucial para evitar y eliminar otros defectos, tales como cierre en frío, impurezas, gases y erosión del molde [47].

### **3.2.6 Llenado incompleto**

Se trata de un defecto geométrico que provoca el incumplimiento de la forma diseñada de la pieza, debido a la falta de material que no pudo llenar completamente la cavidad del molde [48].

La Figura 32 muestra el defecto descrito.



Figura 32. Pieza incompleta debido a la falta de material

#### ***3.2.6.1 Orígenes, causas e influencia del llenado incompleto***

El llenado incompleto de metal puede deberse a que los espesores de la sección son muy pequeños, altos tiempos de llenado ocasionando que no se llenen ciertas secciones del molde antes de que el metal solidifique, mala ventilación del molde, vertido interrumpido, baja temperatura del metal, baja temperatura del molde, falta de fluidez del metal, una velocidad de vertido lenta y por una baja permeabilidad de la concha cerámica en el caso de la técnica de cera pérdida [29] y [30].

---

### 3.2.7 Exceso de material

El exceso de material es un defecto visible en el que el metal con forma irregular queda unido a la pieza metálica por una rebaba debido a la filtración de este [30]. Figuras 33 y 34. Además de dar lugar a piezas con un excedente de material, este tipo de defecto también puede generar piezas con un llenado incompleto debido a que el metal fundido se filtra o sale del molde.



Figura 33. Exceso de material en una pieza

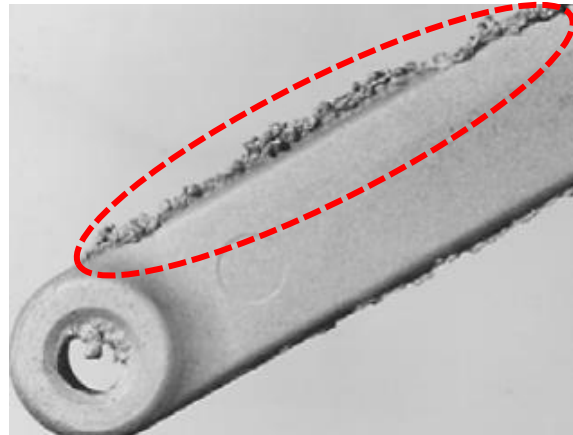


Figura 34. Pieza con rebaba

#### 3.2.7.1 Orígenes, causas e influencia del exceso de material

Este tipo de defecto es causado debido a un mal diseño del molde, cajas de moldeo en la técnica de arena con falta de sujeción o encaje incorrecto, arena demasiado débil o con falta de apisonamiento y una alta presión de vertido durante la fundición [42] y [49]. Mientras que en la técnica de cera pérdida, las causas de este defecto están relacionadas principalmente con la cera y el molde cerámico. En la cera, por un derretimiento demasiado lento en el descerado, ocasionando una mayor presión del patrón de cera sobre el molde, debido a que no se eliminó la línea de separación o la rebaba de cera. Por su parte, en el molde cerámico debido a estuco suelto, humectación incompleta del lodo cerámico, falta de secado del molde, estuco demasiado grueso, agrietamiento de la carcasa, despresurizado demasiado rápido en el autoclave y por una baja resistencia del molde [30].

### 3.3 Recomendaciones

Con base en el análisis del proceso de fundición de la empresa, la investigación, la identificación de las variables, problemas y factores más críticos que causan los defectos antes mencionados, se recomienda cuidar los siguientes parámetros críticos en el proceso de fundición de la empresa, debido a que tienen fuerte influencia en la generación de defectos.

El cuidado e implementación de estas recomendaciones son importantes, no sólo para reducir y eliminar la mayor cantidad de defectos de fundición producidos dentro de la empresa, sino para mejorar la calidad del proceso de fundición por la técnica de cera pérdida y arena verde.

#### 3.3.1 Tipo de cera y tratamiento

La cera utilizada durante el proceso de fundición es un parámetro importante, debido a que es la materia prima inicial utilizada para replicar la pieza solicitada por un cliente. La precisión dimensional, el acabado superficial y solidez del producto terminado dependen de las características de la cera, por tal motivo, las propiedades de la cera son tema de preocupación en las industrias de la fundición que utilizan la técnica de cera pérdida [50], Tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades de la cera que preocupan a las industrias*

Propiedad	Preocupación
<b>Contracción y cavitación</b>	El tipo de cera debe mostrar resultados estables y consistentes en todo momento
<b>Punto de congelación y punto de fusión</b>	Propiedad dependiente de la estructura
<b>Contenido de cenizas</b>	Residuo contenido en molde cerámico
<b>Dureza y elasticidad</b>	Rechazos debido a roturas, dobleces y otros fenómenos indeseables
<b>Viscosidad</b>	Una viscosidad incorrecta genera "Mis-runs" (llenado incompleto)
<b>Buen acabado superficial</b>	Los diferentes tipos de cera dan diferentes acabados
<b>Estabilidad a la oxidación</b>	La resistencia a la oxidación y descomposición de los componentes debido al calor o al envejecimiento

---

Las ceras utilizadas deben cumplir con un balance de propiedades y características junto con un bajo costo y gran disponibilidad [51]. El tipo, variaciones, reciclabilidad y mejoras de las ceras otorgan las propiedades adecuadas a los diferentes patrones, árboles de cera y evitan ciertos defectos en las piezas fundidas finales.

En el proceso de fundición de cera pérdida al utilizar un solo tipo de cera, aunado con una mala purificación en la reciclabilidad, genera que durante su constante reutilización esta pierda propiedades o no sean las adecuadas, se llene de impurezas (material del molde cerámico, polvo, polvos metálicos, agua introducida durante el tratamiento con vapor, entre otras.), contamine otros materiales (inclusiones) y de lugar a retrabajos, costos extras, así como a defectos en la etapa de cera y áreas subsecuentes del proceso. La Figura 35 muestra un patrón de cera con impurezas impregnadas en su superficie.



Figura 35. Cera sólida con impurezas

Es por ello, que se recomienda no ocupar un sólo tipo de cera como se ha venido realizando y se opte por utilizar según la necesidad, áreas de procesamiento y otros aspectos; inyección, extracción, manipulación y montaje, control dimensional, fabricación de moldes, descerado y otros [52]. Materiales de relleno en las ceras para mejorar las características de inyección, utilizar cera de patrón tipo emulsionada (para buen acabado superficial, baja viscosidad y adherencia), cera de patrón recto (para requisitos específicos), cera especializada (para reparaciones, sellado, adhesión y moldear formas), cera de corredor (para viscosidad y punto de fusión bajo), así como

---

---

dar un correcto tratamiento en el reciclaje de cera, dando limpieza, filtrado y usar aditivos para ajustar o mantener las propiedades a las especificaciones de la cera utilizada. De esta manera puede tenerse el tipo de cera adecuado para cualquier requisito [53]. Esto garantiza que la calidad de los patrones de cera sea mejor y las piezas producidas no se vean comprometidas, como se menciona en las categorías de cera de moldeo de Sharma *et al.* [54].

La Figura 36 muestra micrografías de luz transmitida a 100  $\mu\text{m}$  de una cera con dos formas de relleno (A) y una forma de relleno (B), las cuales tienen diferentes propiedades reológicas y de conductividad térmica [55].

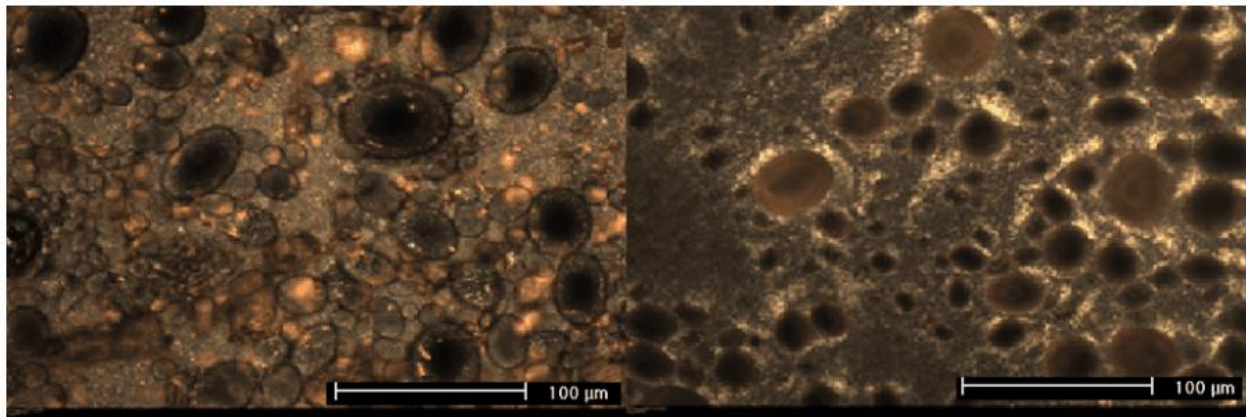


Figura 36. Cera que contiene dos formas de relleno (A) y (B) que contiene una forma de relleno

Además de tener las propiedades adecuadas de una cera para una determinada aplicación, mantener su calidad y tiempo de vida es importante. En el proceso, la cera, los patrones de cera, árboles y cualquier otro objeto de este material utilizado, no cuenta con una zona especial acondicionada, por lo que al ser expuesta al aire y atmósfera donde se llevan a cabo los diferentes procesos de la empresa, son susceptibles a contaminarse con mayor facilidad y rapidez por diversos agentes. Las Figuras 37 y 38 muestran ejemplos de contaminación.



Figura 37. Depósito de cera susceptible a contaminación

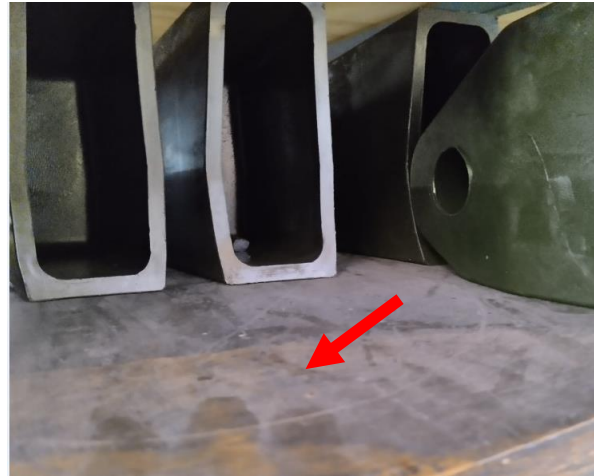


Figura 38. Polvo en rack con patrones de cera

Por esta razón, se recomienda delimitar una zona especial inocua, esterilizada y con filtros para que la cera y los distintos objetos creados con este material; se encuentren en condiciones afables y libres de contaminantes. Haciendo que el material mantenga sus propiedades y tenga un tiempo de vida útil mayor.

### 3.3.2 Parámetros de operación en la inyección

Además del tipo y calidad de la cera utilizada, los parámetros de operación utilizados en la inyectora para la elaboración de patrones de cera es un parámetro crítico, que debe considerarse y cuidarse en el proceso, para evitar la formación de diversos defectos en cera: burbujas, rebaba, hundimientos, discontinuidades, variaciones dimensionales y líneas superficiales. Las Figuras 39 y 40 muestran algunos de los defectos mencionados en patrones de cera.



Figura 39. Burbujas en patrón de cera

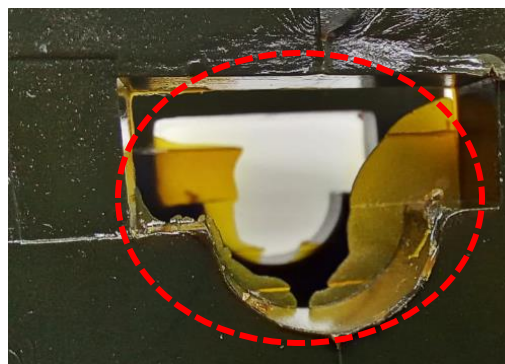


Figura 40. Rebaba en patrón de cera

Estos defectos puedan contribuir a la creación de problemas y defectos en las áreas de cerámicos, autoclave y fundición u ocasionar retrabajos y desperdicios en el área de ceras. Barati & Akbari [56] mencionan que los errores dimensionales entre la cavidad del molde y el patrón de cera son factores importantes, que afectan la precisión dimensional de la muestra final, y este error está influenciado por los parámetros de inyección. Por estas razones se recomienda cuidar y ajustar los parámetros de operación de inyección que se muestran en la Tabla 4. Para evitar dichas problemáticas y tener las condiciones óptimas de trabajo [57].

Tabla 4. Parámetros de operación en la inyección

PARÁMETRO	DEFECTO A EVITAR	RECOMENDACIÓN
Flujo de inyección	Burbujas	Mantener un bajo flujo de inyección para evitar que aire debido a turbulencia quede atrapado.
Presión de sujeción	Burbujas	Reducir la presión para evitar cerrar los orificios de ventilación.
Temperatura de la cera	Burbujas	Reducir la temperatura de la cera para evitar la formación del defecto.
Presión de inyección	Rebaba	Reducir la presión para evitar que el molde pueda abrirse.
Unión del molde	Rebaba	Verificar que el molde embone y tenga una unión uniforme.
Temperatura de la cera	Rebaba	Reducir la temperatura de la cera.
Temperatura de la cera	Hundimiento	Reducir la temperatura de la cera.
Presión de inyección	Hundimiento	Aumentar la presión de inyección.

<b>Inyección corta/ tiempo de permanencia/ tiempo de retención</b>	Hundimiento	Aumentar el tiempo para evitar el defecto.
<b>Temperatura de la boquilla</b>	Hundimiento	La congelación de la cera en la boquilla genera el defecto. Para evitarlo aumente la temperatura +2°F o más por encima de la temperatura de la cera.
<b>Enfriamiento de cera caliente</b>	Hundimiento	Deje que la cera se enfríe antes de colocar el molde en la inyección.
<b>Temperatura del molde</b>	Hundimiento	Revise la temperatura del molde y determine si el enfriamiento de la platina o el molde mejoraría la condición.
<b>Tiempo de inyección</b>	Discontinuidades	Mantenga un bajo tiempo de inyección para evitar que el patrón se vuelva duro y quebradizo.
<b>Presión de inyección</b>	Discontinuidades	Reduzca la presión. Una alta presión hace difícil retirar el patrón del molde.
<b>Temperatura del molde</b>	Discontinuidades	Aumente la temperatura del molde o platina.
<b>Interiores del molde</b>	Discontinuidades	Si el molde presenta esquinas afiladas, adicione filetes.
<b>Presión de inyección</b>	Variación dimensional	Mantenga una presión cte. Una presión baja reduce las dimensiones y un alta las aumenta.
<b>Tiempo de inyección</b>	Variación dimensional	Mantenga un tiempo consistente. Un tiempo corto reduce las dimensiones, mientras que uno largo las aumenta.
<b>Temperatura de la cera</b>	Variación dimensional	Mantenga la temperatura uniforme. Una temperatura baja aumenta las dimensiones y un alta reduce las dimensiones.
<b>Temperatura del molde</b>	Variación dimensional	Evite la variación de la temperatura del molde y manténgala constante.
<b>Temperatura de la boquilla</b>	Variación dimensional	Evite una alta temperatura, ya que puede provocar variaciones en piezas pequeñas.
<b>Limpieza del molde</b>	Variación dimensional	Limpie el molde o de mantenimiento.
<b>Unión del molde</b>	Variación dimensional	Evite que el molde se desajuste.
<b>Temperatura de la cera</b>	Líneas superficiales	Aumente la temperatura de la cera para evitar que esté fría.
<b>Presión de inyección</b>	Líneas superficiales	Evite tener una presión baja.

<b>Temperatura del molde</b>	Líneas superficiales	Ajuste la temperatura del molde y revise la temperatura del agua de la platina.
<b>Temperatura de la boquilla</b>	Líneas superficiales	Aumente la temperatura de la boquilla para evitar tener cera fría en ella.

### 3.3.3 Material cerámico y su cuidado

Durante la elaboración del molde cerámico con materiales refractarios y aglutinantes, existen diversos parámetros que deben cuidarse, para evitar generar defectos en la concha cerámica y de fundición que perjudiquen la pieza final (Figura 41). Generalmente, las problemáticas van surgiendo cronológicamente conforme se empieza y va construyendo el revestimiento en el área de cerámicos. Debido a esto, se hacen las siguientes recomendaciones en el proceso:



Figura 41. Escape de material debido a grietas en concha cerámica

#### 3.3.3.1 Tipo de material

Al igual que en el área de ceras, en el área de cerámicos también existen diversos materiales que pueden utilizarse. Los distintos tipos y composiciones, para la elaboración del molde confieren diferentes propiedades y características, que hacen que sea uno más conveniente o no para una determinada aplicación. Un ejemplo de ello, son las aleaciones TiAl, las cuales son un metal

---

reactivo en estado fundido, que requieren de considerar la estabilidad termodinámica del molde cerámico, ya que se oxida fácilmente y reacciona con los materiales del crisol y molde [58].

Por esta razón, debido a que en el proceso llevado a cabo en la empresa la utilización de estos materiales no varía, se recomienda que, dependiendo de la aleación a fundir, los moldes que se desee modelar y otros factores específicos. Se haga una modificación, adecuación, variación o diferente elección de los materiales empleados para tener mejores resultados.

Cualquier molde utilizado en cera pérdida, debe cumplir con cuatro requisitos indispensables para otorgar un buen molde de fundición [15]:

- Refractoriedad
- Contar con algún aglutinante
- Porosidad
- Capacidad de separarse del metal

Materiales refractarios como sílice, el circón, la alúmina y diversos silicatos de aluminio son de uso común, tanto para el lodo cerámico como para el estuco aplicado. La sílice fundida tiene un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, le confiere resistencia al choque térmico a los moldes. Sin embargo, si es utilizada como cuarzo natural provoca agrietamiento en el molde, si no se sinteriza lentamente. El circón en forma de arena se usa como estuco y se limita a la aplicación de primeras capas. La alúmina es un material costoso y de uso selectivo, se usa para procesos de solidificación direccional y fundición de superaleaciones. Los silicatos de aluminio tienen un contenido de 42 y 73% de alúmina. Mientras más porcentaje se tenga, más refractaria es la materia obtenida y más cara. Otros materiales, como el grafito, zirconia y la itria son utilizados también con aleaciones reactivas. Estos distintos materiales otorgan diferentes propiedades, las cuales pueden verse en la Tabla 5 [59].

Tabla 5. Composiciones nominales y propiedades típicas de los refractarios comunes para la fundición por cera pérdida

Nominal		Aproximado		Relativa	Aproximado		Temperatura				
Composición		Densidad		Lixiviabilidad	Punto de		PCE				
Cristalina		teórica			fusión						
Material	%	Forma	g/cm <sup>3</sup>	lb/in <sup>3</sup>	(a)	°C	°F	°C	°F	pH	Color
<b>Aluminosilicatos</b>											
<b>42%</b>	$Al_2O_3$ – 53 $SiO_2$	Mezcla	2.4- 2.5	0.086- 0.090	Pobre	---	---	1750	3180	6.5- 7.8	Gris a tostado
<b>47%</b>	$Al_2O_3$ – 49 $SiO_2$	Mezcla	2.5- 2.6	0.090- 0.094	Pobre	---	---	1760	3200	6.5- 7.8	Gris a tostado
<b>60%</b>	$Al_2O_3$ – 36 $SiO_2$	Mezcla	2.7- 2.8	0.097- 0.10	Pobre	---	---	1820	3310	6.5- 7.8	Gris a tostado
<b>70%</b>	$Al_2O_3$ – 25 $SiO_2$	Mezcla	2.8- 2.9	0.10- 0.104	Pobre	---	---	1865	3390	6.5- 7.8	Gris a tostado
<b>73%</b>	$Al_2O_3$ – 22 $SiO_2$	Mezcla	2.8- 2.9	0.10- 0.104	Pobre	---	---	1820	3310	6.5- 7.8	Gris a tostado
<b>Alúmina</b>	99% · $Al_2O_3$	Trigonal	4.0	0.144	Pobre	2040	3700	---	---	8.5- 8.9	Blanco
<b>Sílice fundida</b>	99.5% $SiO_2$	Típicamente 97% - amorfo	2.2	0.079	buena	1710	3110	---	---	6.0- 7.5	Blanco
<b>Sílice-Cuarzo</b>	99.5% $SiO_2$	Hexagonal	2.6	0.094	Buena	1710	3110	---	---	6.4- 7.5	Blanco a tostado
<b>Circón</b>	97% $ZrSiO_4$	Tetragonal	4.5	0.162	Moderada	2550	4620	---	---	4.7- 7.0	Blanco a tostado

- **Pobre:** ligera reacción en álcali concentrado caliente; **Buena:** soluble a muy soluble en álcali concentrado caliente o ácido fluorhídrico; **Moderado:** reacciona con el concentrado caliente.
- **PCE,** equivalente de concentración pirométrica.

En la técnica de cera pérdida los aglutinantes más utilizados son del tipo silíceo e incluyen la sílice coloidal, el silicato de etilo hidrolizado y el silicato de sodio. También existen aglutinantes híbridos y de alúmina o circonio.

---

La sílice coloidal es la más empleada, presenta un mayor índice de refractariedad que otros aglutinantes, y es parte encargada de elevar la porosidad del molde cerámico. La sílice coloidal empieza a deformarse a una temperatura de 1400°C, el punto de fusión disminuye si se eleva la proporción de sodio utilizado. La principal desventaja de este aglutinante es que su base acuosa hace que su secado sea lento. Por su parte el silicato de etilo, con su base de alcohol, se seca más rápido. Sin embargo, tiene la desventaja de ser más caro, agrietar el molde durante el sinterizado, presentar riesgos para el medio ambiente y otorgar una resistencia más débil al molde, que el elaborado con sílice coloidal. El silicato sódico es utilizado para moldes de gran tamaño, donde se precisa una gran dureza y precisión. Es un aglutinante económico con aplicaciones limitadas, debido a que otorga baja refractariedad y baja resistencia a la atmósfera de vapor de los autoclave [52] y [15]. Además de los componentes fundamentales mencionados; que debe contener un molde, existen otros componentes, que pueden ser agregados para ayudar a mejorar las características y propiedades de este. Los más comunes son los agentes humectantes, los cuales favorecen la humectación de los patrones o de las capas de lodo cerámico. Los antiespumantes son otro componente, que se usa para evitar la formación de espuma y permitir que escapen las burbujas de aire. También son agregados otros constituyentes, como formadores de película orgánicos para mejorar la resistencia en verde y resiliencia. Y agentes nucleantes o refinadores de grano [59].

Como puede verse, existe una amplia gama de materiales que pueden utilizarse para la elaboración del molde cerámico en la técnica de cera pérdida. La formulación y variación llevada a la experimentación e implementación con procedimientos de control de estos materiales, puede traer mejores resultados, los cuales son convenientes para tener fundiciones de mejor calidad. Kumar & Karunakar [18] mejoraron la permeabilidad del molde cerámico mezclando coque de agujas finas y gruesas con lodos de revestimiento interior y exterior. Tamta *et al.* [60] redujeron la formación de grietas del molde mezclando Fevicol (adhesivo) con el aglutinante de los ingredientes convencionales del lodo cerámico (polvo refractario de silicato de aluminio, aglutinante de sílice coloidal y polvo de circon). Pattnaik [61] mejoró la calidad del molde utilizando aserrín como aditivo económico y natural en los lodos cerámicos. Por ello se recomienda utilizar distintos tipos y composiciones de materiales cerámicos en la empresa.

---

### 3.3.3.2 Cuidado de las etapas del proceso de cerámicos

Además de los materiales empleados, la obtención de una pieza fundida de calidad depende de la forma de llevar a cabo de manera adecuada una actividad; y tener el cuidado máximo en cada uno de los pasos del proceso de cerámicos. Ya que, si no son las óptimas surgen problemáticas en las diversas etapas de elaboración del molde cerámico, que pueden llevar a la generación de defectos en este y posteriormente de fundición. Por esta razón, se sugiere considerar las recomendaciones que se hacen sobre las diferentes etapas llevadas a cabo en el área de cerámicos mostrada en la Tabla 6 [62].

Tabla 6. Aspectos que cuidar en las diferentes etapas de cerámicos

Etapa	Propósito	Problemática / Defecto	Recomendación
<b>LIMPIEZA Y GRABADO DE ÁRBOLES</b>	Eliminar cualquier suciedad y contaminante. Crear una rugosidad microscópica en la superficie para mejorar la adherencia y acabado del lodo.	Defectos en el proceso de descascarillado. Deformación de capa primaria. Patrones sobredimensionados y subgrabados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sumergir el árbol el tiempo suficiente para eliminar agentes contaminantes.</li> <li>-Mantener las concentraciones adecuadas de agentes humectantes y antiespumantes de los lodos.</li> <li>-Dejar secar los árboles limpios antes de sumergirlos en el lodo.</li> </ul>
<b>PREPARACIÓN DE LODOS</b>	Tener lodos en condiciones y propiedades adecuadas para el proceso.	Burbujas. Penetración de estuco y superficies rugosas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No preparar los lodos en el tanque de inmersión sino en un tanque de mezcla separado.</li> <li>-Permitir que el aire salga del lodo antes de que este pueda dar su máxima resistencia y una viscosidad estable.</li> <li>-Humedecer adecuadamente el lodo.</li> <li>-Ajuste el lodo a la viscosidad final deseada agregando más aglutinante y harina.</li> <li>-Localice burbujas antes de la aplicación de estuco y sópelas o rómpelas.</li> <li>-Haga inmersiones lentas.</li> <li>- Evitar utilizar lodo demasiado fino.</li> <li>-No utilice estuco demasiado grueso.</li> <li>-Si existe espuma en lodos, cambie o reduzca el agente</li> </ul>

<p><b>MANTENIMIENTO DE LODO Y ESTUCO</b></p>	<p>Evitar problemas por las condiciones de los materiales involucrados.</p>	<p>Puntos débiles. Infiltración de material. Penetración de metal. Agrietamiento y rebaba de la cáscara cerámica.</p>	<p>humectante o use un antiespumante.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Soplar o sacudir el exceso de estuco inmediatamente después de la aplicación.</li> <li>-Utilizar estuco más pequeño.</li> <li>-Tamizar grumos de estuco.</li> <li>-Aumentar el tiempo de secado en ranuras o agujeros del molde.</li> <li>-Reducir la viscosidad del lodo.</li> <li>-Modificar la orientación del molde para que el lodo pueda llenar las ranuras o agujeros.</li> <li>-Mantenga una temperatura uniforme de los moldes antes de descerar.</li> <li>-En autoclave evitar tener un aumento de presión demasiado lento.</li> <li>-Espesar el molde usando inmersiones adicionales de lodo para mejorar la resistencia al estallido en verde.</li> <li>-Dejar secar el revestimiento el tiempo suficiente.</li> </ul>
<p><b>SECADO DE REVESTIMIENTOS</b></p>	<p>Evitar problemas y defectos que pueden ser causados en el revestimiento.</p>	<p>Daños al revestimiento por expansión y contracción de la cera. Grietas de secado/Colas de rata. Levantamiento de primera capa. Desprendimiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantener un buen control de la temperatura ambiente de la zona de procesamiento del molde las 24 hrs del día.</li> <li>-Aumentar la humedad durante el secado por inmersión.</li> <li>-Utilice un tiempo de secado mínimo.</li> <li>-Si existe un desajuste en el coeficiente de expansión de las capas de respaldo y primaria. Cambie la selección de los refractarios.</li> <li>-Mejore el procedimiento de lavado (grabado) de árboles.</li> <li>-Evite el secado excesivo de las superficies exteriores de la primera capa.</li> <li>-Modifique la técnica de inmersión y drenaje para eliminar la acumulación de lodo en las esquinas.</li> <li>-Eliminar el estuco suelto. Reducir la viscosidad o prehumectar.</li> </ul> <p>Mejorar la uniformidad del drenaje. Considerar estuco de tamaño intermedio.</p>

			<p>-Si el desprendimiento se produce sólo en la cocción, sospeche de una diferencia de dilatación entre las capas. Libere la presión gradualmente en el autoclave.</p>
<p><b>DESCERADO Y PRECAUCIONES</b></p>	<p>Evitar problemas y defectos que pueden ser causados en el descerado y otros procesos.</p>	<p>Agrietamiento. Delaminación. Agrietamiento abombado. Sobrecalentamiento. Inclusiones. Rotura de núcleo.</p>	<p>-El éxito del descerado en autoclave depende de que la cera reciba calor lo más rápido posible. - No deje el molde en el área del autoclave, ya que suele estar más caliente que la sala de moldes cerámicos. -El autoclave debe alcanzar 100 PSIG en 10s / 80 PSIG en 8s. O al menos 60 PSIG en 6s. -Libere la presión lentamente al final del descerado. -Añada un refuerzo y/o capas adicionales. -Evite piezas demasiado juntas en el árbol, ya que puede producir un molde débil debido a un secado inadecuado. También puede retardar la transferencia de calor. -Bajar la temperatura de cocción. -Evite una temperatura del metal demasiado alta. -Utilice un refractario que disipe el calor en lugar de que actúe como aislante. -Lavar los moldes, guardar boca abajo, sopletarlos justo antes de la cocción y limpiar el borde. -Compruebe la presión de inyección de cera. -Confirmar que las propiedades de la cera son consistentes. -Compruebe que los núcleos no están agrietados.</p>

---

### 3.3.3.3 Mantenimiento y limpieza del área

Las propiedades, rendimiento y vida útil del material cerámico empleado para el molde pueden verse afectados debido a la contaminación de este. Los contaminantes pueden ser transmitidos por los operarios, generadas por el propio material debido a su descomposición, como cerámica seca en costados del tanque; la cual promueve la generación de microorganismos, por agentes adheridos a la cera, residuos de lavado y por una mala limpieza del área. La Figura 42 muestra material cerámico seco en los costados de un contenedor de lodos ocupado en el proceso.

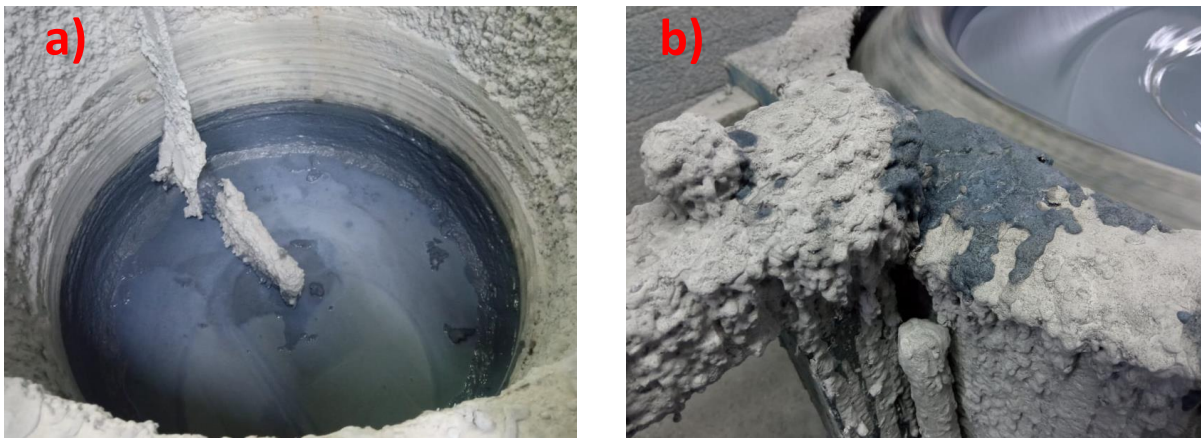


Figura 42. Exceso de material cerámico seco en contenedor a) interior b) exterior

Los lodos son los más propensos a contaminarse por microorganismos, especialmente por bacterias. Estas pueden desarrollarse debido al calor o humedad en el entorno de trabajo, la temperatura, debido a que condiciona su crecimiento y supervivencia; bacterias y hongos pueden sobrevivir en un rango de temperatura de 0 hasta 65°C. El oxígeno, es requerido por ciertas bacterias para su desarrollo, el pH es otro factor que influye en su crecimiento (crecen a pH bajos (3.0) aunque también de 6.0 hasta 8.5 o mayor) [63].

Debido al efecto perjudicial que causan en los lodos, abordar la presencia de bacterias en lodos comienza a dejar de ser un tema que se menosprecie y pase por alto. Se ha mencionado en seminarios web técnicos, como la European Investment Casters' Federation (EICF) e industrias y proveedores relacionadas con la técnica de cera pérdida; han elaborado consejos técnicos y productos revolucionarios para combatir esta problemática. Sin embargo, el tema aún es

desconocido por muchas empresas, lo que causa que no hagan un análisis de lodos, métodos de prueba y combatan el problema.

Para eliminar los defectos de fundición se requiere de combatir las causas que los originan, las causas pueden provenir desde las materias primas, como las ceras y materiales cerámicos, estos dan árboles y moldes con malas propiedades y defectos que crean más defectos. Por ello, se hacen las siguientes recomendaciones, para evitar que las propiedades de los lodos se vean afectadas.

Dado que cualquier contaminante o microorganismo se encuentran prácticamente en todas partes, excepto en entornos en los que se han esterilizado, la higiene en el área de cerámicos de fundición por cera pérdida es sumamente importante. Por esta razón, se recomienda excluir la zona, mantenerla limpia, desinfectada y con un sistema de acceso controlado. Esto evitará que agentes contaminantes externos ingresen al área y que bacterias crezcan. La realización de pruebas periódicas en la empresa es importante; para comprender las propiedades en que se encuentran los lodos, y para saber si se tiene la posible presencia de bacterias. Las bacterias pueden ser detectadas por pruebas de pH, bacteriológicas y por gelificación acelerada [64]. La Figura 43 muestra la representación de una prueba bacteriana, donde se utiliza una tira indicadora en una muestra para identificar la severidad y cantidad total de microorganismos.

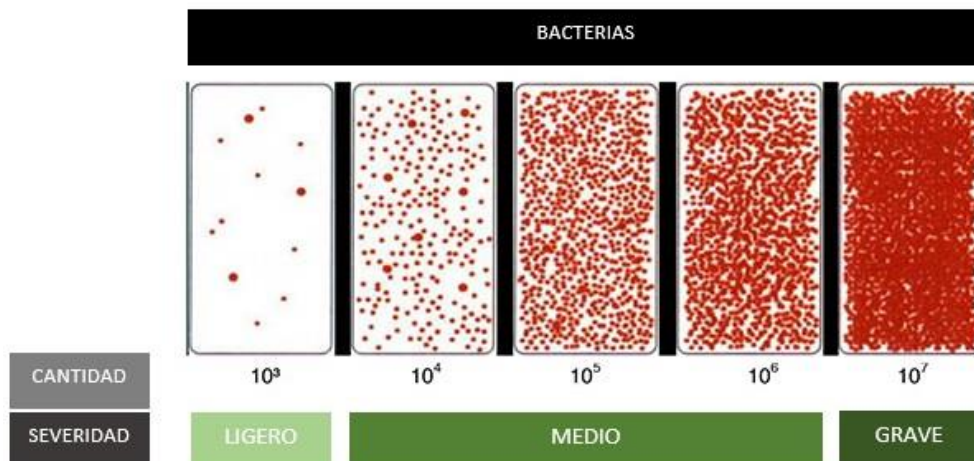


Figura 43. Resultados de una prueba que muestra las colonias de bacterias

---

Si se tiene la presencia de bacterias en los lodos cerámicos, se recomienda llevar a cabo lo siguiente:

- Agregar lejía (hipoclorito de sodio) o algún biocida a los tanques (la selección de un biocida apropiado es importante, ya que la incompatibilidad puede generar un aumento de la viscosidad, precipitación o gelificación de la sílice). El hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ /Biocida) nunca debe agregarse a formulaciones que contengan amoníaco o soles estabilizados con amoníaco, ya que esto resultará en la evolución de gases tóxicos.

El peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), también conocido como agua oxigenada, es un biocida de acción rápida para eliminar niveles bacterianos. Es adecuada una dosis para hacer 100 ppm (100 mg/L) en peso de aglutinante. Estos productos químicos son fuertes oxidantes, se degradan rápido y bajan sus niveles de eficacia después de 1 a 2 semanas.

- Raspar la cerámica seca del costado de los tanques y lavar los contenedores frecuentemente.
- Calentamiento del agua de la tina de lavado.
- Mantener los recipientes del proceso cerrados cuando no se encuentren operando.
- Las salidas de aire deben dirigirse lejos de los recipientes abiertos y los desagües de piso abiertos cerca de los recipientes abiertos deben cubrirse o redirigirse.
- Equipos e instrumentos en contacto con el aglutinante debe considerarse una fuente potencial de contaminación. Por lo tanto, requieren de ser limpiados y desinfectados [65] y [66].

### 3.3.4 La arena verde y su control de las propiedades

La arena verde se compone de arena, arcilla, humedad y en ocasiones aditivos, la combinación de cada elemento con ciertas características y en ciertos porcentajes, otorga las propiedades adecuadas de moldeo. Para evitar generar defectos de fundición y garantizar la calidad final de las piezas, es necesario asegurar las condiciones de la arena utilizada, realizando ensayos periódicos que permitan determinar las diferentes propiedades de estas:

- Ensayo de porcentaje de humedad
- Ensayo de permeabilidad
- Ensayo de granulometría
- Ensayo de resistencia a la compresión y tracción
- Ensayo para determinar la compactabilidad

En la empresa analizada, las especificaciones de la arena no son evaluadas constante y correctamente por medio de diversos ensayos, debido a la falta de equipo y una incorrecta práctica. Esto ha ocasionado que no tenga un control de la arena. Aunado a esto, la adecuación y tratamiento de la arena reutilizada presenta composiciones y propiedades variantes debido a la falta de inspección, contaminación por materiales extraños, por la exposición continua a altas temperaturas, cuando hay sobreproducción y por una preparación sin estándares. Las Figuras 44 y 45 muestran diversas condiciones en la que es usada la arena en el proceso.



Figura 44. Porcentaje de humedad variante



Figura 45. Arena con materiales extraños

La mayoría de los defectos obtenidos en el proceso por fundiciones en arena (porosidad y rugosidad) se deben a las condiciones en que se encuentra la arena, debido a lo antes mencionado y a que la arena que se preparó en un principio no ha sido cambiada constantemente. El hecho de usar arena verde con amplios ciclos prolongado de uso, no agregando arcilla y arena nueva, así como al hecho de agregar porcentajes de humedad en cantidades variantes a la mezcla, ha originado que la arena verde no cuente con las propiedades idóneas para el proceso, no funcione como medio para drenar ciertas impurezas y no haya podido reponer su contenido por pérdidas. Por ello, se recomienda mantener los porcentajes de la composición de la arena en las especificadas, mejorar el proceso de molienda, evitar arena caliente y revisar la granulometría y morfología de la arena verde. Otras consideraciones importantes, son tener en cuenta el tipo de aleación a vaciar en el molde y hacer ensayos constantemente, para conocer el estado de la arena y llevar un control de las propiedades.

### **3.3.4.1 Composición y mezclado**

#### **3.3.4.1.1 Composición**

Se recomienda mantener la composición promedio de la arena verde que muestra en la Tabla 7 [23], si esta se ve alterada en la reutilización, mala adecuación y exposición a alta temperatura durante el proceso, puede ocasionar diferentes defectos de fundición.

*Tabla 7. Composición promedio de la arena verde*

<b>Arena sílice, olivino o circonio</b>	<b>Arcilla bentonita</b>	<b>% humedad</b>	<b>Aditivos carbonosos</b>
85-95%	5-10%	2-5%	3-9% (Fundiciones ferrosas)

Si el contenido de la arena se reduce, el acabado superficial de las aleaciones con altas temperaturas de vaciado puede deteriorarse, debido a la pérdida de capacidad refractaria. Por ello, debe adicionarse arena nueva para además de reponer el contenido perdido, drenar ceniza, finos y arcilla destruida térmicamente. En el caso de la arcilla, cambiar la cantidad total de esta y de humedad puede alterar la resistencia a la compresión, la permeabilidad y otras propiedades

físicas de la arena verde. Como la arcilla necesita de agua para ser activada, cambios a los especificados en la formulación, hace que se ejerza una fuerte influencia en la capacidad de extracción de calor de los moldes y, por consiguiente, se afecten las propiedades mecánicas de la pieza [20]. El cuidado y la adición de arcilla nueva ayuda a mantener las propiedades idóneas y compensar las pérdidas por destrucción térmica, colección de polvos, etc. [22]. Incrementos en el porcentaje de humedad influye directamente en las propiedades mecánicas, como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, compactibilidad, etc., debido a que responden al acomodamiento de las capas de agua entre las partículas de la arcilla. La cohesión entre los granos de la arena se debe a la existencia de estas capas [67]. La adición de agua a la mezcla debe ser cuidadosa, ya que depende de la calidad y cantidad de bentonita. Azhar *et al.* [68] mencionan en su artículo que las cantidades específicas de estos, hace que se produzca la plasticidad y resistencia necesaria, ya que el agua absorbida por la arcilla ayuda a la unión y aumenta la resistencia. La Figura 46 muestra un gráfico de la relación entre el contenido de agua y la resistencia a la compresión en verde.

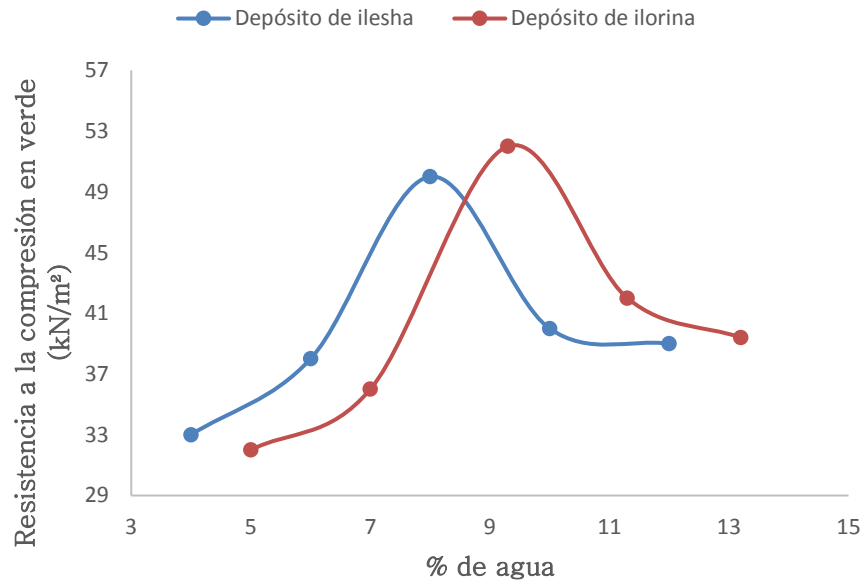


Figura 46. Resistencia a la compresión en verde con % de adición de agua

---

Otro aspecto importante requerido es el uso de agua limpia y con pH neutro o básico (un pH ácido dificulta el hinchamiento de la bentonita). Es importante llevar un control del pH (agua-arena) ya que, si cae de 8,0 a 6,0, se debe agregar más bentonita para obtener la fuerza adecuada [23]. Por estas razones el cuidado del porcentaje de humedad es importante, ya que puede afectar la mayoría de las propiedades físicas y generar varios problemas en la colada y el molde.

#### **3.3.4.1.2 La molienda de la arena verde**

Es sumamente importante la molienda para activar el porcentaje de arcilla de bentonita dentro de la arena y mejorar el acabado superficial de la pieza, dado que se modula el tamaño de partícula. Por ello, debe verificarse que el molino o tipo de molienda utilizado sea capaz de generar las cargas de compresión y corte adecuadas; para desarrollar las propiedades físicas de la arena verde. La resistencia a la compresión en verde puede incrementarse o disminuirse por la cantidad y/o efectividad de este parámetro [22]. La Figura 47 muestra varios grumos en la arena verde del proceso.



Figura 47. Arena verde grumosa reutilizada

---

### **3.3.4.2 Arena caliente**

Al ser ocupada múltiples veces la arena verde sin enfriar, para la elaboración de moldes, esta tiende a aumentar su temperatura, debido a que el silicio actúa como aislante. La arena verde es considerada caliente a temperaturas por encima de 48°C. Esta temperatura comienza a ser un problema que afecta a todas las operaciones llevadas a cabo en el proceso. Ocasiona la pérdida de propiedades físicas de la arena verde, arena pegada, inclusiones, erosión, porosidad, mayor consumo de bentonita debido a su destrucción térmica, penetración de metal, moldes rotos, difícil control de humedad, arenas frágiles, el triturado hace que la arena sea inconsistente y difícil de controlar, mal acabado superficial de las piezas, entre otras [22] y [69]. Para evitar esto, se recomienda tomar la toma de temperatura del árido con ayuda de un instrumento (termómetro infrarrojo) para tener un control de la arena y conocer si es arena caliente. Evitar usar la arena sin antes dejarla enfriar cuando haya sobrecarga de trabajo, para evitar que pierda propiedades y se produzcan defectos. La implementación de un enfriador que utilice la vaporización y evaporación aceleraría el proceso de enfriamiento, contribuiría a solucionar la mayoría de los problemas causados por arena caliente, se incrementaría la productividad, porque se reducirían los defectos de fundición y se incrementaría la capacidad de trituración. Además se reduciría el uso de arcilla de bentonita [69].

Hacer ensayos para conocer las propiedades y composición de la arena verde, ayudaría a la empresa a saber las condiciones de la arena, para poder hacer los ajustes y adición de material en caso de necesitarse por alguna pérdida. Con esto se evita reducir la capacidad de la arena verde.

---

### **3.3.4.3 Granulometría y morfología de los granos de la arena**

La mayoría de los defectos encontrados en el proceso de arena verde de la empresa corresponden a porosidades y rugosidad. Los orígenes pueden deberse principalmente a un alto porcentaje de humedad en la composición, una granulometría y morfología de los granos de la arena inadecuada, que puede ir acompañada de impurezas. Debido a esto, se recomienda realizar ensayos estandarizados por la AFS (American Foundry Society) para determinar las características, propiedades de la arena verde y su influencia en los moldes y piezas fundidas.

La granulometría de la arena es la medición, graduación y cálculo de abundancia de los granos con fines de análisis. Tiene efecto en la resistencia a la compresión en verde. En fundición, la distribución granulométrica es de 150 a 400  $\mu\text{m}$ , siendo el rango de 220 a 250  $\mu\text{m}$  la más utilizada. Los intervalos pueden ser usados para diferente aplicación, en el Reino Unido utilizan el rango de 150 a 300  $\mu\text{m}$  de la siguiente manera [68]:

- 210 a 300  $\mu\text{m}$  para fundiciones ferrosas
- 170 a 270  $\mu\text{m}$  para fundiciones no ferrosas

En la arena de moldeo existen tres factores morfológicos que juegan un papel crucial en las propiedades de los moldes; forma, tamaño y distribución de los granos. La Figura 48 muestra la clasificación de los granos según su morfología. La caracterización de estos factores lleva a definir el “índice de finura AFS”, el cual determina el tamaño promedio de los granos en función de esa clasificación. Para determinarlo, una muestra de arena es sometida a tamices con diferente tamaño de abertura (clasificación granulométrica) y vibración durante cierto tiempo, posteriormente es determinado el peso retenido de cada tamiz y es multiplicado por un factor específico [19]. La Tabla 8 muestra la clasificación de la arena de acuerdo con el índice de finura AFS [70].

Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

Aptos para fundición

Figura 48. Clasificación de los granos según su redondez y esfericidad

Tabla 8. Clasificación de la arena según el índice AFS

Granulometría	Índice de finura	Tamaño de grano (mm)
Muy gruesa	<18	2 - 1
Gruesa	18 - 35	1 - 0.5
Media	35 - 60	0.5 - 0.25
Fina	60 - 150	0.25 - 0.10
Finísima	>150	0.10

El tamaño de los granos (granulometría) de la arena tiene una fuerte influencia en el control de las propiedades, en el acabado superficial de las piezas finales, en la permeabilidad, la cohesión y refractariedad del molde. La alta permeabilidad se caracteriza por arenas de grano grueso y uniforme, este tamaño de grano también puede provocar penetración de metal y un acabado superficial áspero, por su parte la finura superficial, mayor resistencia a la compresión en verde en comparación con un grano grueso, así como baja permeabilidad son características de las arenas de grano fino [71]. Durante el uso continuo de la arena, los granos se pueden descomponer por el reciclado repetido, dando lugar a granos más pequeños que ocasionan que la porosidad

---

del molde disminuya. Por ello es importante mantener y equilibrar la distribución de la arena, tamizar y utilizar colectores de polvo en el proceso [52].

El tamaño de partícula de la arena también tiene influencia en la disipación de calor. En un estudio realizado por Ajay & Lovneesh [72] sobre el efecto del tamaño de grano y la disipación de calor, encontraron que con arena gruesa la velocidad de solidificación es baja, se tiene buena permeabilidad debido a que los gases atrapados que se crean durante el vertido pueden escapar fácilmente y que la disipación de calor es mayor que con otros tamaños de grano.

En cuanto a la forma, se clasifican en: redondos, angulares, subangulares y compuestos. La forma de la arena influye también en las características del molde. Por ejemplo, granos redondos al tener menos contacto entre sí en una mezcla apisonada, ocasionan que los moldes carezcan de resistencia, sin embargo, favorecen la plasticidad y permeabilidad. Granos compuestos (mezcla de angulares, subangulares y redondos) no son deseables debido a que tienen la tendencia a desintegrarse a altas temperaturas [73] y [74]. Los granos angulares tienen mayor área de superficie, lo que hace que requieran más trituración, adherencia y humedad. La angulosidad de estos aumenta con el uso de la arena debido a que esta se descompone por choque térmico y mecánico [52].

Debido a que la arena utilizada en el proceso ya cuenta con una variación de la composición, contaminación y pérdida de propiedades, considerar la granulometría y morfología de los granos es sumamente importante, no debe pasar desapercibida para evitar que la arena verde agrave aún más los problemas y ocasione diversos defectos de fundición.

---

### 3.3.5 Proceso de fundición de metales

En la etapa de fundición llevado a cabo en la empresa analizada, existen aspectos que no son adecuados, pasan desapercibidos, no son considerados o pueden ser mejorados. Esto genera que se produzcan defectos de fundición o se tenga bajos niveles de eficacia. Por esta razón se recomienda considerar y atender a las siguientes prácticas, condiciones y mejoras durante la fundición para reducir defectos y obtener mejores resultados.

#### 3.3.5.1 Prácticas y condiciones de fundición

- Verificar y eliminar contaminantes, como humedad, óxido o lubricantes de la carga a utilizar y herramientas de fundición (crisol, cuchara, entre otros) antes de ser utilizarlos.
- No utilizar sólo chatarra o despunte (truncos usados) para la carga debido a que esta puede estar contaminada y presentar defectos. Asegúrese de tener una cantidad adecuada, aprobada y asegurada de metal virgen.
- No fundir aleaciones diferentes en un mismo revestimiento o crisol ya que puede provocar contaminaciones. Este aspecto es muy importante, debido a que la empresa tiene una cantidad de crisoles reducida, utiliza los mismos para diferentes aleaciones y las técnicas de limpieza de estos no son las adecuadas.
- Calentar los moldes a una temperatura similar a la del metal antes de llevar a cabo la colada para mejorar la fluidez.
- Cuidar en el horno de fusión que los gases de combustión no tengan contacto con el metal fundido.
- En el horno de inducción, la carga debe agregarse de manera que pueda deslizarse libremente hacia el baño, para evitar dañar el revestimiento del horno y causar un efecto indeseable en la composición del metal [38].
- Cuidar la frecuencia utilizada en el horno de inducción debido a que dependiendo de cual se utilice tendrá efecto en la turbulencia y oxidación.
- Asegurarse de alcanzar el punto de fusión para evitar que el metal se encuentre en un estado pastoso (partes fundidas y otras que no).
- Controlar la temperatura de colada del metal.

---

En la porosidad por gas en arena, una temperatura de colada alta (y/o un tiempo de colada bajo) disminuye la velocidad de solidificación, pero aumenta el tiempo disponible para la eliminación de gases. Esto también aumenta el límite de solubilidad de los gases, lo que facilita la extracción de gases del aire o del molde. Por ello, es mejor una temperatura de colada baja [27]. Sin embargo, si se utiliza una temperatura muy baja con una colada muy lenta, puede producir el defecto de fundición de llenado incompleto.

- Evitar largos periodos de tiempo entre la preparación de la masa fundida y la colada.
- Hacer lecturas de gas antes de la colada, si la superficie de la muestra presenta una superficie abombada o convexa es indicativo de que se tiene un alto contenido de gas, por su parte una superficie hundida quiere decir que el contenido es bajo.
- Utilizar filtros para fundición en la colada para evitar que ingresen impurezas y se tenga un control del flujo.
- Utilizar fundentes (oxidantes, reductores y neutros) en función de la preparación del metal.
- No interrumpir el llenado durante la colada.
- Cuidar la velocidad de colada y de enfriamiento para controlar y minimizar la contracción de solidificación, así como la porosidad.
- Evitar turbulencias y llenados agresivos durante la colada.
- Sopletear granos de arena sueltos antes de cerrar los moldes de arena verde y fundirlos.
- No mover el molde cerámico y de arena después de la colada. Debe dar el tiempo suficiente para que el metal solidifique y se enfríe. Hay que considerar que mientras mayor fue la temperatura del metal fundido, el metal requiere mayor tiempo para poder solidificar.
- Revisar la composición y evitar concentraciones altas de elementos oxidables (Mg, Al, Ti, Zn, etc.).
- Controlar en el área las fuentes que aportan los elementos capaces de formar gases: nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y monóxido de carbono.

La principal fuente de nitrógeno en las empresas de fundición se debe a la utilización de chatarras de acero, los cuales son usados en las cargas como constituyente mayoritario y

---

son introducidos en los hornos de fusión. También puede ser causado por la falta de regeneración de la arena reutilizada en el proceso y la presencia de determinados elementos aleantes [36]. Figura 49

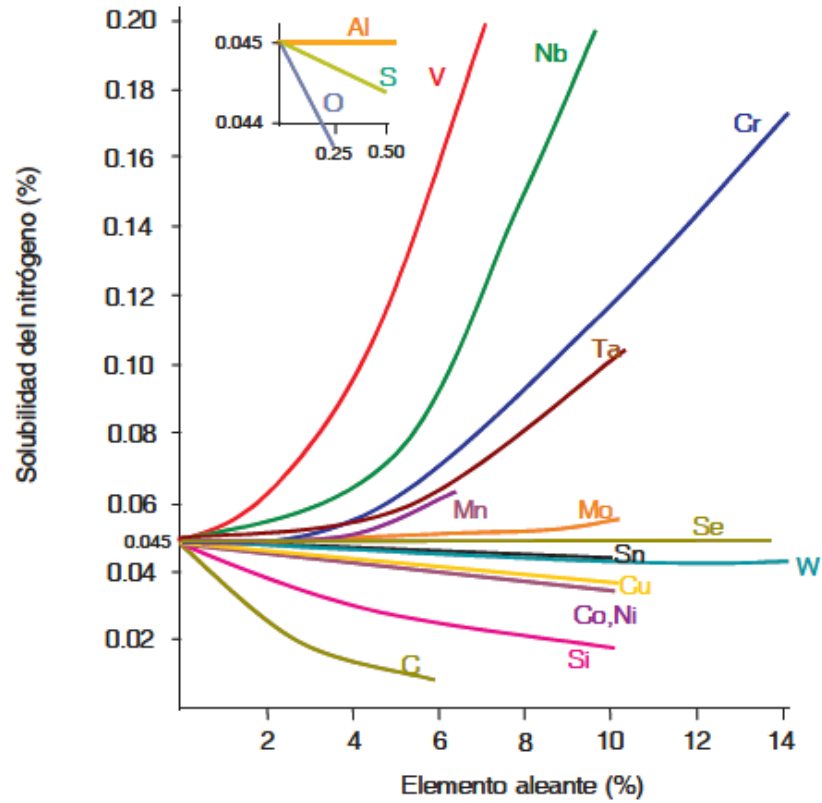


Figura 49. Solubilidad del nitrógeno en función de los elementos aleantes

---

### **3.3.5.2 Mejora en la desgasificación**

En la empresa se utiliza el gas inerte nitrógeno para desgasificar. Este es inyectado dentro del metal fundido por medio de una lanza que forma burbujas en el interior del metal fundido. Sin embargo, el método de desgasificado puede ser mejorado siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Utilizar varias lanzas con un sistema rotatorio o moverlas para abarcar todo el volumen. La desgasificación rotatoria es eficaz para eliminar el hidrógeno, pero no para eliminar las bipelículas de óxido. Sin embargo, implementando la tecnología adecuada, que genere velocidades más altas sin causar turbulencias en la superficie pueden eliminarse ambos [75].  
Complementar el proceso con fundentes es otra opción para mejorar la limpieza y evitar óxidos.
- Utilizar un pequeño tamaño de las burbujas del gas inerte con una larga duración en el metal fundido asegura abarcar una gran superficie de contacto. Además, es más rápido que con un tamaño de burbuja grande.
- Verificar que el suministro de burbuja sea el suficiente.
- Introducir una alternativa de gas inerte, como el argón. Ya que se cree que el nitrógeno puede deteriorar la limpieza del metal [76].
- Debido a que los sistemas de desgasificación tradicionales limitan la mezcla, especialmente en el fondo. Es recomendable hacer hincapié y atender esa zona descuidada.
- Utilizar en la desgasificación compuestos químicos, pero también ultrasonidos, infrasonidos y campos magnéticos, así como baja y alta presión [77].

---

## Conclusiones

La empresa de fundición es vulnerable a varios defectos de fundición, debido a que existen problemas asociados en cada una de las etapas del proceso de cera pérdida y arena verde, que hacen que cada etapa subsecuente arrastre o agrave el problema.

Del análisis del proceso se hizo el diagnóstico, la identificación, clasificación de las variables y problemas que originan defectos. Esto permitió resaltar los orígenes, variables y parámetros más críticos que afectan el proceso.

Los materiales ocupados (cera, cerámicos, arena) son los principales parámetros que cuidar, junto con las correctas prácticas y condiciones de fundición; para garantizar la calidad de producto de fundición. Esto se debe a que los materiales están vinculados en cada etapa y al no tener condiciones específicas, presentan propiedades inadecuadas que condicionan y comprometen la producción.

Las recomendaciones dadas, además de llevar a una reducción de los defectos de fundición, pueden ayudar a disminuir los costes de producción por pérdidas y rechazos, así como aumentar el rendimiento y productividad de la empresa.

Implementar un riguroso sistema de inspección, control de calidad y capacitación en la empresa es fundamental para garantizar la calidad del producto, debido a que hay parámetros críticos en el proceso que no se están estandarizando.

La implementación de diversos equipos e instrumentos tecnológicos en la empresa son necesarios, para tener un control de las propiedades de los diversos materiales utilizados.

---

## Bibliografía

- [1] T.S. Prasanna Kumar, 5.12 - Casting Simulation Methods, in: S. Hashmi, G.F. Batalha, C.J. Van Tyne, B. Yilbas (Eds.) *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier, Oxford, 2014, pp. 235-257.
- [2] J. Madan, P.P. Singh, Chapter 2 - Sustainability in foundry and metal casting industry, in: R.G. Narayanan, J.S. Gunasekera (Eds.) *Sustainable Manufacturing Processes*, Academic Press, 2023, pp. 29-52.
- [3] B. Chandra Kandpal, et al., Experimental study of foundry defects in aluminium castings for quality improvement of casting, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021) 10702-10706.
- [4] F.R. Morral, E. Jimeno, P. Molera, *Metalurgia general. Volumen I*, Editorial Reverte, 1982.
- [5] J. Newell, *Ciencia de materiales-aplicaciones en ingeniería*, Primera edición ed., Alfaomega Grupo Editor, D. F., México, 2010.
- [6] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, Tercera edición ed., Mc Graw Hill, D. F., México, 2007.
- [7] I. Montero, *Los metales en la antigüedad*, Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2014.
- [8] P. Molera Solá, *Conformación metálica*, Marcombo, Barcelona, España, 2009.
- [9] P. Scallan, 4 - Material evaluation and process selection, in: P. Scallan (Ed.) *Process Planning*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003, pp. 109-170.
- [10] N. Titov, I.A. Stepanov, D. Okulik, *Tecnología del proceso de fundición*, Editorial Mir, Moscú, Rusia, 1981.
- [11] C.S. Calvo, Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas, *Scientia*, 17 (2016).
- [12] A.E.W. Jarfors, S. Seifeddine, Metal Casting, in: A.Y.C. Nee (Ed.) *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer London, London, 2015, pp. 309-410.
- [13] H. Mosquera M, *Fundición de precisión, Ingeniería e Investigación*, 0 (1991) 33-38.
- [14] M.J.Z. Cuenca, D.V. Moscardó, J.F.G. de Albacete, I.M. Pérez, *Fundición a la cera perdida con molde de cascarilla cerámica. Publicación docente*, Universidad Miguel Hernández, Elche, España, 2019.
- [15] M.d.C. Marcos, 2020, *Fundición a la cera perdida: técnica de la cascarilla cerámica*, Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [16] V.N. Kaila, I.B. Dave, The influence of coating sand materials on shell mold properties of Investment casting process, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021) 800-804.
- [17] S. Pattnaik, An investigation on enhancing ceramic shell properties using naturally available additives, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (2017) 3061-3078.
- [18] S. Kumar, D.B. Karunakar, Characterization and Properties of Ceramic Shells in Investment Casting Process, *International Journal of Metalcasting*, 15 (2021) 98-107.
- [19] J. Suárez, J. Sertucha, Materiales inorgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición, *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 3 (2005) 17-27.
- [20] R. Bisbal, F. Gómez, C. Di Yorío, M. Pérez, Evaluación de las características y propiedades de fundición de Arena de Olivino Venezolana (Parte I), *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 30 (2015) 95-110.
- [21] F. Morral, E. Jimeno, *Metalurgia general. Tomo II*, Editorial Reverte, 1985.

- 
- [22] S.M. Strobl, Fundamentos en la preparación y control de la arena verde, in: Modern Casting/FundiExpo, Illinois, U. S., 2000, pp. 8.
- [23] M. Holtzer, A. Kmita, Green Sands, in: M. Holtzer, A. Kmita (Eds.) Mold and Core Sands in Metalcasting: Chemistry and Ecology : Sustainable Development, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 243-276.
- [24] S. Ravi, V. LaFay, J. Thiel, Evaluation of Physical, Performance and Emission Characteristics of Green Sand, International Journal of Metalcasting, 13 (2019) 528-535.
- [25] A. Sütőová, M. Grzincic, Creation of Defects Catalogue for Nonconforming Product Identification in the Foundry Organization, Quality Innovation Prosperity, 17 (2013) 52-58.
- [26] A.W. Kawale, G. Gupta, Rejection: Major Concern for a Cast Iron Foundry, in: P.K. Kapur, G. Singh, S. Panwar (Eds.) Advances in Interdisciplinary Research in Engineering and Business Management, Springer Nature Singapore, Singapore, 2021, pp. 131-141.
- [27] J. Sertucha, J. Lacaze, Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons&mdash;An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons, in: Metals, 2022.
- [28] J. Madias, E. Varela, H. Reggiardo, Equilibrio entre el acero y las inclusiones no metálicas, I Jornadas Argentinas de Ciencia de los Materiales, Mar del Plata, Argentina, 1991.
- [29] R.T. Patil, V.S. Metri, S.S. Tambore, Causes of casting defects with remedies, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 4 (2015) 639-644.
- [30] J. Markee, et al., Atlas of Casting Defects, I.C. Institute, Nueva Jersey, U. S., 2017, 1-61.
- [31] R. Randolph, 2023, Inclusions (Ceramic), <https://www.ransom-randolph.com/inclusions-ceramic>.
- [32] C. Chelladurai, N.S. Mohan, D. Hariharashayee, S. Manikandan, P. Sivaperumal, Analyzing the casting defects in small scale casting industry, Materials Today: Proceedings, 37 (2021) 386-394.
- [33] Tecnofund, Defectos en piezas fundidas causados por arenas de moldeo y los ensayos laboratoriales para auxiliar en las soluciones, TT-001E, Minas Gerais, Brasil, 2020, 1-53.
- [34] N. Kumar, C.B. Besant, M. Ristic, Process variables determining the dimensional and metallurgical properties of directionally solidified, cored turbine blades produced by investment casting of super-alloys, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3 (1988) 3-19.
- [35] R. Monroe, Porosity in castings, AFS Transactions, 113 (2005) 519-546.
- [36] A.R. Loizaga, J. Sertucha, R. Suárez, Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido, Anales de la Real Sociedad Española de Química, 104 (2008) 111-119.
- [37] I.O. Leushin, V.A. Ul'yanov, L.I. Leushina, Predicting gas-defect formation on changing the investment-casting technology, Steel in Translation, 43 (2013) 681-683.
- [38] U.S. Navy, Foundry Manual, U.S. Government Printing Office, Washington D. C. , U. S., 1958.
- [39] H.E. Jaramillo Suárez, N.C. Alba de Sánchez, J.P. Canizales, Á.J. Toro, Introducción a la mecánica de la fractura y análisis de falla, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 2008.
- [40] Z. Stradomski, G. Stradomski, S. Stachura, Fracture Mechanisms in Steel Castings, Archives of Foundry Engineering, (2013).
- [41] D.S. Bhiogade, S.M. Randiwe, A.M. Kuthe, Case study and critical analysis of cracks in Cast Iron and Austenitic Steel during casting, in: 66 th Indian Foundry Congress, Gandhinagar, India, 2018.
- [42] A. Juriani, Casting defects analysis in foundry and their remedial measures with industrial case studies, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 12 (2015) 43-54.
-

- 
- [43] I.O.f. Standardization, ISO 11971: 2020 Steel and iron castings — Visual testing of surface quality, in, 2020.
- [44] K.A. Guler, Investigation of surface roughness of aluminium solid mould investment castings, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 54 (2013) 480-483.
- [45] P. Kumar, I.S. Ahuja, R. Singh, Effect of process parameters on surface roughness of hybrid investment casting, *Progress in Additive Manufacturing*, 1 (2016) 45-53.
- [46] M. Ziaulhaq, S. Alam, M.T. Jamali, Study of Process Parameters Effect on Surface Finish in Al-Alloy Sand Casting by Using Taguchi Method, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2 (2013) 1521-1526.
- [47] S.M.H. Mirbagheri, M. Dadashzadeh, S. Serajzadeh, A.K. Taheri, P. Davami, Modeling the effect of mould wall roughness on the melt flow simulation in casting process, *Applied Mathematical Modelling*, 28 (2004) 933-956.
- [48] E. Fiorese, F. Bonollo, G. Timelli, L. Arnberg, E. Gariboldi, New Classification of Defects and Imperfections for Aluminum Alloy Castings, *International Journal of Metalcasting*, 9 (2015) 55-66.
- [49] T.I.o.B. Foundymen, Atlas de defectos en las piezas fundidas (Atlas of defects in castings), Editecna (Ediciones Técnicas), Madrid, España, 1951.
- [50] S. Chakravorty, The Properties of Waxes Used in the Investment Casting Industry: Final Report, NPL Report, (1999).
- [51] J.W.M. Portillo, Obtención de ceras para el proceso de fundición a la cera pérdida, *Ingeniería e Investigación*, (1993) 26-33.
- [52] A.I.H. Committee, ASM Handbook: Volume 15: Casting, ASM International, U. S., 2008.
- [53] P. Wawulska-Marek, et al., A Study on Technological Properties of Investment Casting Waxes, in: ISAPS'15, Nara, Japón, 2015.
- [54] P. Sharma, D. Kasana, V. Kumar, C. Goel, Analysis the properties of lost wax process and Its use ability exploring possibilities, *International Journal of Engineering Science Invention*, 2 (2013) 32-35.
- [55] K. Lee, G. Dooley, H. Pickard, 2023, Wax on Wax off – Part 1 – De-waxing the shell, <https://www.remet.com/en/insights/wax-on-wax-off-part-1-shell-de-waxing/>.
- [56] E. Barati, J. Akbari, The effect of injection parameters on dimensional accuracy of wax patterns for investment casting, *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, 9 (2020) 313-322.
- [57] R. Gallaghere, et al., Atlas of Wax Pattern Defects, I.C. Institute, Nueva Jersey, U. S., 2019,
- [58] M.-G. Kim, S.-Y. Sung, Y.-J. Kim, Microstructure, metal-mold reaction and fluidity of investment cast-TiAl alloys, *Materials Transactions*, 45 (2004) 536-541.
- [59] R. Prasad, Progress in Investment Castings, in: S. Malur (Ed.) Science and Technology of Casting Processes, IntechOpen, Rijeka, 2012, pp. Ch. 2.
- [60] K. Tamta, U. Wankhede, D.B. Karunakar, Investigations on Modification of Binder System in Investment Casting, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5 (2016) 122-124.
- [61] S. Pattnaik, Influence of sawdust on the properties of the ceramic shell used in investment casting process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93 (2017) 691-707.
- [62] J. Jackson, et al., Atlas of Shell Defects, I.C. Institute, Nueva Jersey, U. S., 2004, 1-28.
-

- 
- [63] J. Cervantes-Martínez, R. Orihuela-Equihua, J.G. Rutiaga-Quiñones, Acerca del Desarrollo y Control de Microorganismos en la Fabricación de Papel, *Conciencia Tecnológica*, (2017) 54-58.
- [64] R. Randolph, 2023, Eradicate and Prevent Bacteria, [https://www.ransom-randolph.com/files/ugd/cc5f22\\_b63504d33f4b488aa91db0dcb753fcdf.pdf](https://www.ransom-randolph.com/files/ugd/cc5f22_b63504d33f4b488aa91db0dcb753fcdf.pdf).
- [65] B. Brown, 2023, Investment Casting Hygiene: Its a Bugs Life!: Part 2, <https://www.remet.com/en/insights/investment-casting-hygiene-part-2/>.
- [66] J. Markee, 2023, Addressing Bacteria in Investment Casting Slurries, <https://www.linkedin.com/pulse/addressing-bacteria-investment-casting-slurries-julie-markee>.
- [67] M. Noguez, I. Beltrán, T. Robert, G. Salas, J. Ramírez, Influencia de la formulación de la arena en verde en su difusividad térmica y su efecto en una pieza colada, *Revista de Metalurgia*, 41 (2005) 143-147.
- [68] A. Azhar, H. Hazril, M. Redzuan, The Effect of Sand Grain Size and Water on The Green Compression Strength for Greensand Casting Mould Mixture, *Jurnal Kejuruteraan*, 34 (2022) 149-153.
- [69] S.M. Strobl, D.V. Silsby, Controlling hot sand to ensure mold, costing quality, *Modern Casting*, 91 (2001) 42-44.
- [70] J.C. Ordinola Castillo, 2011, Caracterización de las tierras de moldeo de El Porvenir de la provincia de Sullana, Tesis de grado. Universidad de Piura.
- [71] F.O. Edoziuno, R.O. Akaluzia, B.U. Odoni, C.C. Nwaeju, Effect of base sand particle size on the properties of synthetic moulding sand, *International Journal of Research in Engineering Innovation*, 1 (2017) 226-230.
- [72] R. Ajay, S. Lovneesh, Experimental Study on Effect of Sand Grain Size and Heat Dissipation on the Properties of Moulding Sand, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110 (2023) 012078.
- [73] W. Davies, *Foundry sand control : testing, research and development / by W. Davies*, United Steel Co, Sheffield, Inglaterra, 1950.
- [74] C.T. Marek, *Fundamentals in the Production and Design of Castings*, John Wiley & Sons, New York, U. S., 1950.
- [75] J. Lazaro-Nebreda, J.B. Patel, Z. Fan, Improved degassing efficiency and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings by high shear melt conditioning (HSMC) technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 294 (2021) 117146.
- [76] É. Tremblay, B. Maltais, The Use of Nitrogen to Degas Molten Aluminium—Comparison of Metallurgical Results with Argon and Nitrogen Used in an ACDtm, in: A.P. Ratvik (Ed.) *Light Metals 2017*, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 1475-1480.
- [77] G. Gumienny, et al., Effect of Degassing Parameters on Mechanical Properties of EN AC-46000 Gravity Die Castings, in: *Materials*, 2022.