



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS
CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS EN EL CONTROL
DE LOS DEFECTOS DE FUNDICIÓN DE LAS CAMISAS
DE HIERRO FUNDIDO DE LA EMPRESA COMETA GL
S.A.S.**

César Elías Suárez Mercado

Universidad de Antioquia

**Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería
Metalúrgica y de Materiales**

Medellín, Colombia

2019





**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS
CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS EN EL
CONTROL DE LOS DEFECTOS DE FUNDICIÓN
DE LAS CAMISAS DE HIERRO FUNDIDO DE LA
EMPRESA COMETA GL S.A.S.**



INFORME DE PRÁCTICAS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MATERIALES

CÉSAR ELIAS SUÁREZ MERCADO

RICARDO EMILIO ARISTIZÁBAL SIERRA, PhD

PROFESOR DE INGENIERÍA DE MATERIALES

ASESOR INTERNO

CARLOS HUMBERTO NAVARRO MESA

INGENIERO DE MATERIALES

ASESOR EXTERNO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

MEDELLÍN

2019

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a Dios por permitirme estar en donde estoy, a toda mi familia en especial a mis padres Elías José y Teresita por su apoyo incondicional. A la Universidad de Antioquia, por las buenas bases académicas brindadas, las cuales me permitieron tener un buen desempeño en el transcurso de mis prácticas industriales.

A la empresa COMETA GL S.A.S y a sus gerentes por darme la oportunidad de poder ejercer mis prácticas en estas instalaciones. Mi más profundo agradecimiento al profesor y asesor académico Ricardo Aristizábal por su apoyo y asesoría en todo lo largo de este trabajo y los anteriores.

A mis compañeros académicos James, Daniel, Jonatán, Cristian, Rafa y aquellos amigos que siempre estuvieron pendientes de mi formación, como Mayra, Manuel, Lina y Yeyé.

A Wendy Paola por todo su apoyo, y por ser esa persona que confió en mí, y que siempre estuvo ahí para aconsejarme y brindarme las mejores palabras de aliento.

Al ingeniero, compañero y asesor externo Carlos Navarro por su colaboración para este trabajo, a los compañeros de trabajo Wilches, Gabriel, Blanca, Eliana, David y a todos los operarios, sin duda aprendí mucho de ellos; cabe resaltar el agradecimiento incondicional al compañero Faver Ortiz, por su apoyo y sus aportes en todo el tiempo de prácticas.

TABLA DE CONTENIDO.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Objetivo general	10
2.2	Objetivos específicos.....	10
3	RESEÑA HISTORICA	11
4	MARCO TEÓRICO	12
4.1	Fundiciones	12
4.2	Clasificación de las fundiciones	14
4.3	Generalidades de las fundiciones grises.....	15
4.3.1	Clasificación de los hierros grises	17
4.3.2	Clasificación de los hierros grises según su distribución y tamaño del grafito.....	18
4.4	Efecto de los elementos aleantes en los hierros grises.	19
4.4.1	Carbono.....	19
4.4.2	Silicio	20
4.4.3	Manganeso	20
4.4.4	Azufre.....	21
4.4.5	Fosforo	21
4.4.6	Elementos trazas	22
4.5	Proceso de inoculación	22
4.5.1	Efectos de los elementos del inoculante en el hierro gris.....	23
4.5.2	Propósito de la inoculación.....	24
4.6	Fundición centrifuga.....	26
4.7	Defectos de fundición.....	27
5	METODOLOGÍA	31
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
6.1	Clasificación y características de los defectos de la empresa COMETA GL S.A.S	34
6.2	Seguimiento del producto no conforme	36
6.3	Acciones correctivas	38
6.3.1	Validación del proceso de inoculación.....	38

6.3.2	Resultados de composición química para la validación del proceso de inoculación.....	41
6.3.3	Ensayo Dureza.....	41
6.3.4	Ensayo de chill o profundidad de temple.	44
6.3.5	Resultados metalográficos	46
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
8	BIBLIOGRAFÍA.	56
9	ANEXOS	58
9.1	Anexo 1: Teorías enmarcadas en el control de la humedad y las bombas del proceso de fundición.....	58

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los hierros según la norma ASTM A48[5][7].....	17
Tabla 2: Tamaño y clase de grafito según la norma ASTM A247.....	19
Tabla 3: Efecto de los elementos trazas en los hierros grises.....	22
Tabla 4: Nombre y clasificación de los defectos presentados en la empresa COMETA GL S.A.S.....	34
Tabla 5: Características de los defectos de fundición.....	35
Tabla 6: Composición química de los inoculantes.....	39
Tabla 7: Composición química de las coladas para la selección de las muestras.....	41
Tabla 8: Resultado de la OES de la col.1.....	41
Tabla 9: Resultados de las mediciones de la dureza.....	42
Tabla 10: Composición química de los materiales utilizados en la preparación de la pintura.....	61

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Camisa incorporada en el cuerpo del motor[1].....	8
Figura 2: Diagrama Hierro-Carbono[4][5].....	13
Figura 3: Esquema sobre la obtención de las diferentes familias de fundiciones[3].....	14
Figura 4: Clasificación del grafito según la norma ASTM A247[3][5][8]	18
Figura 5: Esquema de la cuña y formación del chill en las fundiciones[11].....	25
Figura 6: Dimensiones de los diferentes tipos de cuña según la norma ASTM A367-11 .	26
Figura 7: Porcentajes de no conformidad total (mecanizado y fundición) con respecto al tiempo.	37
Figura 8: Comportamiento de los principales defectos reportados en la planta con el transcurrir del tiempo	37
Figura 9: Bosquejo del barrido utilizado para la medición de la dureza .	42
Figura 10: Dureza promedio en HRB, con su respectiva desviación.	43
Figura 11: Conversión de la dureza Rockwell B a Dureza Brinell.....	43
Figura 12: Variación del chill según las metodología de trabajo. (A) Inoculación con 0.1%, (B) inoculación con 0.3%.....	45
Figura 13: Microestructura de las muestra en la zona superior (contacto con el molde) a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. (a) AS-CAST, (b) IM-43, (c) IM-22.....	46
Figura 14: Finalización de la zona dendrítica e inicio de la nucleación del grafito después del sobreenfriamiento generado por el contacto con el molde. Muestra IM-22 sin ataque metalográfico a 50X.	47
Figura 15: Microestructura de las muestra en la zona central a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. (a) AS-CAST, (b) IM-43, (c) IM-22.....	48
Figura 16: Microestructura de las muestra en la zona interna a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22.....	49
Figura 17: Microestructura de las muestra en la zona central a 100X. Probetas con ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22.....	50
Figura 18: Microestructura de las muestra en la zona central a 500X. Probetas con ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22.....	51
Figura 19: Camisa porosa encontrada en el proceso de mecanizado...	58
Figura 20: Las bombas, en forma de rosetas y ampollas.....	59
Figura 21: Cavidades generadas en el interior del producto	60

1 INTRODUCCIÓN

Las camisas de hierro fundidas, son cilindros que van incorporados en el cuerpo de los motores (Ver figura 1) y son las encargadas de prevenir el daño de los componentes internos de éste, ya que debido a las propiedades del material permite controlar las altas temperaturas generadas por la combustión y la fricción ocasionadas por los movimientos constante de los pistones; adicional a esto este material debe poseer una alta resistencia al desgaste, ya que está continuamente sometido a los movimientos cíclicos de los pistones.

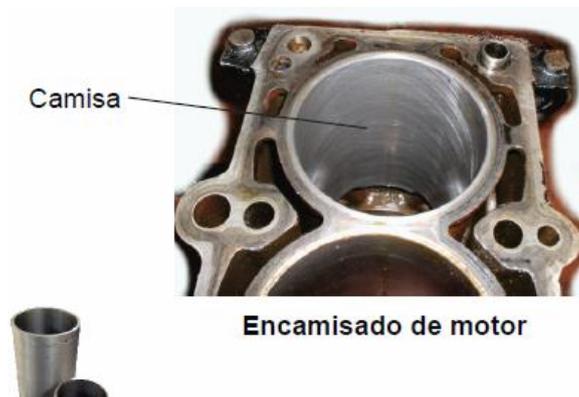


Figura 1: Camisa incorporada en el cuerpo del motor[1].

Estos productos se obtienen por el método de centrifugación, lo cual permite obtener piezas simétricas y uniformes, su diámetro y espesor de pared varían según su requerimiento. Es importante aclarar que existen diferentes variables a controlar para obtener un producto de buena calidad y que esté cobijado con las normas respectivas para su posterior comercialización y distribución.

La empresa COMETA GL S.A.S se encarga de la fabricación y comercialización de camisas centrifugadas de hierro gris; en los últimos años ha estado enmarcada en mejorar la calidad y evitar irregularidades

en el proceso que atenten contra las propiedades del producto y generen la insatisfacción del cliente, por tal motivo se le apuntó a desarrollar metodologías internas de trabajo con las cuales se pueda monitorear todo el proceso desde la obtención de las camisas fundidas hasta el proceso de mecanizado.

Los principales inconvenientes en la producción de camisas de hierro fundido son los defectos encontrados en toda la línea de producción, para esto se implementaron ciertas metodologías de trabajo para la verificación y control de dichos defectos.

Los defectos de fundición como se mencionó anteriormente son la principal causa de rechazo del producto, por esta razón se implementó un seguimiento constante al producto rechazado en los procesos de mecanizado, para evidenciar las principales causas de rechazo del producto; y evidenciar los defectos y como poder prevenirlos, adicional a esto se realizaron retroalimentaciones a los operarios para que tengan el mismo criterio a la hora de rechazar un producto defectuoso.

Este proyecto se basó en implementar procedimientos que permitieran identificar, controlar y evitar los defectos en la producción de las camisas de hierro fundido, en donde se partió de una clasificación y caracterización de los mismos con miras a mejoras basadas en retroalimentaciones oportunas y asertivas a todo nivel del proceso productivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Implementar técnicas y procesos para identificar, caracterizar y controlar los defectos de las camisas de hierro fundido de la empresa *COMETA GL SAS*.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales defectos de fundición de las camisas centrifugadas de hierro fundido.
- Estudiar y analizar los factores causantes de los defectos en las camisas centrifugadas de hierro fundido.
- Establecer si existe alguna relación de los defectos producidos en fundición con el método de trabajo.

3 RESEÑA HISTORICA

La empresa COMETA GL S.A.S, es una industria metalmeccánica que fue fundada en el año 1.986 por los señores Oscar López Rodas y otros, con el propósito de producir cilindros centrifugados para motores (camisas); actualmente producen una amplia gama de referencias en cilindros centrifugados para motores a gasolina y a diésel.

En la actualidad es una de las líderes del mercado nacional y tiene un importante posicionamiento en países tales como Ecuador, Perú y Venezuela y ha empezado a penetrar en mercados tales como Panamá, Guatemala, Costa Rica y Chile. La empresa proyecta ser la mejor opción del mercado para las rectificadoras de motores y el sector de reposición de autopartes en Colombia.

Las camisas centrifugadas son fabricadas en hierro gris de grafito laminar por el método de fundición centrifugada, con hierro obtenido de un horno de cubilote mediante el proceso de colada continua.

4 MARCO TEÓRICO

Se ofrece a continuación una base teórica correspondiente al problema planteado. Esta sección refiere una breve introducción acerca de las fundiciones y los tipos de fundiciones; y se enfoca especialmente en las fundiciones grises, que es el material de fabricación de las camisas y principal objeto de estudio para este trabajo. También hace referencia a la metodología y proceso fundamental empleada para la obtención del producto; el último punto del marco teórico, se refiere a los defectos que se pueden encontrar con la metodología de trabajo empleada.

4.1 Fundiciones o hierros fundidos

Las fundiciones tienen un amplio campo de aplicaciones debido a su facilidad de fabricación y bajo costo de producción en relación a otros materiales tradicionales como el acero, haciendo que el espectro de aplicaciones vaya en crecimiento en función al continuo mejoramiento de sus propiedades mecánicas[2].

Se denominan fundición o hierro fundido a una muy extensa familia de materiales féreos cuya característica común es que terminan su proceso de solidificación con la reacción eutéctica del diagrama hierro-carbono[3]. Los hierros fundidos pueden solidificar de acuerdo al sistema termodinámicamente estable, Fe-Grafito (Línea continua) o al metaestable, Fe-Fe₃C (Línea punteada), como puede observarse en la figura 2 [4].

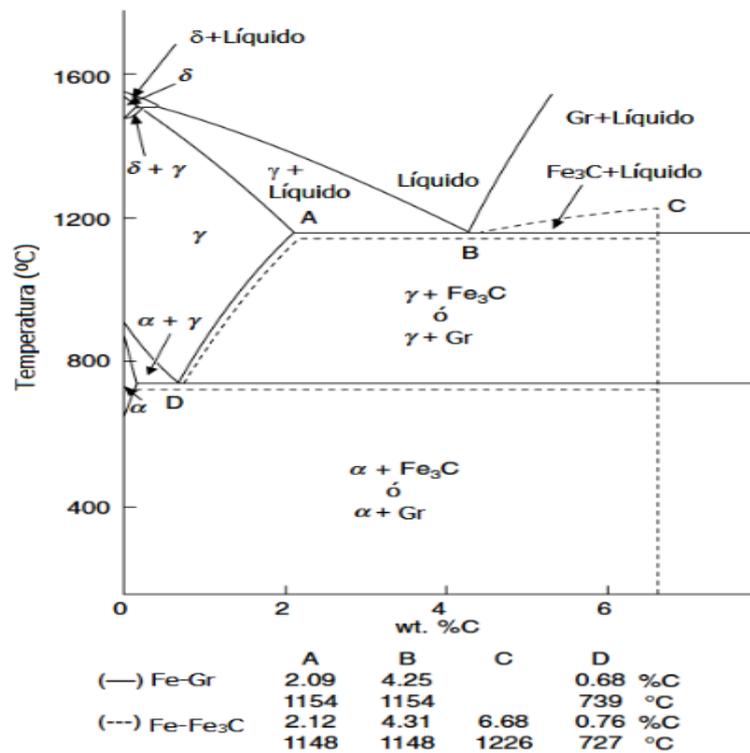


Figura 2: Diagrama Hierro-Carbono[4][5].

De acuerdo con el diagrama anterior las fundiciones son aleaciones con contenido en carbono mayor de 2%, aunque también se pueden presentar fundiciones con contenido de carbono por debajo de este, esto puede deberse a algunos elementos de aleación (fundiciones aleadas) en donde estos modifican la máxima solubilidad del carbono en la austenita[3][4].

Cuando la fundición sigue el camino metaestable la fase rica en carbono del constituyente eutéctico es cementita (Fe_3C), mientras que cuando sigue el camino estable el eutéctico es austenita + grafito. Se distinguen de este modo las fundiciones blancas (Diagrama metaestable), fundiciones grises (Diagrama estable) y fundiciones atruchadas (siguen ambos diagramas simultáneamente, formándose en el curso de su solidificación tanto cementita como grafito). Del mismo modo en el enfriamiento posterior a la solidificación la austenita eutectoide puede

transformarse en perlita (diagrama metaestable) o en ferrita + grafito (Diagrama estable)[3][4].

Existe una última familia de fundiciones que se obtienen al tratar térmicamente una fundición blanca con objeto de transformar la cementita en grafito, estas fundiciones se conocen como maleables[3].

En la figura 3 se muestra un esquema, de los caminos seguidos para la obtención de cada uno de los diferentes tipos de fundiciones

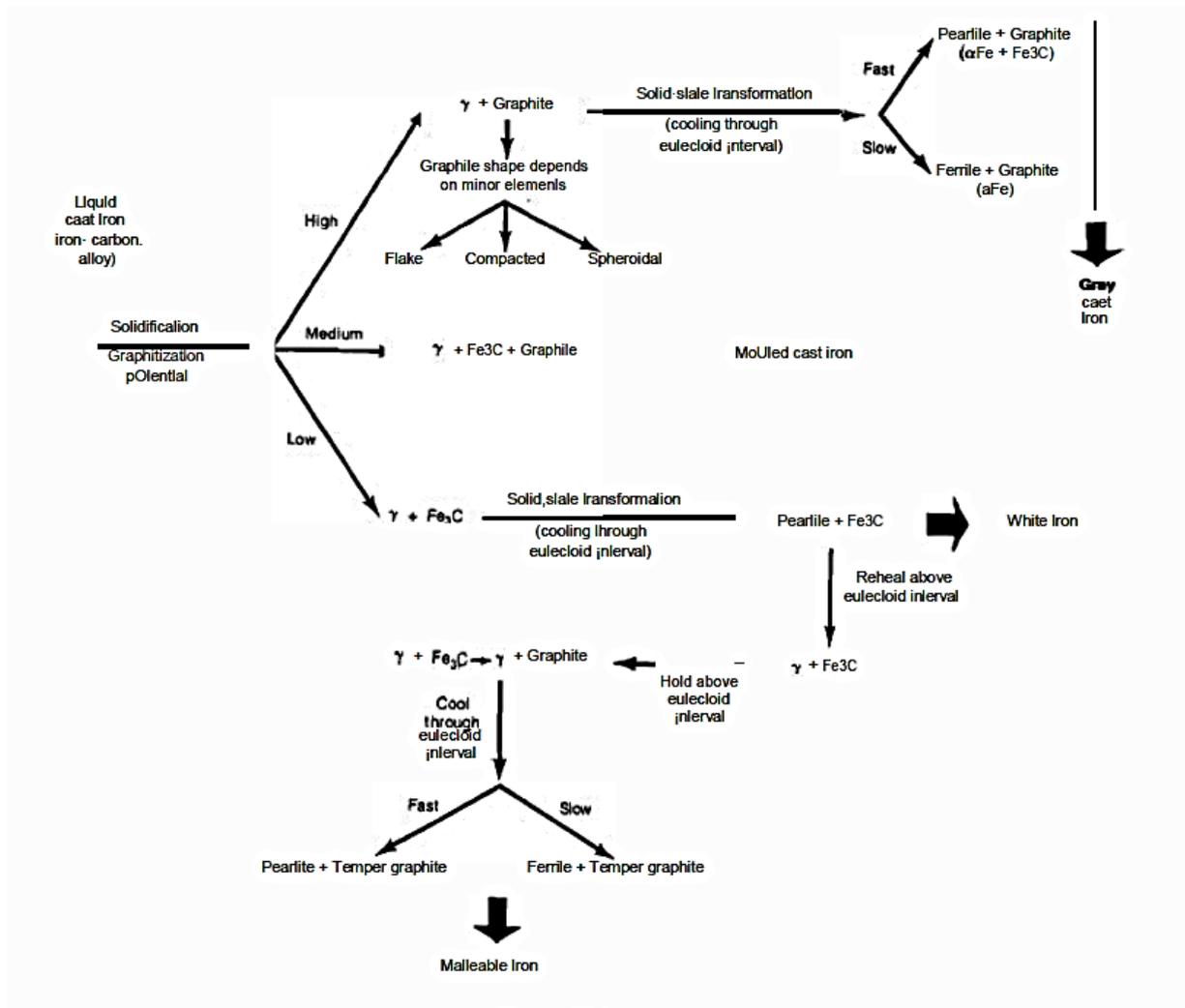


Figura 3: Esquema sobre la obtención de las diferentes familias de fundiciones[3].

4.2 Clasificación de las fundiciones

En el transcurso de la historia se han encontrado diferentes formas de clasificar las fundiciones, inicialmente la clasificación de los hierros

fundidos se basó en su superficie de fractura, en donde dos tipos de fundiciones fueron reconocidas, la fundición gris y la fundición blanca. Con base a que fueron surgiendo nuevas metodologías de análisis metalúrgicos y metalográficos, una segunda clasificación ha podido realizarse con base en la microestructura la cual se basa en:

- **Forma del grafito:** grafito laminar (hojuelas), grafito esferoidal (nódulos), grafito compacto (vermicular) y grafito de revenido, resultado de una reacción en estado sólido (tratamiento térmico de maleabilización).
- **Matriz:** ferrítica, perlítica, austenítica, martensítica, ausferrítica (austemperada)[4][5].

4.3 Generalidades de las fundiciones grises

La fundición gris o hierro gris es empleada tradicionalmente en muchas aplicaciones industriales, debido a su flexibilidad de uso, fácil procesamiento, bajo costo (20-40% menor que el acero) y una amplia gama de propiedades mecánicas y térmicas; por esto es uno de los materiales más empleado a nivel mundial[4][6].

Las propiedades mecánicas y el desempeño de estas fundiciones, están principalmente influenciadas por sus características microestructurales, que a su vez dependen de la composición química y del proceso realizado para la obtención de este. El hierro gris es una aleación de hierro, carbono, silicio y manganeso principalmente, cuya composición varía entre 2,5-4,0% de carbono y 1,0-3,0% de silicio y el 0,4-1,0% de manganeso, también posee elementos trazas como el fósforo y el azufre. Las reacciones químicas internas derivan en la formación de hojuelas de grafito (láminas) distribuidas a todo lo largo del producto fundido,

dependiendo el proceso de solidificación pueden obtenerse una matriz ferrítica, perlítica o combinaciones de ambas [4][5].

En general, el hierro gris con matriz perlítica se usa cuando se requieren altos módulos de elasticidad, buena resistencia al desgaste y buena superficie de acabado. Si se requiere una buena maquinabilidad, resistencia al choque térmico, alta capacidad de amortiguación y capacidad de ser moldeado en secciones delgadas, es preferible un hierro gris con una matriz ferrítica[6].

Una característica especial de las fundiciones grises es que posee baja contracción al pasar del estado líquido al sólido en comparación con otras aleaciones férricas, por lo cual se pueden fabricar piezas grandes con alta estabilidad dimensional. De la misma manera, la cantidad de poros dentro del material es baja comparada con otro tipo de aleaciones, esto va a depender mucho de la manera de trabajo[4][5]. Debido a sus propiedades, las fundiciones grises son empleadas principalmente en bloques de cilindro para motores, en discos de frenos, campanas de frenos, también es muy usado en la industria textil, agrícola como base de maquinaria pesada, herramientas, bastidores entre otras aplicaciones.

El aumento en el contenido de carbono y de silicio aumenta el potencial de grafitización del hierro, así como su capacidad de moldeo, y tiene una gran incidencia en la microestructura y las propiedades mecánicas de la fundición gris y por esto se debe tener un control en la cantidad de estos dos elementos[4][5]. Adicional a esto, disminuye la tendencia a la formación de *chill* (temple), y tiene una influencia negativa en la resistencia a la tracción, debido al aumento de la ferrita, el

engrosamiento de la perlita y el aumento en la fracción de grafito en la microestructura [5]. Por este motivo se utiliza la relación de carbono equivalente (CE) de acuerdo a la ecuación 1, cuando se tienen cantidades apreciables de fósforo se utiliza la ecuación 2

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} \quad \text{Ec.1}$$

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad \text{Ec.2}$$

El carbono equivalente indica cuanto más cerca o lejos se está del eutéctico, por ejemplo: cuando se tiene un carbono equivalente de 4.3 se está en el eutéctico, cuando se tienen valores menores se dice que el hierro es hipoeutéctico y valores mayores indican hierros hipereutécticos[5].

4.3.1 Clasificación de los hierros grises

La clasificación de los hierros grises se hace según la norma ASTM A48[7], la cual clasifica las aleaciones según su resistencia a la tracción y sugiere los intervalos de composición química para el carbono y el silicio[4][5][7]. En la tabla 1 se muestra la clasificación según la norma ASTM A48.

Tabla 1: Clasificación de los hierros según la norma ASTM A48[5][7].

clase	Carbono (% en peso)	Silicio (% en peso)	CE
Clase 20	3,40 - 3,60	2,30 - 2,50	4,2 - 4,4
Clase 30	3,10 - 3,30	2,10 - 2,30	3,8 - 4,1

Clase 40	2,95 – 3,15	1,70 – 2,00	3,5 – 3,8
Clase 50	2,70 – 3,00	1,70 – 2,00	3,3 – 3,7
Clase 60	2,50 – 2,85	1,90 – 2,10	3,1 – 3,6

Esta clasificación no tiene en cuenta otras propiedades como la dureza y el tipo de grafito. Por ello se toma como una clasificación general[7].

4.3.2 Clasificación de los hierros grises según su distribución y tamaño del grafito

El grafito presente en las fundiciones grises funciona como autolubricante lo que le brinda una excelente maquinabilidad y buena resistencia al desgaste. Posee baja ductilidad y tenacidad, tiene buena capacidad de absorber trabajo en el régimen elástico (alta resiliencia), alta capacidad de amortiguamiento y excelente conductividad térmica [4][5]. Por lo dicho anteriormente también es posible clasificar los hierros grises según la distribución de grafito, lo cual está soportado bajo la norma ASTM A247. En la figura 4 se muestra el esquema de las diferentes distribuciones de grafito.

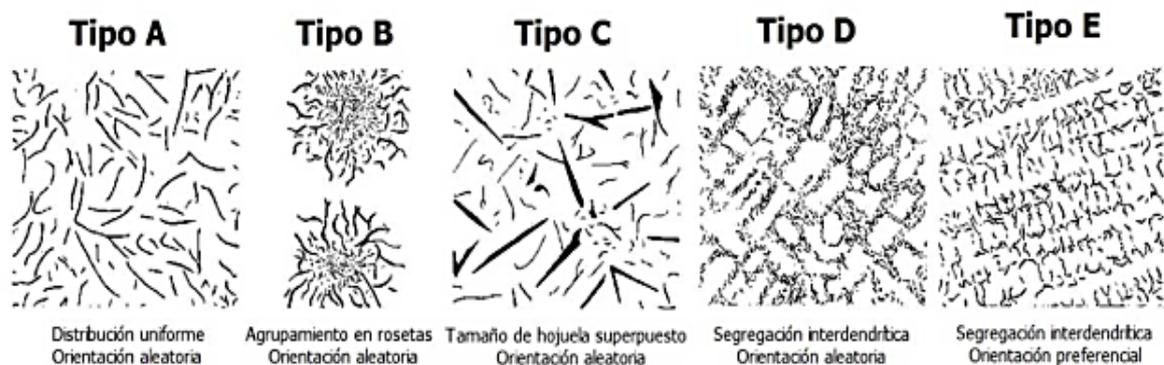


Figura 4: Clasificación del grafito según la norma ASTM A247[3][5][8]

De igual manera, la norma ASTM A247 hace distinción en el tamaño de las hojuelas de grafito, esta clasificación se muestra en la tabla 2.

El tamaño de las láminas de grafito depende principalmente del carbono equivalente y de la velocidad de enfriamiento. Por ejemplo, se obtienen láminas largas y gruesas cuando el CE es alto y las velocidades de enfriamiento son lentas, en cambio se obtienen láminas cortas cuando se tienen bajos carbonos equivalentes y velocidades de enfriamiento altas[8].

Tabla 2: Tamaño y clase de grafito según la norma ASTM A247

Clase	1	2	3	4	5	6	7	8
Tamaño a 100X, mm	128	64	32	16	8	4	2	1

Es primordial aclarar que las hojuelas de grafito no tienen una resistencia mecánica apreciable, en la estructura se comportan como huecos o grietas, los extremos puntiagudos de éstas actúan en forma de entallas o puntos iniciadores de grietas, lo que le confiere al material una naturaleza en cierto modo frágil. No obstante, la dispersión de hojuelas de grafito le proporciona al material una buena amortiguación a la vibración, y cualidades de lubricación interna, que hacen maquinable la fundición. El tamaño y forma de las hojuelas de grafito afectan considerablemente las propiedades generales del hierro gris, si se desean máxima resistencia mecánica[4][5].

4.4 Efecto de los elementos aleantes en los hierros grises.

4.4.1 Carbono.

Los análisis químicos rutinarios reportan el porcentaje de carbono total; y tanto la forma como la distribución de las partículas que contienen carbono, influyen notablemente sobre las propiedades físicas, químicas y

mecánicas de las fundiciones. Cuando la grafitización es completa, el porcentaje de carbono total es igual al porcentaje de carbono grafitico. Se define el grado de grafitización mediante la relación:[9]

$$\%C_{total} = \%C_{libre} + \%C_{combinado} \quad Ec. 3$$

4.4.2 Silicio

El silicio aumenta la fluidez del líquido y afecta el proceso de solidificación promoviendo la grafitización; sin embargo, cuando el contenido es menor al 1% no es suficiente para ello. Por cada 1% de silicio, la composición eutéctica se desplaza hacia la izquierda del diagrama aproximadamente 0,3% de carbono cuando el silicio se halla presente en porcentajes variables entre 0,6% a 3,5%, ejerce indirectamente una acción muy destacada y contribuye a la formación de grafito, que modifica completamente el carácter y las propiedades de las aleaciones hierro-carbono[5][9].

4.4.3 Manganeso

El manganeso es un estabilizador de carburos. Los efectos del manganeso están íntimamente asociados al azufre presente. El hierro forma sulfuro de hierro (FeS) que tiende a segregarse en la interfase líquido-sólido durante la solidificación, y precipita en las últimas etapas del proceso. El manganeso puede modificar la microestructura del grafito, porque incide sobre su proceso de crecimiento. Cuando hay presencia de manganeso, este promueve la resistencia a la grafitización; por lo tanto, el contenido de manganeso necesario para reaccionar con azufre, sirve para retener micro estructuras perlíticas, generando así las matrices perlíticas en las fundiciones de hierro[5][9].

4.4.4 Azufre

El azufre contenido en las fundiciones grises comerciales oscila entre 0,06 y 0,12%. Sus efectos sobre el carbono son contrarios a los del silicio, por lo tanto, genera la tendencia del material a constituirse como fundición de hierro blanca, dura y frágil. Cuando el azufre es menor a 0,25 w/o actúa como fuerte agente modificante en las fundiciones grises; si es menor a 0,001% ayudará a la grafitización conduciendo (en el estado sólido) a promover la transformación de las dendritas de austenita primaria a ferrita.

Si el contenido de azufre es alto, habrá tendencia a retener una microestructura totalmente perlítica en la fundición gris. Tenores de azufre mayores a 0,24% contribuyen a valores de dureza indeseables[9].

4.4.5 Fósforo

El fósforo forma el eutéctico hierro-fosforo de hierro denominado Esteadita característica de las fundiciones blancas, posee temperatura de fusión entre 955 y 982°C. Sus principales características son de relativa fragilidad y baja tenacidad; también aumenta la fluidez y amplía el intervalo de solidificación del eutéctico, lo cual incrementa la grafitización eutéctica cuando el contenido de silicio es alto y el fósforo es bajo. Es útil para mejorar el llenado de piezas de espesores delgados.

El fósforo es segregado en las áreas que solidifican de último, por lo tanto, en la microestructura de las fundiciones, la Esteadita tiende a formar una red continua que delinea las dendritas de austenita proeutéctica. Esto hace que la microestructura de las fundiciones cuando es vista a bajos aumentos, revele un patrón celular.[9]

4.4.6 Elementos trazas

Los elementos trazas son aquellos en porcentajes muy bajos, pero que pueden tener influencia en las propiedades del material y en ocasiones pueden generar defectos. En la tabla 5 se muestran los elementos trazas más importantes y que pueden ocasionar[4].

Tabla 3: Efecto de los elementos trazas en los hierros grises

Elementos	Efectos
Aluminio	Promueve la formación de picadura por hidrógeno. Neutralizador de nitrógeno.
Antimonio	Promueve la formación de perlita Reduce la cantidad de ferrita cercana a las láminas de grafito
Arsénico	Promueve la formación de perlita. Reduce la cantidad de ferrita.
Bismuto	Promotor de carburos Disminuye el tamaño de grafito, disminuyendo la resistencia a la tracción
Boro	Promueve la formación de carburos, específicamente en las secciones delgadas.
Cromo	Incrementa la formación del chill Formador de carburos Aumenta la resistencia a la tracción
Cobre	Promueve la formación de perlita.
Hidrógeno	Promueve defectos como pinholes de hidrógeno y fisuras en la superficie de las piezas fundidas. Tiene un efecto sobre el grafito, engrosándolo y aumentando la cantidad de grafito tipo C
Plomo	Promotor de perlita Disminuye la resistencia a la tracción
Molibdeno	Promueve la formación de perlita.
Níquel	En muy bajas cantidades no tiene ningún efecto significativo, en grandes cantidades es grafitizador
Nitrógeno	Puede causar picaduras y fisuras durante la solidificación.

4.5 Proceso de inoculación

La inoculación es un proceso metalúrgico, el cual consiste en agregar al metal fundido un agente inoculante, que permite crear muchos sitios de nucleación dentro del metal fundido, para que durante la solidificación,

el sobreenfriamiento sea menor, lo que disminuye la tendencia a formar carburos de hierro (Chill) y favorecer la precipitación de grafito libre laminar tipo A, lo que beneficia e incrementa considerablemente las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de las piezas fundidas[5][10].

Los agentes inoculantes que se utilizan normalmente para los hierros grises son los base ferrosilicio, pero también se puede utilizar grafito, silicio metálico, mezclas de grafito con ferrosilicio y carburo de silicio. Algunos de estos inoculantes llevan elementos químicos como aluminio, bario, estroncio, titanio, calcio, manganeso entre otros, los cuales son los iniciadores de la inoculación, o formadores de clúster de carbono, lo que permite que se genere el crecimiento del grafito; los inoculantes más empleados en el mercado son los bases ferrosilicio[5][6].

4.5.1 Efectos de los elementos del inoculante en el hierro gris.

Silicio: El silicio como elemento aleante en los hierros actúa, entre otros, como grafitizante o promotor de la precipitación del grafito, además el silicio del inoculante tiene la función de desoxidar para que al entrar los otros elementos no se oxiden demasiado rápido, flotando como escoria, dando el tiempo suficiente para la formación de los compuestos nucleantes que son los promotores para el crecimiento de las hojuelas, por lo cual es fundamental que el inoculante contenga silicio para promover la formación del grafito.

Calcio: Mejora la germinación del grafito. Reduce la tendencia a la formación de chill.

Aluminio: Mejora la nucleación del grafito. Neutraliza el nitrógeno.

Circonio: Mejora la solubilidad del inoculante, neutraliza el nitrógeno y mejora la inoculación. Combinado con Mn, reduce el punto de fusión del inoculante.

Bario: Fuerte promotor de grafito. Reduce el *fading* del inoculante.

4.5.2 Propósito de la inoculación.

- Disminuir la aparición de carburos de hierro en secciones delgadas, donde la disipación de calor es mayor y la velocidad de enfriamiento es más alta.
- Aumentar la resistencia a la tracción, especialmente en hierros hipoeutéticos los cuales tienen tendencia al chill.
- Proveer de núcleos al sistema durante cierto tiempo, para evitar el *fading*, el cual conlleva a una disminución de núcleos en el baño fundido y un aumento a la tendencia al chill.

Existen diferentes rangos con respecto a la cantidad que se debe agregar de inoculante al metal fundido, esto va a depender de la morfología y del tamaño de grafito que se quiera obtener, del tipo de horno que se utiliza (ya que puede generarse oxidación o sinterización del inoculante) entre otros. Teóricamente se encuentra que la cantidad de inoculante va desde 0,1-0,6% en peso con respecto a la colada[10], y hay estudios en donde muestran que para obtener una estructura con grafito laminar tipo A lo más recomendable es trabajar con 0.3%[4][5].

Es importante mencionar que el efecto de los inoculantes tiene una duración determinada, contada desde el momento en que se adiciona el agente inoculante al baño fundido. Este fenómeno se conoce como *fading* (desvanecimiento) y corresponde al tiempo durante el cual el inoculante es efectivo y que determina el tiempo máximo para vaciar los moldes garantizando la microestructura deseada[5].

4.6 Ensayo de temple (Ensayo de la cuña).

El ensayo de la cuña determina de manera fácil y rápida el espesor-límite para la formación del hierro fundido gris sin cementita (Hierro blanco por enfriamiento rápido, también conocidos como carburos de hierros o chill).

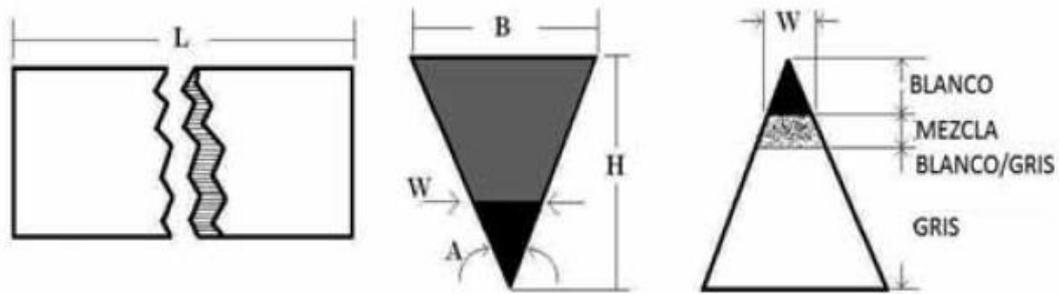


Figura 5: Esquema de la cuña y formación del chill en las fundiciones[11].

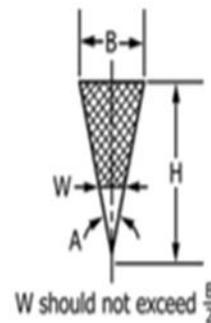
En el ensayo de la cuña, se cambia la velocidad de enfriamiento, en otras palabras, la parte de abajo de la cuña (W) enfría mucho más rápido que la parte de arriba, causando varias velocidades de enfriamiento. Con la inoculación, se aumenta el grado de nucleación y, por lo tanto, se disminuye la velocidad de enfriamiento. Este tratamiento se hace poco antes de verter el hierro en el molde, para disminuir el súper enfriamiento y así minimizar la tendencia al enfriamiento (carburos de hierro y/o mezcla de carburos de hierro con hierro gris). La gran mayoría de las fundiciones hacen pequeñas producciones de piezas, con formatos muy distintos y diferentes clases de hierro gris. Para estos casos es mucho mejor usar el control de nucleación a través de la cuña y su corrección antes del basamento del hierro en el molde[11].

En la empresa el ensayo de temple mencionado anteriormente es muy complicado implementarlo, ya que la metodología de trabajo es continua, lo que implicaría en el caso más extremo hacer el ensayo de la cuña por cada carga lo que sería cada 5 minutos aproximadamente.

Para la manera de trabajar en la empresa, se va a suponer o a tener en cuenta que el material suministrado en cada carga se mantiene durante toda la jornada de trabajo. Basándose en la anterior suposición, el ensayo

de cuña se realizará en periodos regulares de tiempo de igual manera que la composición química.

Para la realización de este ensayo se deben preparar moldes en arena para vaciar la cuña, esta cuña lleva unas medidas específicas según la norma ASTM A367-11. En la figura 6 se muestran las dimensiones de los tipos de cuñas utilizados para este ensayo. Para el producto que se obtiene en la empresa y en las condiciones en las que se trabaja, la cuña más recomendable para trabajar es la N° 2 (W2), la cual posee un espesor comparable con las dimensiones de las piezas producidas.



Wedge No.	Wedge Dimensions						
	B		H		A, deg	Length	
	in.	mm	in.	mm		in.	mm
W 1	0.20	5.1	1.00	25.4	11.5	4	101.6
W 2	0.40	10.2	1.25	31.8	18	4	101.6
W 3	0.75	19.1	1.50	38.1	28	4	101.6
W 3½	1.00	25.4	1.75	44.4	32	5	127.0
W 4	1.25	31.8	2.00	50.8	34.5	6	152.4

Figura 6: Dimensiones de los diferentes tipos de cuña según la norma ASTM A367-11.

4.7 Fundición centrífuga.

El proceso de fundición centrífuga es el más ampliamente utilizado para la producción de tuberías, camisas de cilindros, tambores de freno, volantes y otras partes simétricas; esta técnica ha tenido un gran desarrollo e implementación en la industria de la fundición[10]. La fundición centrífuga es un proceso que consiste en producir pieza

fundidas haciendo que el metal fundido (colada) se solidifique en el interior de un molde giratorio.

La velocidad de rotación y la tasa de vertido de metal varían según la aleación, el tamaño y la forma que se vayan a fundir. Las principales variables a tener en cuenta en el proceso de fundición centrífuga es la rotación del molde, velocidad de vertido de la colada y velocidad de solidificación[12].

La fuerza centrífuga es indispensable para el proceso, actúa de dos formas diferentes en el centrifugado, principalmente es la que influye en la distribución del metal líquido sobre la superficie interior del molde, generando cilindros huecos uniformes y otras formas anulares; y también actúa generando una alta presión en la fundición durante la solidificación y el enfriamiento. Esto, en unión con la solidificación direccional, ayuda a acelerar la separación de los gases. La efectividad de la fuerza centrífuga promueve un alto estándar de calidad metalúrgica de la pieza, al establecer un modelo controlado de la solidificación. Otra función que ejerce la fuerza centrífuga es hacer que las inclusiones no metálicas segreguen en la superficie interna del cilindro. En la colada estática, la separación de las inclusiones depende de la fuerza neta gravitacional que actúa en cada partícula suspendida, en la fundición centrífuga esta fuerza es mucho mayor[10][13].

4.8 Defectos de fundición.

Un defecto es considerado como un estado de la fundición, que no permite la aplicación de sus cualidades de fabricación. En términos de la calidad del producto se considera defectuoso cuando se presenta desviaciones en términos de dimensiones, compactibilidad, peso, la apariencia, macro y microestructura, parámetros mecánicos y otras variables de propiedades prescritas por las normas técnicas, especificaciones o condiciones acordadas[14].

Durante el proceso de fundición, siempre existe la posibilidad de que ocurra un defecto. Los defectos menores pueden ajustarse fácilmente, pero las altas tasas de rechazo pueden llevar a cambios significativos y/o a costo elevado. Por lo tanto, es esencial que las personas que funden tengan conocimiento del tipo de defecto y pueda identificar la(s) causa(s) para realizar las correcciones pertinentes y así poder evitarlos[15].

La fundición es un proceso que conlleva el riesgo de que ocurra una falla durante todo el proceso de realización del producto terminado. Por lo tanto, se deben tomar las medidas necesarias durante la fabricación del producto fundido para que se obtengan piezas libres de defectos. La mayoría de los defectos de fundición están relacionados con los parámetros del proceso. Por lo tanto, lo primordial es controlar el parámetro del proceso para lograr cero partes defectuosas. Para controlar el parámetro del proceso, se debe tener conocimiento sobre el efecto del parámetro del proceso en el lanzamiento y su influencia en el defecto[15].

Los defectos en las fundiciones centrífugas se relacionan principalmente con el proceso de solidificación. Sin embargo, es muy difícil determinar la distribución de la temperatura y el tiempo de solidificación mediante técnicas experimentales en fundición centrífuga.

Varios tipos de defectos pueden generarse en el proceso de fundición, reduciendo considerablemente la producción total de piezas fundidas, además de aumentar los costos de su producción[16]. Por lo tanto, todas las piezas de fundición tienen asociadas defectos de varios tipos y origen. Los cuales pueden estar relacionada con la desviación de las

propiedades del material, el proceso de obtención, la estructura, las propiedades mecánicas y fisicoquímicas. Las características de los defectos permiten su identificación, que a su vez es la base para la creación de la clasificación de defectos de fundición y su posterior control[15][17].

En las piezas fabricadas por el proceso de centrifugación aparecen la mayor parte de los tipos de defectos encontrado en fundiciones estáticas, aunque existe menos contracción interna, menos porosidad e inclusiones metálicas que en la fundición estática; la ventaja de la fundición centrífuga es que los defectos se generan mayormente en la superficie interna o externa de la pieza, los cuales pueden ser descartado en el proceso de mecanizado[10]. Los defectos más comunes son segregaciones, frecuencia del fenómeno de "*banding*", lluvia de metal, porosidad, inclusiones debido al recubrimiento aislante o desmoldeante y la variación en el espesor de la pieza. Adicional a estos se encuentran las formas del grafito debido a las inclusiones, burbujas de aire, vibración y grumos de metal[10][16].

Las bandas de segregación o "*banding*" es un fenómeno que se produce en las fundiciones centrífugas en donde la pared del molde es demasiado gruesa, también existen otros factores que pueden promover el *banding* tales como la rotación del molde, las vibraciones y el flujo del metal a la hora de vaciar. La lluvia o lluvia de metal se produce cuando el metal fundido no adquiere la misma velocidad de rotación del molde, por ende, si el metal fundido no adquiere una velocidad rotativa lo suficientemente alta para vencer la fuerza de gravedad entonces el metal fundido caerá de la parte superior a la inferior, por efecto de la gravedad. Los poros que se generan por los gases contenidos en el metal líquido o debido a la humedad en el molde y en el recubrimiento que se utiliza. Las inclusiones no metálicas se presentan por el exceso del desmoldeante o por la mala aplicación de este[10][12].

4.9 Obtención de hierros fundidos en hornos de cubilote

El horno cubilote es uno de los hornos de fusión más utilizado en la elaboración de fundiciones grises. Se trata de un cilindro recto revestido con material refractario que trabaja con combustible sólido (coque), el cual se carga en el horno formando una cama sobre la cual se sobrepone la carga metálica a fundir, y en donde por medio del proceso de combustión entre el carbón fijo del coque y el oxígeno proveniente del aire a presión inyectado por medio de las toberas, se genera el suficiente calor para lograr transformar la materia metálica del estado sólido al estado líquido[18].

Debido a las condiciones del proceso de fusión en el horno de cubilote, el metal fundido adquiere una calidad metalúrgica mayor, que el obtenido a partir de hornos eléctricos, los cuales tienen una alta tendencia a formar carburos de hierros o chill, debido a que el metal de cubilote, posee un mayor potencial de inoculación de grafito. Aún si el metal fundido, es obtenido a partir de cubilote, si éste es sostenido en horno eléctrico, el metal presenta una reducción de su potencial de nucleación de grafitización[4].

El proceso de obtención del hierro fundido, se obtiene por colada continua, el proceso de inoculación se realiza en el crisol principal o basculante donde se recibe la colada.

Existe un medio de transporte de la colada a cada una de las maquinas centrifugadora, conocido como monorriel (en forma de puente grúa operado manualmente); el cual se encarga de suministrar a cada operario la colada para poder vaciar el producto, este proceso es poco implementado en la planta por temas de personal.

5 METODOLOGÍA

5.1 Clasificación y características de los defectos de la empresa

COMETA GL S.A.S

Para conocer el estado de la empresa en términos de producto rechazado por defectos, se realizó una investigación interna en la base de datos de COMETA GL S.A.S, sobre la metodología de trabajo y la forma de operación, desde la obtención del producto hasta su proceso final y también para conocer los defectos más frecuentes en toda la línea de trabajo.

Adicional a esto se realizó una exploración interna en los documentos de la empresa para conocer el historial interno que existe sobre el tema abordado.

5.1.1 Seguimiento al producto no conforme

Se encontró que la empresa tenía problemas en el control de defectos y que no había uniformidad de criterio para el rechazo del producto defectuoso o no conforme (NC) como es llamado internamente, es importante resaltar que el rechazo del producto se realiza de manera cualitativa. Entonces, para garantizar la calidad del producto y prevenir pérdidas por defectos, se realizó inicialmente un seguimiento constante del producto que entra a mecanizado para tener asertividad de las causas por las cuales se rechaza el producto. Y con base a esto conocer las posibles causas que lo generan y poder evitarlas para minimizar el rechazo del producto; por otra parte, se realizaron retroalimentaciones a los operarios para generar igualdad de criterios de rechazo del producto, para facilitar y ser asertivos a la hora de analizar la información.

El seguimiento del producto NC se realizó en compañía con personal de alto conocimiento respecto al tema.

Una vez conocida las principales causas de rechazo se procedió a implementar metodologías de control desde la obtención del producto y en cada una de las áreas de mecanizado.

5.2 Ensayos y Acciones correctivas

5.2.1 INOCULACION

Dentro de las metodologías de control o acciones correctivas, se validó el proceso de inoculación, con el cual se puede evitar o disminuir el rechazo del producto por dureza. Dentro de este proceso se realizaron ensayos con dos inoculantes comerciales los cuales su descripción se muestra en la tabla 6. Se realizaron ensayos de composición química en cada colada utilizada para la selección de las muestras. Estas mediciones se realizaron con un CARBOMAX marca ITALTERM. Este ensayo se respaldó con un análisis de espectrometría de emisión óptica (OES), el equipo utilizado para este ensayo fue un espectrómetro de emisión óptica marca BRUKER Q8 MAGELLAN.

Para la obtención de las muestras, por cada medición de composición química se tomaron tres muestras, en las cuales dos estaban inoculadas (con 0,3% en peso) en cuchara con dos tipos diferentes de inoculante y la otra muestra se tomó de la manera en como venía inoculando (AS-CAST).

La colada para la obtención de las muestras fue obtenida de un horno de cubilote N°0, lo cual está en función de las toneladas procesadas y su diámetro interno[18].

5.2.2 Ensayos de dureza

Las mediciones de dureza se realizaron con un durómetro SEIKI 74212, las mediciones se realizaron en la zona transversal del tubo cilíndrico en

forma de barrido desde la parte externa de la muestra hacia la parte interna como se muestra en la sección 6.3.3.

5.2.3 Ensayo de temple o de la cuña

Se realizaron ensayos de temple de cómo se venía trabajando, e inoculando con 0.3% de inoculante para mirar cómo estaba influenciado el proceso de inoculación con la formación de chill causante de un aumento en la dureza.

5.2.4 Metalografías

Se realizaron análisis metalográficos para la distribución y el tamaño de grafito, según la clasificación de la norma ASTM A247 mediante la comparación de micrografías estandarizadas. Las muestras se prepararon metalográficamente según el procedimiento convencional definido en la norma ASTM E3, y posteriormente fueron analizadas sin ataque y con ataque, el ataque se realizó con nital al 2% durante 5 segundos y fueron observadas en un microscopio óptico modelo NIKON eclipse MA100.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Clasificación y características de los defectos de la empresa COMETA GL S.A.S

En la empresa COMETA GL S.A.S se cuenta con una serie de defectos en toda su línea de producción (14 para hacer exactos), que se clasifican en dos áreas, los que están relacionados al proceso de fundición y los que están relacionados al proceso de mecanizado, estos últimos son debidos a daños operacionales ya sea de la máquina y/o el operador.

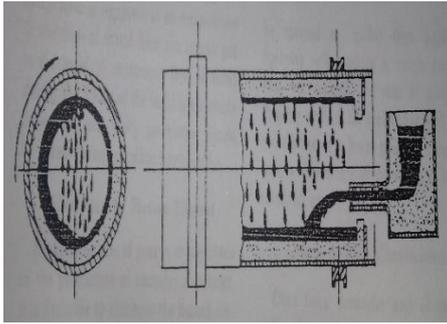
Tabla 4: Nombre y clasificación de los defectos presentados en la empresa COMETA GL S.A.S

Cód. Defecto	Defecto	Área de Clasificación
1	Cónica	Mecanizado
2	Ovalada	Mecanizado
3	Humedad	Fundición
4	Incrustamiento	Fundición
5	Empatada	Fundición
6	Medida	Mecanizado
7	Descentre	Mecanizado
8	Reventada	Mecanizado
9	Salpicadura	Fundición
10	Dureza	Fundición
11	Vibración interna	Mecanizado
12	Vibración externa	Mecanizado
13	Sombra	Mecanizado
14	Escoria	Fundición

En términos generales se pretenden controlar el porcentaje de producto rechazado, para este informe se pretende enfocar principalmente en los defectos relacionados a fundición, en la tabla 5 se muestra las características de cada uno de los defectos correspondiente.

Tabla 5: Características de los defectos de fundición.

Defectos	Esquema	Características
Humedad o porosidad		Se genera por el gas atrapado dentro del metal; son de forma esférica y regular.
Incrustamiento		Cavidades o altos relieves bien definidos, de formas irregulares generados por elementos extraños en el hierro.
Empatada		Grietas en la pieza, capas en la camisa, solidificación dispereja, o mal vaciada

<p>Salpicadura o raining</p>		<p>Alto relieves o goteras de material dentro de la camisa sin maquinar. Lluvia de material que cae de la parte superior de la camisa y genera una especie de escoria Espumosa.</p>
<p>Dureza</p>		<p>La camisa no se deja maquinar fractura blanca de la pared correspondiente a los carburos de hierros</p>
<p>Escoria</p>		<p>Elemento extraño en la colada y al maquinarlo forma una cavidad en la camisa.</p>

6.2 Seguimiento del producto no conforme

Con el fin de tener asertividad y veracidad de la información para el control de los defectos, se realizó seguimiento al producto defectuoso o rechazado en toda la línea de mecanizado. En la figura 7 se muestra los resultados de no conformidad y su variación en el tiempo.

Es importante mencionar que al transcurrir el tiempo se fueron realizando mejoras y retroalimentaciones para el control de los defectos.

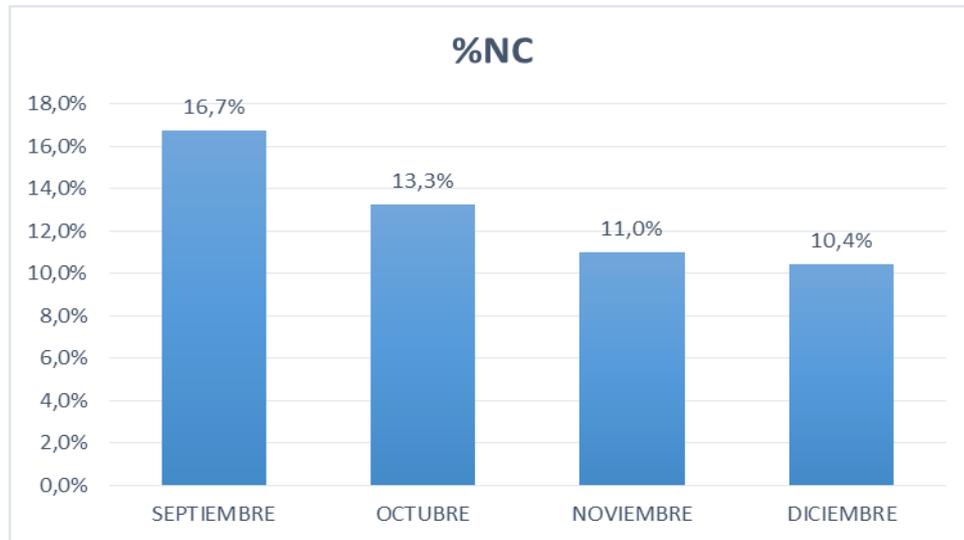


Figura 7: Porcentajes de no conformidad total (mecanizado y fundición) con respecto al tiempo.

Adicional a eso se muestran los principales defectos presentados, en los cuales se muestran algunas mejoras. Es importante mencionar que los valores mostrados en la figura 8 son con base a los datos de la figura 7.

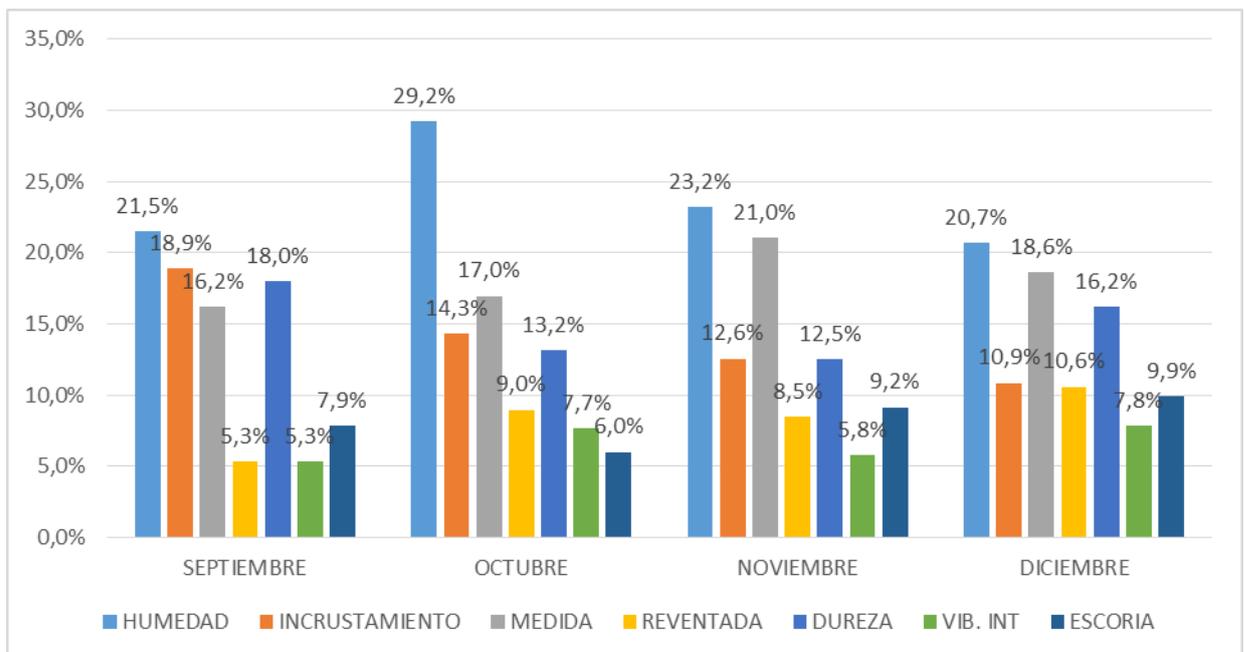


Figura 8: Comportamiento de los principales defectos reportados en la planta con el transcurrir del tiempo.

Al inicio del seguimiento se logra notar que el porcentaje de no conformidad es de 16,7% del producto procesado; en la figura 8 se muestra que los principales NC corresponde a defectos de fundición.

Según la técnica de fundición centrífuga se pudo evidenciar, que los defectos de escoria e incrustamiento, están relacionados con el método de trabajo. Debido a que son controlables desde la obtención del tubo centrifugado.

También se encuentran indicios que estipulan que el problema de humedad o porosidad puede estar relacionado con la temperatura de los moldes o dicho de otra manera en el enfriamiento de estos, ya que no se les da el tiempo necesario para que estén a la temperatura adecuada de centrifugación, ya que el material aislante a altas temperaturas puede degradarse y liberar gases que no alcanzan a salir en el proceso de centrifugado.

El tema de la humedad es un poco más complejo, lo que implica un estudio más detallado, ya que existen diferentes variables que pueden ocasionar o generar poros en las camisas fundidas, en el anexo 9.1 se deja estipulado teorías enmarcando las posibles variables que pueden generar este proceso.

6.3 Acciones correctivas

6.3.1 Validación del proceso de inoculación.

El proceso de inoculación es fundamental para la obtención de hierros grises, ya que de ello depende la nucleación para que se genere la hojuela de grafito.

Se analizó la forma como se estaba inoculando en la empresa y se encontró que el porcentaje de inoculante agregado a la colada era aproximadamente 0,1% en peso con respecto a la colada. El inoculante es agregado directamente al crisol principal o basculante, que es donde llega todo el metal líquido; la empresa trabaja con el proceso de colada continua, en el cual se tiene la premisa de que una carga de 100kg demora 5 minutos para fundirse y llegar al crisol principal; con base a esto se determinó el porcentaje de inoculante agregado, lo que se agregaba normalmente cada 5 minutos era una cantidad de 100 gramos.

Adicional a lo mencionado anteriormente, la empresa estuvo en el proceso de homologación del inoculante, por tal razón en el momento probó dos tipos diferentes de inoculante, uno convencional con el que se trabaja normalmente conocido como IM-43, y otro que se quiere implementar que es el IM-22. Ambos inoculantes que se utilizaron para estos ensayos son base ferrosilicio, en la tabla 6 se muestra la referencia de cada inoculante con su respectiva composición química tomada de la ficha técnica.

Tabla 6: Composición química de los inoculantes

Composición química	Si	Ca	Al	Zr	Mn	Ba	Fe
IM-43	71.30	2.10	1.26	1.94	-	-	Bal.
IM-22	67.85	1.34	1.02	2.91	2.58	0.91	Bal.

La inoculación directa en el crisol principal tiene una complicación, debido a que en muchas ocasiones el material inoculante que se está adicionando queda depositado en la escoria que se acumula en la superficie del metal fundido, y por ende no entra en contacto con la

colada. La escoria que se acumula en la parte superior de la colada sirve como aislante y evitar pérdidas de calor de la colada.

Cabe mencionar que este proceso que se venía realizando no era constante ya que el hornero tiene otras actividades y no se encuentra todo el tiempo para realizar la inoculación.

Se realizaron algunos ensayos con los inoculantes mencionados anteriormente, en una proporción de 0,3% en peso, la inoculación se realizó en cuchara. Existen muchas variables que influyen en el proceso de centrifugación, por tal motivo se trató de trabajar bajo las mismas condiciones para ser más objetivos en los resultados.

- Temperatura del molde: 290-315°C
- Tiempo de centrifugado: 2,5 min
- % de inoculante: 0,3% en peso.

Se tomaron muestras con cada medición de composición química; las muestras obtenidas son para cada inoculante con la proporción indicada, también se tomaron muestras de como venía trabajando la empresa.

La inoculación con 0,3% con cada inoculante se realizó en la cuchara, para la muestra *as-cast*, se tomó la colada directamente del crisol, teniendo en cuenta que esa es la muestra que representa la condición que se venía presentando.

6.3.2 Resultados de composición química para la validación del proceso de inoculación.

Tabla 7: Composición química de las coladas para la selección de las muestras.

Coladas	Composición		
	CE	%C	%Si
Col. 1	4.03	3.24	2.39
Col 2.	4.03	3.19	2.51
Col 3.	4.10	3.27	2.51

Para validar los elementos aleantes que este presentaba la colada 1 fue analizada por Espectrometría de emisión óptica OES.

Tabla 8: Resultado de la OES de la col.1

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	As
%p/p	3.287	2.237	1.00	0.10	0.11	0.19	0.01	0.05	0.18	0.007	0.013
			7	9	4	6	8	3	1	9	

Según los resultados de OES el CE calculado con la ecuación 3 es:

CE= 4.039 Que corresponde a lo marcado por el eutéctómetro (tabla 7).

Con base a los resultados de OES se realizaron ajustes en el equipo de medición de carbón equivalente con respecto al silicio y al carbón total.

6.3.3 Ensayo Dureza.

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 9. Cabe mencionar que estas muestras fueron sometidas a un alistamiento de tal forma que se permitiese realizar el ensayo.

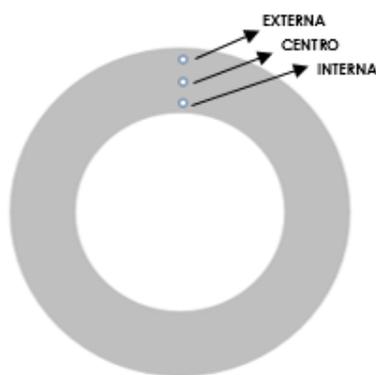


Figura 9: Bosquejo del barrido utilizado para la medición de la dureza

Tabla 9: Resultados de las mediciones de la dureza

	Muestras	HRB			PROM. HRB	HB
		Ext.	Cen.	Int.		
AS- CAST	1	104,0	107,8	101,5	103,3	255
	2	103,3	103,0	100,75		
	3	104,5	104,0	101,25		
	PROM.	103,9	104,9	101		
IM- 43	1	104,0	103,8	100,75	102,4	248
	2	105,8	104,5	102,75		
	3	100,8	99,8	99,5		
	PROM.	103,5	102,7	101		
IM-22	1	103,3	103,3	99,5	100,6	241
	2	102,3	100,0	98,25		
	3	99,3	101,3	98,25		
	PROM.	102	102	99		

Nota: Las muestras AS- CAST corresponde a las muestras de 0.1% en peso de inoculante IM- 43, que es la manera en como la empresa venía realizando su proceso de inoculación.

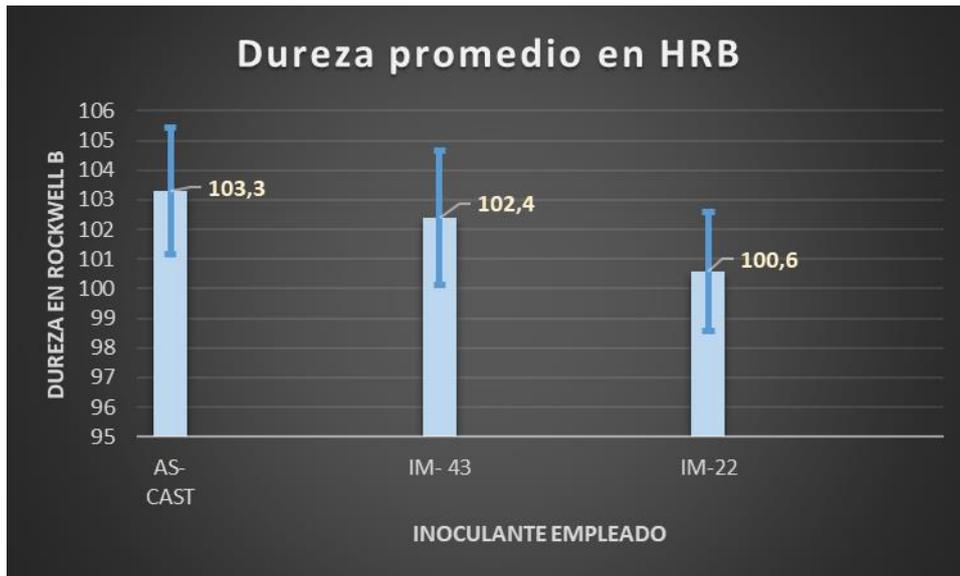


Figura 10: Dureza promedio en HRB, con su respectiva desviación.

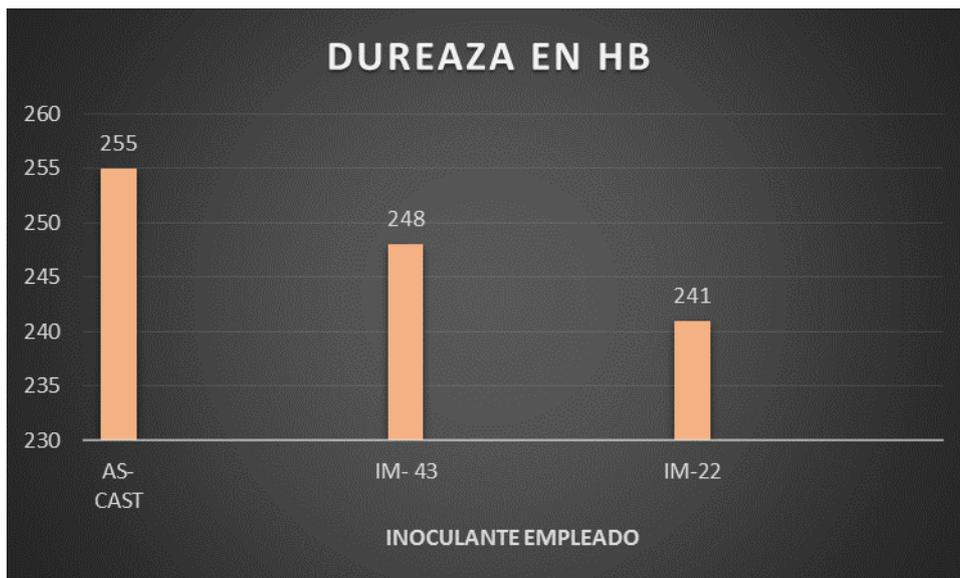


Figura 11: Conversión de la dureza Rockwell B a Dureza Brinell

Es importante hacer la aclaración que para los hierros grises la dureza se mide en la escala Brinell, en donde la esfera utilizada en el indentador es de mayor diámetro.

El producto obtenido por la empresa no posee un espesor significativo en el cual se pueda realizar este ensayo, y esto puede viciar los resultados obtenidos por esta técnica.

Los resultados mostrados en la figura 11, es la conversión de HRB a BRINELL; la conversión utilizada se describe en la norma ASTM E140-12b. Es importante aclarar que esta norma es aplicable solo para aceros al carbono, aceros aleados y aceros para herramientas forjados, normalizados o templados.

6.3.4 Ensayo de chill o profundidad de temple.

El ensayo de temple es una herramienta de control, con la que se obtiene una determinación rápida de la reducción de temple conseguida con la inoculación; adicional a esto, permite analizar la cantidad de chill o carburos que se pueden generar en la colada con el proceso de inoculación.

Con este ensayo se pretende verificar la influencia en el control del chill, y que tanta influencia se tiene la inoculación; además se verificará el porcentaje de chill o carburos que pueden formarse, y que tan influyente es la inoculación en este proceso.

El ensayo para determinar la cantidad de "chill" consiste en fracturar la cuña y medir el ancho de la zona que presenta chill.

En la figura 10 se muestra la variación, del ensayo de chill para las muestras tomadas de la inoculación, es decir, en cómo se venía trabajando (con 0.1% de inoculante) y como se pretende trabajar (0.3% de inoculante)

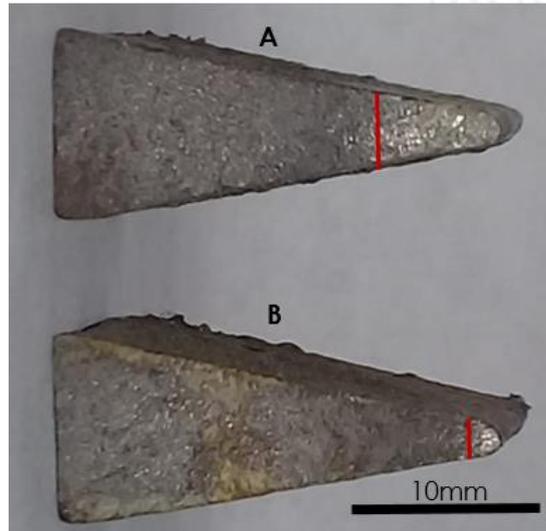


Figura 12: Variación del chill según las metodologías de trabajo. (A) Inoculación con 0.1%, (B) inoculación con 0.3%

En la figura 12, se muestra la imagen de una cuña fracturada, en donde se observa, la región con “chill” (plateada, a la derecha de W que es la línea roja) asociada a la formación de carburos de hierro y la región asociada a la solidificación gris (a la izquierda de W).

Según la norma ASTM A367, un resultado satisfactorio, se obtiene cuando W no es superior a B/2; esta condición indica que la estructura de la cuña, no tiene más del 50% de chill. Los resultados son presentados en función del porcentaje de sanidad, bajo la siguiente expresión:

$$\%Sanidad = 1 - \frac{W}{B} * 100$$

$$\%Sanidad(A) = 1 - \frac{4,8}{9,9} * 100 = 51,5\%$$

$$\%Sanidad(B) = 1 - \frac{2,1}{9,9} * 100 = 78,8\%$$

6.3.5 Resultados metalográficos

En la figura 13 se observa que la superficie de las piezas en contacto con el molde tiene una estructura dendrítica para cada una de las muestras, eso es debido a la diferencia de temperatura del molde con respecto a la colada de hierros, lo que genera un sobreenfriamiento en esa zona generándose así el crecimiento y engrosamiento de las dendritas, lo que no permite la nucleación y el crecimiento de las hojuelas de grafito. El grafito encontrado en esta zona es un grafito tipo D los cuales son segregaciones interdendríticas de una forma aleatoria según la descripción de la norma ASTM A 247.

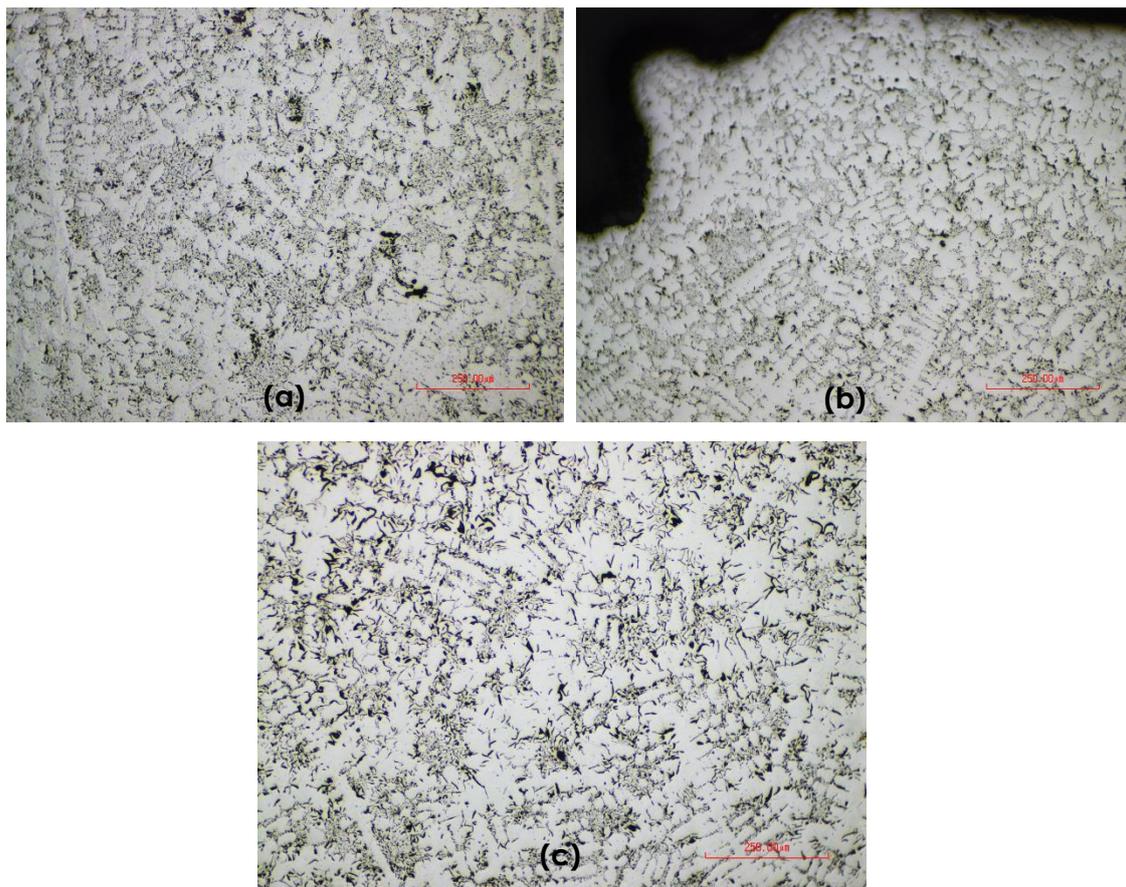


Figura 13: Microestructura de las muestra en la zona superior (contacto con el molde) a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. **(a)** AS-CAST, **(b)** IM-43, **(c)** IM-22

En la figura 14 se muestra el inicio de la nucleación del grafito, después de formación de las dendritas; la zona del sobreenfriamiento es aproximadamente de 1000 micras lo que equivale a 1mm. La nucleación se inicia en este sector debido a que el enfriamiento es mucho menor que en la zona de contacto con el molde, lo que permite una mejor nucleación y el crecimiento de las hojuelas de grafito, esto ocurre para todas las muestras.

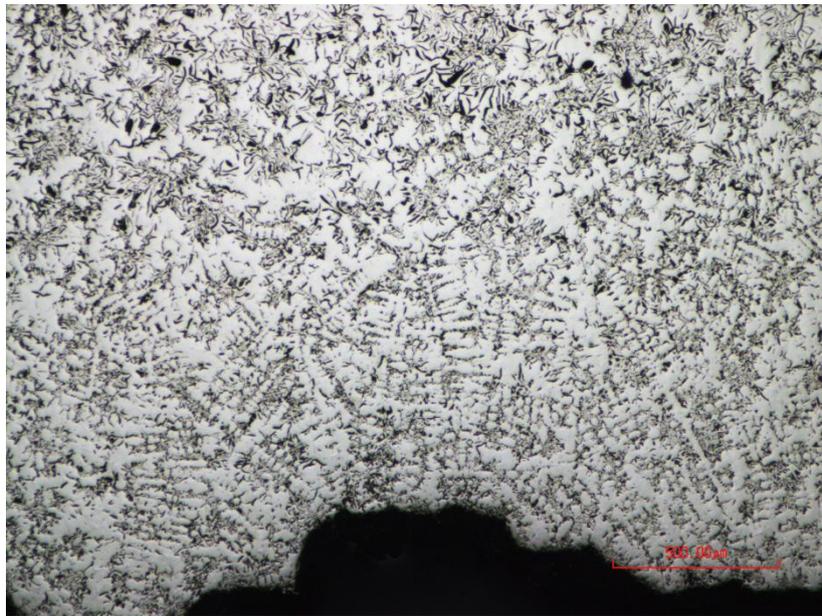


Figura 14: Finalización de la zona dendrítica e inicio de la nucleación del grafito después del sobreenfriamiento generado por el contacto con el molde. Muestra IM-22 sin ataque metalográfico a 50X.

En la zona central, se observan hojuelas más definidas de grafito, aún se observa diferencias notorias, en el tamaño y distribución del grafito. En la figura 15 (a) se observa que para la muestra en estado AS-CAST posee un grafito tipo B clase 6.

Mientras que para la muestra IM-43 (figura 15 (b)) se observa una distribución de grafito tipo B clase 5 el cual se encuentra en mayor

proporción, también se observa una pequeña proporción de grafito tipo A.

En las muestras de IM-22 (figura 15 (c)) se observa una mejor formación y distribución de hojuelas de grafito, en donde se encuentra un grafito laminar tipo A con una clase 3 en mayor proporción, también se observa pequeñas cantidades de grafito tipo B.

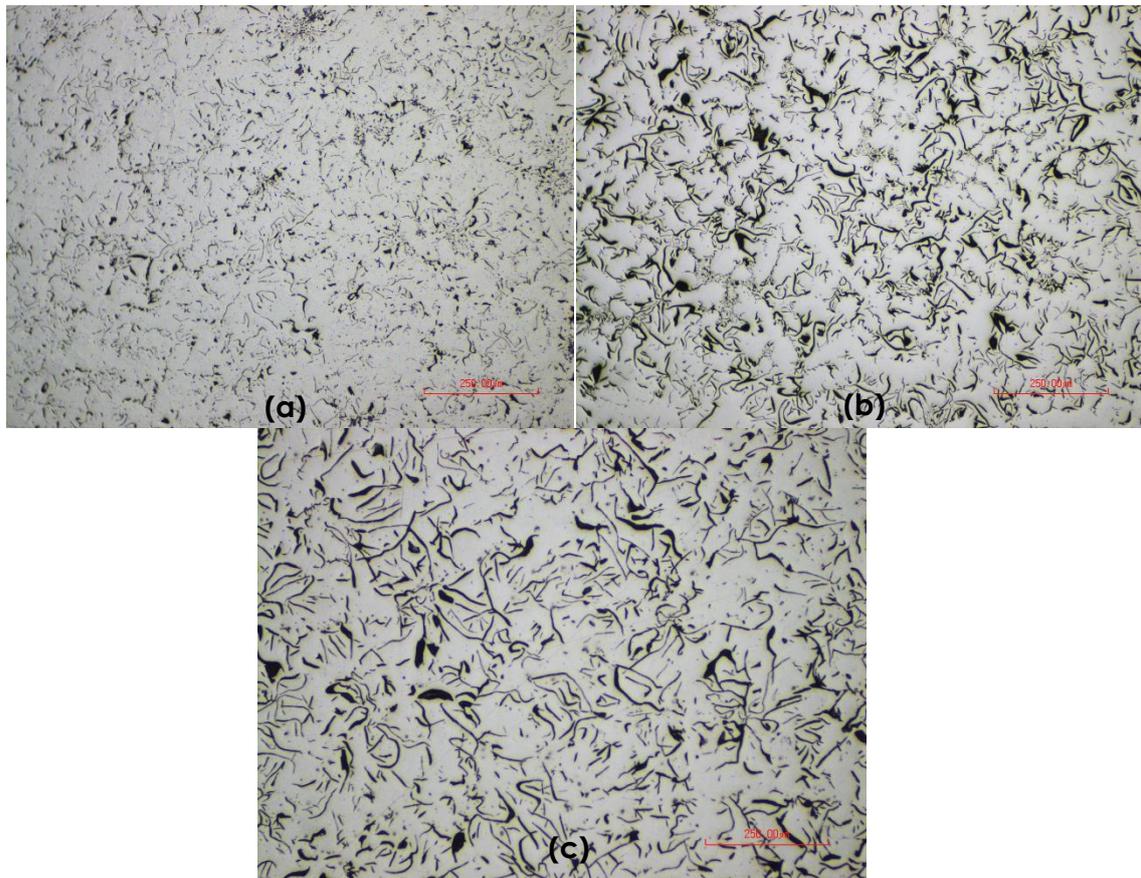


Figura 15: Microestructura de las muestra en la zona central a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. (a) AS-CAST, (b) IM-43, (c) IM-22

En la figura 16 las hojuelas de grafito son más definidas (zona interna), y tienen una mejor distribución, debido a que en esta zona el enfriamiento es mucho más lento lo que le permite la nucleación y el crecimiento de las hojuelas, sin embargo en las muestras con IM-22 presenta una mejor distribución de grafito tipo A.

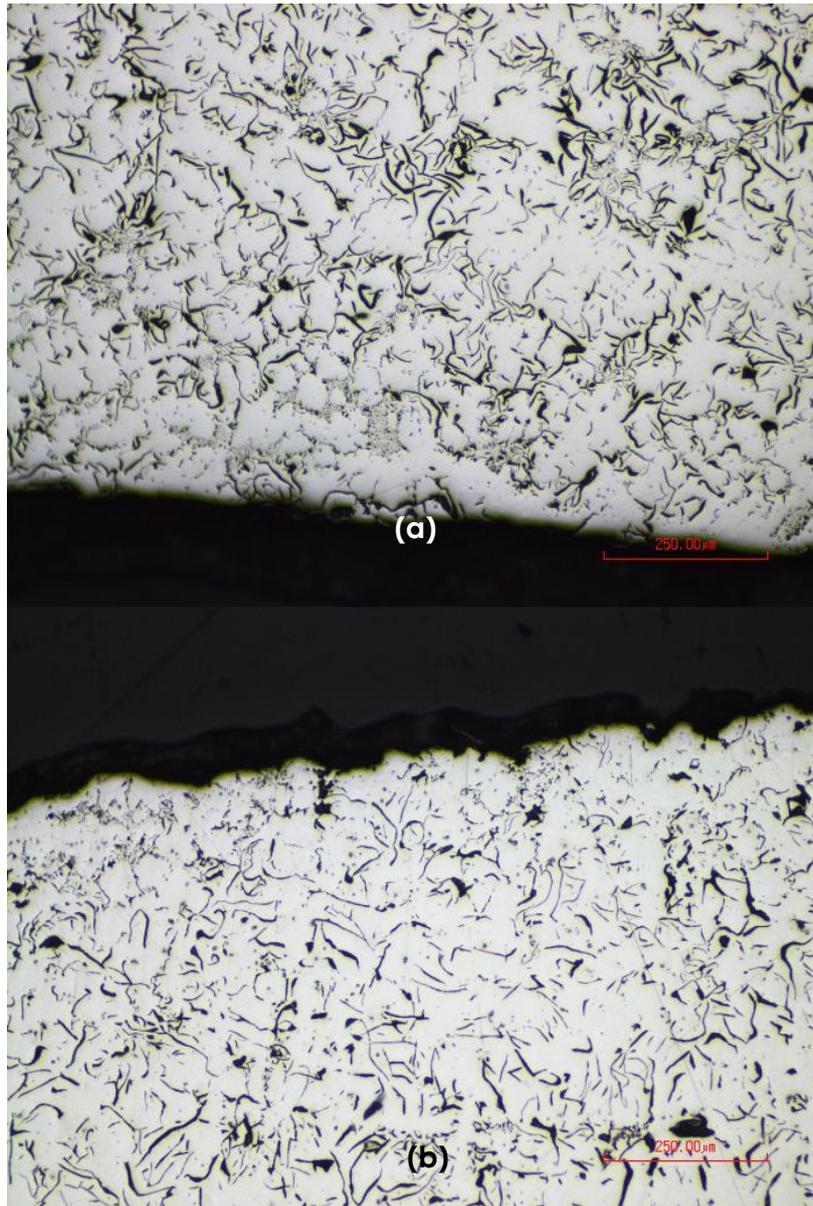


Figura 16: Microestructura de las muestra en la zona interna a 100X. Probetas sin ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22

Para el análisis de la microestructura se atacaron las muestras con nital al 2%, y según la tabla de clasificación *gray iron microstructure rating chart* de la AFS, que es basada en la norma ASTM A 247, se realiza una cuantificación de las fases presentes de donde se encuentra que para las muestras con los inoculantes IM-43 y IM-22 se observa una distribución aproximada entre perlita y ferrita de 97% y 3% respectivamente para

ambas muestras. En ambas muestras se logra evidenciar que la perlita presente es fina y en algunos lugares mediana (ver figura 17).

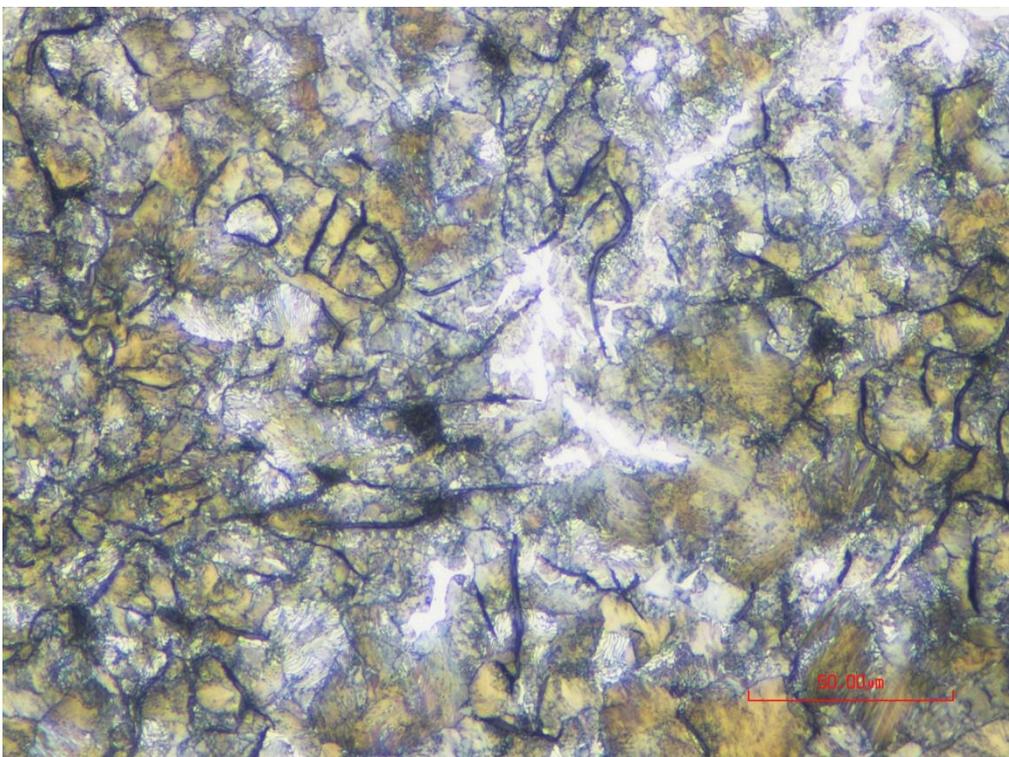
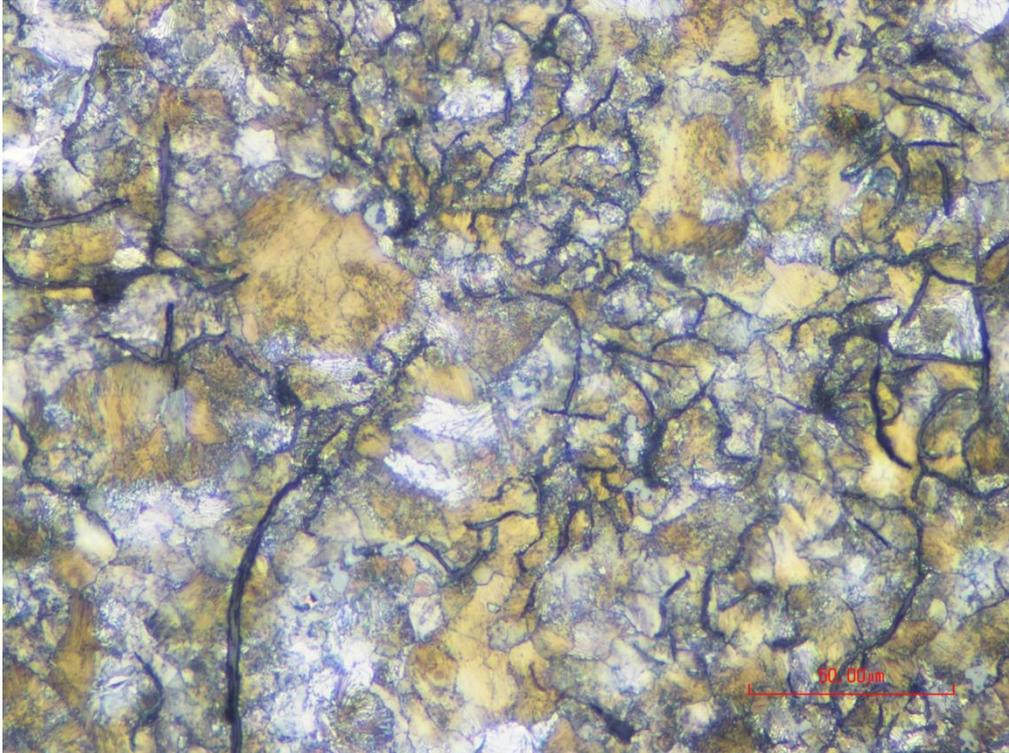


Figura 17: Microestructura de las muestra en la zona central a 100X. Probetas con ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22

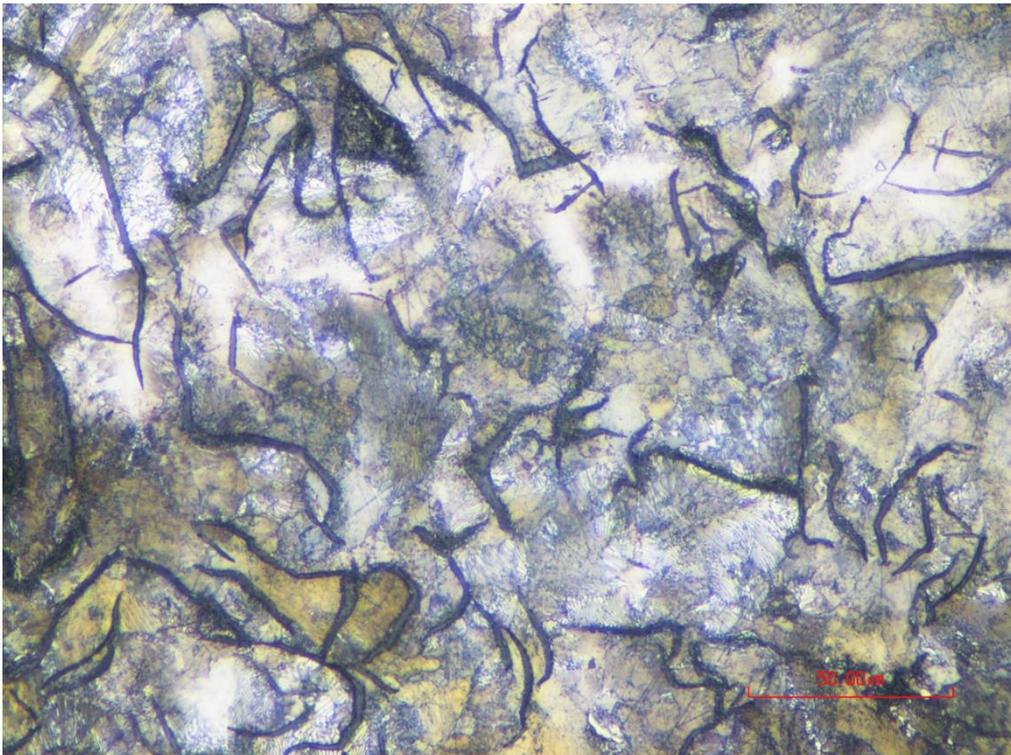
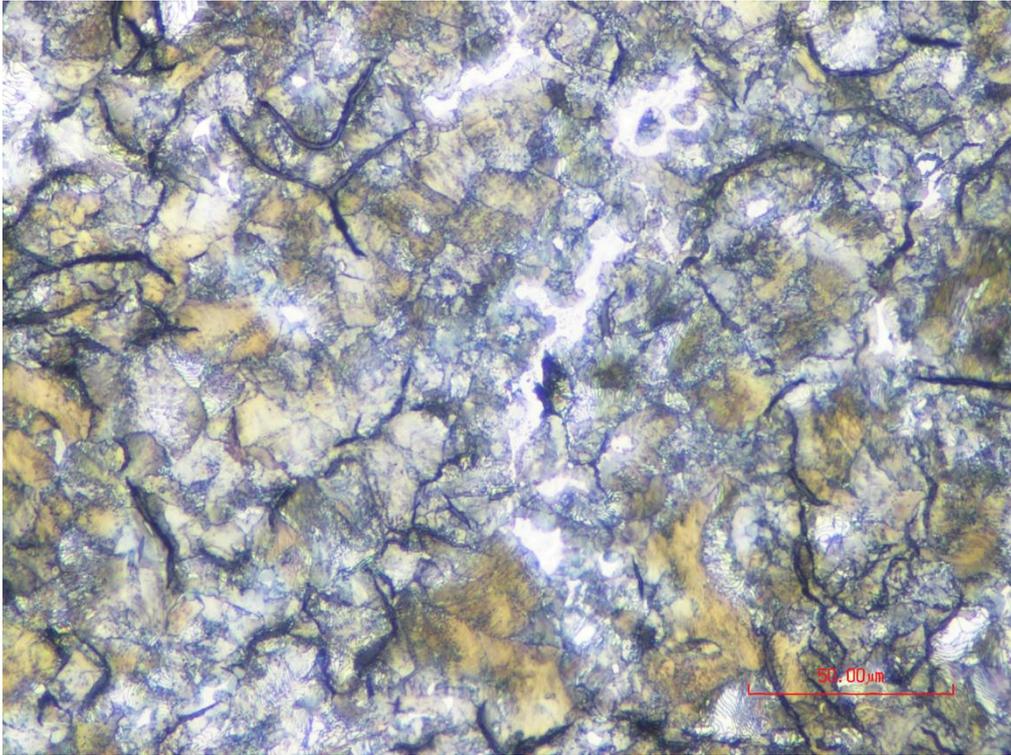


Figura 18: Microestructura de las muestra en la zona central a 500X. Probetas con ataque metalográfico. (a) IM-43, (b) IM-22

6.4 Control de la calidad del producto.

Con miras a tener un control de la calidad del producto obtenido en la empresa, se debe implementar una serie de técnicas y ensayos constantes para el seguimiento del producto principalmente desde la fundición; los cuales consisten en validación de la composición química, ensayos de durezas por lotes (de una muestra representativa) y respaldarse con análisis metalográficos.

Para la validación y control del NC, correspondiente a fundición realizar seguimiento *in situ* de la manera empleada por los centrifugadores, ya que inciden directamente en la aparición de los defectos por malas prácticas en el proceso de centrifugado.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el transcurso del seguimiento realizado en planta y teniendo en cuenta las acciones correctivas, se evidencia una disminución del producto NC que pasó de 16,7% en septiembre a 10,4% en diciembre.

Es importante seguir con la implementación del seguimiento del producto NC en la planta, ya que permite tener con mayor asertividad de los defectos que se presentan y con base a esto implementar un plan de contingencia para atacarlo, o en otras palabras validar en que se está fallando o dejando de hacer.

La contribución del producto rechazado por dureza, mostró una disminución en el trascurso del tiempo, lo que ratifica que el proceso de inoculación presentaba fallas.

Se recomienda implementar el monorriel y realizar el proceso de inoculación en él (crisol que reparte la colada a cada celda de centrifugado) ya que es más eficiente realizar la inoculación en el monorriel, y/o en la cuchara de vaciado directamente, con esto se está garantizando el porcentaje de inoculante, ya que se trabaja sobre un volumen base. Mientras que cuando se agrega en el crisol principal o basculante directamente, no se puede garantizar el porcentaje de inoculante, ya que como el proceso es continuo el volumen de la colada varía constantemente.

En términos de dureza, el inoculante utilizado con mejores resultados, es el IM-22, ya que provee al hierro gris una dureza promedio de 100,6 HRB lo que equivale a 241HB, que es la dureza que pretende la empresa.

Es significativo la disminución de la zona de chill o carburos, cuando se inocula con 0,3%, lo que significa menor cantidad de carburos en el producto, lo que facilita la maquinabilidad de este, esta disminución se puede evidenciar en los ensayos de la cuña realizados.

Se muestra una mejor distribución de las hojuelas de grafito con el inoculante IM-22, ya que en la parte central e interna se nota una mejor distribución y obtención de grafito laminar tipo A que es lo que se pretende obtener.

Con los ajustes del proceso de inoculación se evidenció una mejora en los problemas de durezas que se presentaban el proceso de mecanizado, el cual se puede disminuir en aproximadamente 5%.

Es importante mencionar que se puede disminuir aún más el NC relacionado a mecanizado, con intervenciones puntuales a las máquinas y con una mejor capacitación a los operarios

La humedad o porosidad es la principal causa de no conformidad que se presenta en planta, este problema es algo complejo, lo que conlleva a un estudio más complejo. En los anexos se plantea esta dificultad y como se puede abordar.

Es importante validar la preparación de la pintura, en términos de los principales componentes que la conforman y si cumple las condiciones estándares de preparación.

Como se tienen algunas teorías con respecto a la pintura utilizada es importante realizar un análisis termogravimétrico TGA¹ y validar si existen pérdidas de masas a las temperaturas de trabajo que se presentan en la empresa.

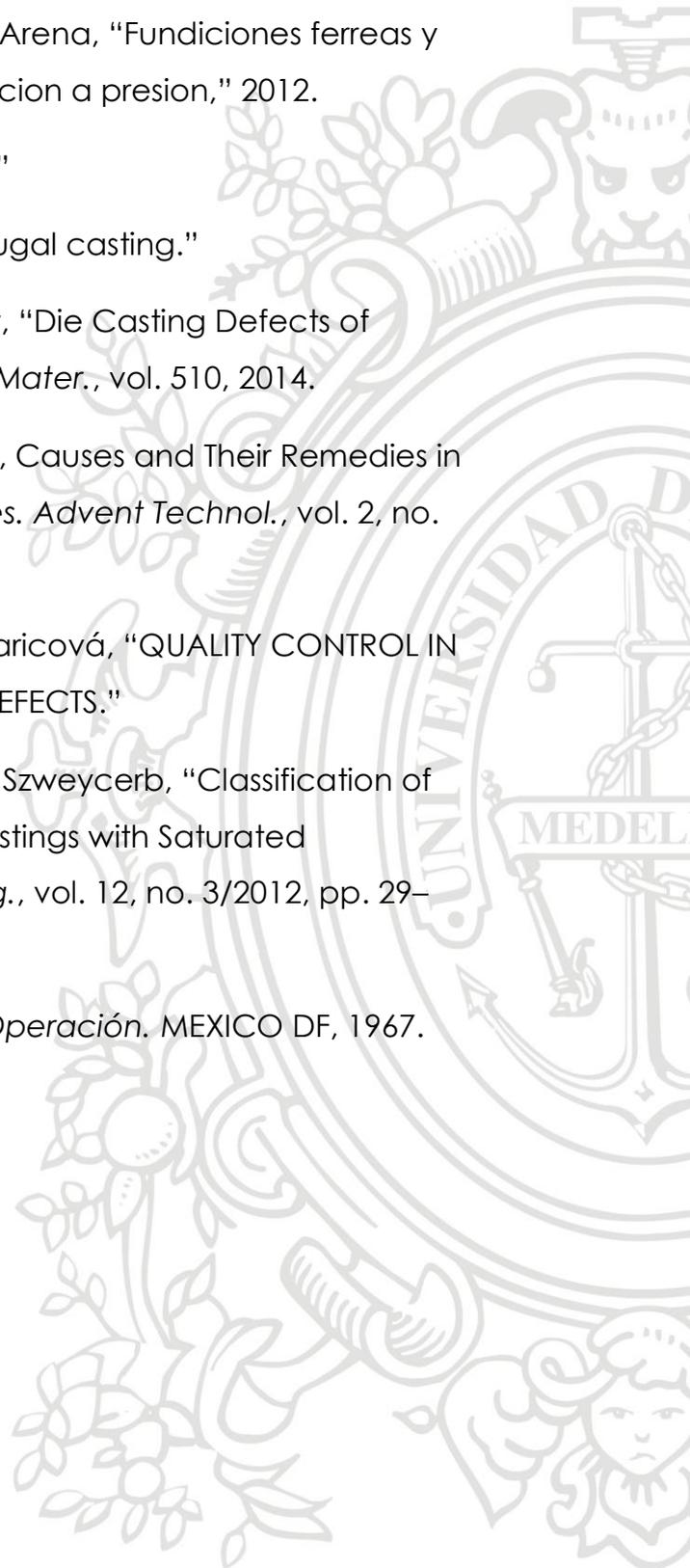
¹ El análisis térmico comprende un conjunto de técnicas que analizan el cambio de comportamiento de una muestra, cuando ésta está siendo sometida a un proceso programado de temperatura en atmósfera controlada: calefacción, enfriamiento o isoterma. El objetivo es establecer una relación entre la temperatura y las propiedades físicas del material.

8 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] N. Técnica, *NTC 1448*, no. 571. 2007.
- [2] C. Navarro mesa and R. Aristizabal, "DESARROLLO DE UN HIERRO GRIS AUSTEMPERADO Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN LA MICROESTRUCTURA Y EN ALGUNAS PROPIEDADES MECÁNICAS," UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 2014.
- [3] F. . BELZUNCE, "Aceros y Fundiciones," *Univ. Oviedo*, p. 215, 2001.
- [4] P. A. ESPITIA *et al.*, "Efecto de la utilización de carburo de silicio como agente inoculante en las propiedades microestructurales y mecánicas de los hierros grises .," no. December, 2011.
- [5] H. D. Machado Gonzales, "EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL FADING UTILIZANDO CARBURO DE SILICIO METALÚRGICO COMO AGENTE INOCULANTE EN HIERROS GRISES," Universidad de Antioquia, 2014.
- [6] L. Collini, G. Nicoletto, and R. Konecna, "Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron," *Mater. Sci. Eng. A*, no. 2008, pp. 529–539, 2007.
- [7] ASTM, "Gray Iron Castings 1," *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, vol. 03, no. Reapproved 2008, pp. 1–5, 2000.
- [8] W. Conshohocken, "Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings 1," pp. 1–13, 2017.
- [9] R. L. M, "EVALUACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA DE LOS DEFECTOS MAS COMUNES EN LAS FUNDICIONES GRISES Y NODULARES," 2010.
- [10] N. RODRIGUEZ GALVIS, "ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUENCIAN LA APARICIOND EDEFECTOS DE FUNDICION EN LAS

CAMISA CENTRIFUGADAS DE LA LINEA INDUSTRIAL EN INDUSTRIA LAVCO," UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2008.

- [11] F. Ferreas, Y. N. O. Ferreas, and E. N. Arena, "Fundiciones ferreas y no ferreas en arena, coquilla y fundicion a presion," 2012.
- [12] N. JANCO, "CENTRIFUGAL CASTING."
- [13] A. M. Joshi and M. Science, "Centrifugal casting."
- [14] J. Paško, Š. Gašpár, and J. Ružbarský, "Die Casting Defects of Castings from Silumin," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 510, 2014.
- [15] R. Rajkolhe and J. G. Khan, "Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review," *Int. J. Res. Advent Technol.*, vol. 2, no. march 2014, 2014.
- [16] A. Pribulová, M. Bartošová, and D. Baricová, "QUALITY CONTROL IN FOUNDRY – ANALYSIS OF CASTING DEFECTS."
- [17] K. Gawdzińska, D. Nagolska, and M. Szweycerb, "Classification of Structure Defects of Metal Matrix Castings with Saturated Reinforcement," *Arch. FOUNDRY Eng.*, vol. 12, no. 3/2012, pp. 29–36, 2012.
- [18] A. F. AFS, *El horno de cubilote & su Operación*. MEXICO DF, 1967.



9 ANEXOS

9.1 Anexo 1: Teorías enmarcadas en el control de la humedad y las bombas del proceso de fundición.

La humedad como es llamada en la empresa, es la principal causa de NC encontrada en los procesos de mecanizado, en terminos técnicos se conoce como porosidad, que es generada por los gases atrapados a la hora de solidificación del metal fundido (ver figura 19).



Figura 19: Camisa porosa encontrada en el proceso de mecanizado

En el proceso de fundición se evidencia un fenómeno llamado bomba el cual se presenta en forma de roseta dentro del tubo o en forma de ampolla ver figura 20.

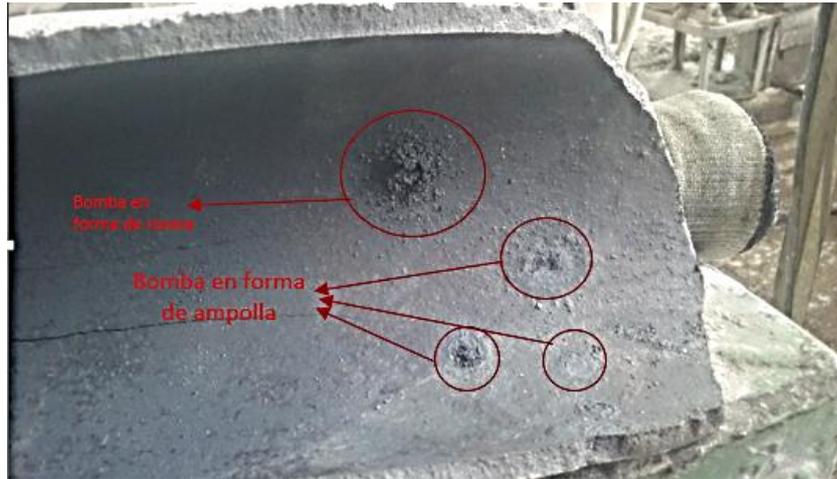


Figura 20: Las bombas, en forma de rosetas y ampollas

En el proceso de fundición se evidencia este fenómeno en cada colada, unos días mas que otros, desde el punto de vista ingenieril pueden existir diferentes variables que son las causante de este defecto.

Las variable que se van a mencionar a continuación, son teorías generadas por lo observado en el proceso y las muestras obtenidas.

- **Temperatura de la colada:** Hace referencia a la temperatura de la colada a la hora de vacear, en la figura 21 se muestra las cavidades generadas por los gases atrapados, este fenómeno puede deberse a que la temperatura de la colada a la hora de vaciar no se encuentra a una temperatura indicada, lo que implica una solidificación mas acelerada y los gases no tienen tiempo de salir, así que quedan atrapados en el interior de la pieza. Adicional a esto se muestra sobre la superficie interna, zonas de "pequeñas olas o pequeñas rebabas" es decir, que por no tener la temperatura indicada no permite que haya una buena distribución y por ende no se obtiene una superficie uniforme

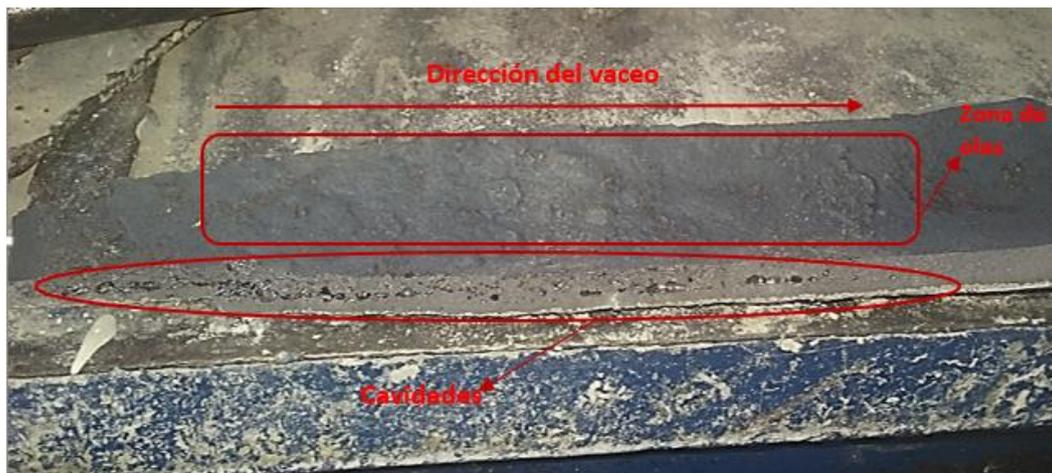


Figura 21: Cavitades generadas en el interior del producto

Es fundamental conocer la temperatura de la colada que sale del horno y adicional a esto conocer la temperatura de la colada a la hora de vaciar, esto es algo muy importante en terminos metalurgicos, ya que brinda informacion con respecto al material que se esta transformando. Lo mas recomendable para esto es un pirometro de inmersion el cual permite medir la temperatura de la colada y saber si esta en óptimas condiciones para su procesamiento.

- **Pintura:** La pintura utilizada en el proceso de fundición, cumple varias funciones, ella permite el desmoldeo y es un aislante entre el molde y la colada. Esta pintura es una mezcla de bentonita, silice, un surfactante² y agua.

² Un surfactante es un elemento que actúa como detergente, **emulsionante** o humectante y que permite reducir la tensión superficial que existe en un fluido. Por lo general se trata de sustancias que ejercen influencia en la zona de contacto que se crea entre dos fases.

A continuación se muestran las fichas técnicas de la bentonita y la sílice.

Tabla 10: Composición química de los materiales utilizados en la preparación de la pintura³

Componentes		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Bentonita sodica	% en peso	48,9	6.90-	16,8	0,69	2,16	1,60	0,49	-
		51,2	7,25	-	-	-	-	-	-
Arena sílice OL 200	% en peso	6	18,8	1,45	2,60	2,04	0,76	-	-
		93-97	0,2 max	2-4,5	0,1 max	0,1 max	0,1 max	0,1 max	0,2 max

La bentonita sodica según su ficha técnica tiene un porcentaje de humedad de 11,3-12% a una temperatura de 105°C y la sílice un % de humedad máximo de 0,5% (temperatura ambiente). Adicional a esto, la bentonita puede tener pérdidas por calcinación entre 7,38-7,74%.

Es importante tener en cuenta que la pintura que se utiliza entra en contacto inicialmente con el molde (el cual tiene una temperatura aproximada de 250-350°C) lo que permite que la pintura se adhiera a él, en ese momento se produce una liberación de humedad contenida en la pintura. Es importante validar que tanto se descompone la pintura al entrar en contacto con la colada, ya que se tiene varios componentes de óxidos en su composición química que al entrar en contacto con la temperatura pueden reducirse y generar gases.

³ Las composiciones de los insumos son suministradas por los proveedores.

Nota: Validar si para la preparacion de la pintura se tienen en cuenta la humedad intrinseca de los componentes utilizados.

- **Temperatura del molde:** Esta variable puede estar relacionada con la anterior. Se ha evidenciado que el defecto de las bombas se producen cuando la temperatura del molde esta muy alta, lo que puede generar una aceleracion en los gases encontrados o generados en el interior de la colada y en la interfaz colada pintura y por eso queda en forma de roseta.

La aceleración que se produce se genera por un aumento en la presión de los gases, debido a que al aumentar la temperatura del molde aumenta la presión del gas atrapado.

