



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

COLEGIO DE INGENIERÍA EN MATERIALES

Tesina:

“Análisis del impacto de la regeneración de arenas de fundición de hierro gris y nodular: mejora de parámetros de calidad”

Para obtener el título de
Licenciatura en Ingeniería en Materiales

Presenta:

Aranza Getsemani Garcia Jimenez

Director de tesina:

Dr. José Humberto Camacho García



Puebla, Pue

Mayo, 2025

Contenido

Resumen	6
Introducción	8
Objetivos	10
Objetivo general:	10
Objetivos específicos:	10
Hipótesis	10
Capítulo 1. Antecedentes	11
1.1 La industria de la fundición.	11
1.2 Arenas de moldeo.	12
1.3 Tipos de arena	13
1.3.1 Arena sílice	13
1.3.2 Arena zirconio	14
1.3.3 Arena cromita	15
1.3.4 Arena olivina	16
1.3.5 Arenas sintéticas	16
1.4 Mezcla de moldeo	16
1.5 Recuperación de arenas de fundición	17
1.5.1 Recuperación mecánica.	17
1.5.2 Recuperación térmica.	18
1.5.3 Recuperación húmeda	18
1.6 Ensayos de las mezclas de moldeo.	18
1.6.1 Granulometría, tamaño y forma de grano.	19
1.6.2 Permeabilidad	21
1.6.3 Contenido de humedad.	21
1.6.4 Contenido de arcilla.	22
1.7 Influencia de la arena en la calidad de las piezas terminadas.	22
1.8 Máquina SINTO-FBO ((Full Automated Blow-off)	23
Capítulo 2. Metodología	24
2.1 Primera fase: diagnóstico del método actual	24
2.1.1 Preparación de solución de azul de metileno.	24
2.1.2 Método de determinación de arcilla activa mediante azul de metileno.	25
2.1.3 Análisis granulométrico antes y después de lavar	27

2.1.4 Pruebas de compactación y permeabilidad.....	30
2.2 Segunda fase: regeneración mecánica	32
Capítulo 3. Resultados y discusión.....	34
3.1 Análisis granulométrico antes de las adecuaciones a los procesos.....	34
3.2 Prueba del azul de metileno.....	39
3.3 Resultados de las propiedades físicas	40
3.4 Índice de rechazo	41
Conclusiones	43
Bibliografía	44

Índice de figuras

Figura 1. Primeras herramientas fundidas (M. G. Piñero, “Edad del Hierro: historia,” Okdiario, 2020. [En línea]. Disponible en: https://okdiario.com/curiosidades/edad-hierro-historia-524948)..	11
Figura 2. Vista de las estufas del Alto horno 1 de Fundidora Monterrey (A. Esquivel Herrera, Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena, tesis doctoral, Univ. Nacional Autónoma de Nuevo León, 2010. [En línea]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/10352/1/36_altoshornos.pdf7)	12
Figura 3. Arena sílice (Finos y Granitos, “M20-40,” [En línea]. Disponible en: https://www.finosygranitos.com/productos/m20-40/).....	14
Figura 4. Arena de zirconio (Zirconium Sand, “Arenas de circon,” [En línea]. Disponible en: https://sp.zirconiumsand.com/product/arenas-de-circon/)	15
Figura 5. Arena cromita (South Metals, “Arenas,” [En línea]. Disponible en: https://south-metals.cl/arenas/).....	15
Figura 6. Arena olivina (South Metals, “Arenas,” [En línea]. Disponible en: https://south-metals.cl/arenas/).....	16
Figura 7. Tres tipos de morfología de los granos de arena a) grano redondo, b) grano subangular y c) grano angular (A. Esquivel Herrera, Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena, tesis doctoral, Univ. Nacional Autónoma de Nuevo León, 2010. [En línea]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/10352/1/36_altoshornos.pdf).....	20
Figura 8. Defectos principales de penetración de metal en el molde a) Superficie rugosa, b) Burn-on, c) Burn-in y d) Penetración de metal (J Z. Janjusevic et al., “A Contribution to Study of Processes on the Steel CastSand Mould Contact Surface during Casting, Materials Letters 45, 2000, pp. 234-235.)	22
Figura 9. Máquina SINTO-FBO (Sinto America, “FBO – Moldeadora de alta precisión,” [En línea]. Disponible en: https://sintoamerica.com/product/fbo/?lang=es).....	23
Figura 10. Thelco Precision Scientific Incubator Oven 31480 Modelo 2 (fotografía tomada por el autor)	25
Figura 11. Agua destilada y 5 ml de pirofosfato sódico al 2% (fotografía tomada por el autor)	26
Figura 12. Titulación de azul de metileno (fotografía tomada por el autor)	26
Figura 13. a) Toma de muestra y b) halos de azul de metileno. (fotografía tomada por el autor)	27

Índice de tablas

Tabla 1. Múltiplos correspondientes al número de criba	20
Tabla 2. Parámetros obtenidos antes de las estrategias implementadas	40
Tabla 3. Parámetros obtenidos después de las estrategias implementadas	41

Resumen

La regeneración de arenas residuales en los procesos de fundición representa un desafío importante en la actualidad, es un problema recurrente ya que la mala disposición de la arena puede impactar tanto en los costos de producción como en el medio ambiente. Este trabajo se centra en la implementación de un sistema de regeneración de arenas de moldeo en una empresa fundidora ubicada en el estado de Tlaxcala.

El objetivo principal fue reevaluar las arenas sílices usadas en la fabricación de piezas de hierro gris y nodular, se utilizó un proceso de recuperación mecánica que permitió reducir el consumo de arena nueva sin que las propiedades mecánicas y fisicoquímicas necesarias para el proceso de fundición se vieran afectadas. Se realizaron pruebas de control como la permeabilidad, la compactabilidad, la humedad y el azul de metileno para valorar la validez de la recuperación mecánica.

Las variables evaluadas mostraron una reducción obteniendo valores de permeabilidad de 230, una humedad del 5.3% y una compactabilidad del 34%. Estos datos evidencian que la arena, tras la regeneración, era perfecta para ser reutilizada en nuevos ciclos productivos.

Este análisis constata que la regeneración mecánica de arenas sugiere una opción posible para disminuir los gastos operacionales y minimizar los residuos industriales. La propuesta objetivó no solo optimizar el proceso productivo, sino también establecer un método de recuperación que pueda ser replicado por otras fundiciones.

Agradecimientos

A Dios, por nunca abandonarme y por permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres, por hacerme todo terreno, por darme pies sobre la tierra, por permitirme ser libre incluso cuando eso significó dejarme ir, porque sin ellos no sería la profesionalista que soy ahora.

A mis hermanos a y Mabel, por amarme y por ser parte de mí.

A el Dr. José Humberto Camacho García, por sus consejos durante toda la carrera y por su apoyo incondicional para poder escribir esta tesina.

A mis amigos Charly y Wences, gracias por ser mi fuente de inspiración en el mundo de la metalurgia, gracias por siempre animarme a convertirme en la fundidora que anhelaba ser.

A Abigail, por acompañarme en mi búsqueda inalcanzable de mi verdadero ser, por apoyarme incluso cuando quería ser arqueóloga, gracias por estar conmigo desde hace 11 años.

A Julio Castillo, porque la música siempre será nuestra aliada y porque tus acciones han ido más allá del deber.

Introducción

Las arenas de fundición son esenciales en el proceso de producción de piezas metálicas, son parte del molde en el que se vierte el metal fundido, este material debe poseer propiedades específicas para poder soportar el flujo de metal líquido y las altas temperaturas al que es expuesto. Existen múltiples tipos de arena, pero el más común es la arena de sílice debido a su disponibilidad y bajo costo, sin embargo, tiende a expandirse cuando está en contacto con altas temperaturas, lo cual puede provocar defectos en las piezas fundidas [1].

En la industria metalúrgica, específicamente en la fundición de metales colados como el hierro gris y nodular, la calidad y eficiencia de las piezas producidas dependen en su mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la arena que es utilizada en los moldes [2]. En una fundidora ubicada en el estado de Tlaxcala se emplea una máquina moldeadora horizontal automática de soplado y compactado de la serie FBO (Full Automated Blow-off) en su sistema de producción para la creación de moldes con o sin corazón. Se ha identificado que la arena de moldeo carece de las propiedades adecuadas para asegurar la calidad de las piezas producidas, esta carencia de parámetros establecidos en las propiedades como la permeabilidad, humedad y compactibilidad resulta en un índice alto de defectos superficiales en las piezas fundidas aumentando los costos asociados a este rechazo de producción.

Al analizar el índice de rechazo de la fundidora se encontró que, de toda la producción, el 29% de defectos son provocados por la mala calidad de la arena, estos rechazos incluyen: sopladuras, pegotes, caída de arena, darts, escape y sangrado de metal, pieza agrietada y sobre todo, superficies rugosas, cuando la arena es reciclada sin un tratamiento adecuado de regeneración, se acumulan contaminantes y residuos aglomerantes que disminuyen la calidad de las arenas de moldeo [3], esto se ve reflejado directamente en el tiempo de procesamiento, el consumo energético y en la cantidad de aditivos y aglomerantes ya que es necesario adicionar más materiales para compensar las pérdidas de propiedades físicas en la arena reciclada.

El proceso de regeneración de arena, que implica una serie de tratamientos físicos y químicos que restauran las propiedades de la arena, asegurando así que cumpla con las especificaciones técnicas del proceso de moldeo es fundamental para optimizar los recursos con los que cuenta la empresa, además de que reduce los costos de producción, mejora las

propiedades de la arena, disminuye los defectos en las piezas fundidas y aumenta la eficiencia del proceso de fundición, todo esto a su vez reduce el impacto ambiental provocado por la industria metalúrgica y mejora la calidad del producto final.

Es indispensable en la industria metalúrgica la regeneración de la arena en los sistemas de abastecimiento de una máquina FBO, gracias a las ventajas económicas y operativas que proporciona. La regeneración de arena posibilita la reutilización de hasta un 90% de la arena empleada al eliminar impurezas y residuos de material fundido que se hallen en la misma. Esto se refleja en los gastos operativos de la fundición y en la calidad de los componentes fundidos, ya que se reduce el índice de rechazos, optimizando así la producción.

Adicionalmente, la puesta en marcha de un sistema de regeneración de arena permite establecer parámetros de calidad relacionados con las propiedades de la arena, como la permeabilidad, la resistencia a la compresión y la compactabilidad. Esto es vital en máquinas de moldeo automáticas como las FBO, dado que necesitan que la arena posea propiedades estables para generar moldes exactos. Al aplicar un sistema de regeneración de arenas, la fundidora presentará un incremento en la eficiencia energética debido a que se requiere menos energía en la producción ya que las piezas toman menos tiempo en el proceso de granallado.

Este estudio busca generar conocimiento técnico aplicado en el control y optimización del sistema de regeneración de arenas, la información obtenida permitirá actualizar y modificar los manuales de operación estableciendo criterios más precisos para el monitoreo de parámetros críticos. Además, los resultados de este estudio contribuirán a la estandarización del proceso de moldeo, lo que facilitará la implementación de buenas prácticas en la fabricación de piezas de hierro gris y nodular, reduciendo la tasa de defectos y mejorando la eficiencia del proceso.

En la fundidora de estudio, el número de defectos provocados por arena en relación con la producción de metal líquido representa un reto que afecta la competitividad. Hoy en día, a través de la correcta interpretación de datos y la modificación de procedimientos en el laboratorio de arenas, es posible alcanzar un sistema de regeneración eficiente en las arenas de moldeo.

Este documento es pertinente para el sector de la fundición, que se enfoca en desarrollar un método de regeneración que posibilita disminuir la tasa de defectos y gastos de producción, proporcionando un modelo a seguir para otras compañías que aspiran a incrementar la calidad y eficacia de sus procesos a través del control y la regeneración de arena reciclada.

Objetivos

Objetivo general:

Analizar el impacto de la regeneración de arena en una moldeadora FBO utilizada en la fundición de hierro gris y nodular, para mejorar la calidad de las piezas fundidas, reducir el índice de defectos y minimizar los costos de producción en la fundidora “X”.

Objetivos específicos:

- Realizar ensayos de compactibilidad, permeabilidad, humedad e índice de azul de metileno a las arenas utilizadas en la fundidora “X” para diagnosticar su idoneidad y desempeño en el proceso.
- Implementar la eliminación de finos (impurezas y partículas metálicas) para restaurar las propiedades de la arena a niveles óptimos.
- Analizar los defectos superficiales antes y después de implementar el sistema de regeneración para determinar su efectividad.
- Desarrollar una guía de procedimientos estandarizados para el proceso de regeneración, detallando parámetros y frecuencias de pruebas de control para garantizar la consistencia de la calidad de la arena en cada ciclo de producción.

Hipótesis

La implementación de un sistema de regeneración de arena en una moldeadora FBO resultará en una disminución en el índice de defectos en piezas de hierro gris y nodular.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 La industria de la fundición.

La fundición de metales ha sido clave en el desarrollo de la humanidad, su historia comienza hace más de 5000 años, cuando las civilizaciones más antiguas descubrieron que los metales podían fundirse para crear herramientas y ornamentos, los primeros objetos metálicos pertenecen a la edad del cobre (5000 y 3000 A.C.), más tarde, con el descubrimiento del hierro (1200 A.C.), se marca el comienzo de la edad que lleva por nombre dicho metal, el hierro se convierte entonces en el material predominante en la fabricación de armas e instrumentos agrícolas [4].



Figura 1. Primeras herramientas fundidas (M. G. Piñero, “Edad del Hierro: historia,” Okdiario, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://okdiario.com/curiosidades/edad-hierro-historia-524948>)

Durante la revolución industrial, la metalurgia se transformaría gracias a la invención del alto horno, se crearon nuevas técnicas como: fundición en arena, fundición a la cera perdida, fundición por gravedad y fundición a presión, estas novedades en las técnicas de producción permitieron su aplicación en sectores estratégicos como la industria automotriz, aeroespacial y energética [5].



Figura 2. Vista de las estufas del Alto horno 1 de Fundidora Monterrey (A. Esquivel Herrera, Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena, tesis doctoral, Univ. Nacional Autónoma de Nuevo León, 2010. [En línea]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/10352/1/36_altoshornos.pdf)

Hoy en día, la industria de la fundición enfrenta retos como la producción eficiente, sostenibilidad y adaptación a las nuevas tecnologías, México es uno de los principales países productores de piezas fundidas en América Latina, la industria nacional se enfoca en la producción de piezas coladas (hierro gris y nodular) y acero.

La fundición ha sido un proceso trascendental para el desarrollo de la humanidad, su evolución hacia procesos de vanguardia asegura que seguirá siendo una industria esencial en el futuro.

1.2 Arenas de moldeo.

El control de las propiedades de las arenas es influyente pues se ha demostrado que las características finales de una pieza de metal dependen de las propiedades del molde [6], de modo que, los ensayos de control de calidad en las arenas son de vital importancia porque así se identifican innumerables defectos de fundición lo que a su vez permite una reducción de costos y tiempo de producción.

La arena es un material inorgánico compuesto de granos de mineral suelto, de tamaño aproximado de 0.05 a 2 mm de diámetro, el termino arena solo hace referencia al tamaño de grano y no a la composición química que integra a la arena [7], las arenas utilizadas en la industria fundidora toman su nombre en base a el mineral que está más presente en la

concentración de dicha arena, por ejemplo, la arena sílice, arena de zirconio, arena de cromita, etc. [8].

La arena es por excelencia el material de moldeo pues posee características óptimas como estabilidad térmica y dimensional a temperaturas elevadas, variedad de tamaños y formas, no reacciona químicamente con el metal fundido, composición y pH consistentes además de que es compatible con sistemas de aglutinantes [9].

De acuerdo con su procesamiento, las arenas se pueden clasificar en naturales y sintéticas, las naturales son aquellas que contienen suficiente arcilla de manera que al agregarles únicamente agua es posible crear moldes. Las arenas sintéticas son aquellas que están formadas por mulita, tienen una alta estabilidad térmica y baja expansión [10].

El tipo de arena que se desea usar para moldear se puede seleccionar de acuerdo con:

- La composición química
- Tamaño y forma del grano de arena
- La distribución granulométrica
- Compatibilidad con el sistema de aglutinación
- Estabilidad dimensional a temperaturas elevadas
- Su disponibilidad y su costo

1.3 Tipos de arena

1.3.1 Arena sílice

La arena sílice está formada fundamentalmente por granos de dióxido de silicio (SiO_2), se caracteriza por tener un comportamiento químico neutro, es un material versátil por su abundancia, variedad de tamaños y formas de grano, tiene propiedades refractarias, puede contener algunos compuestos que se llegan a considerar contaminantes, estos componentes se encuentran en un tamaño de malla mayores al número 140 (0.1041 mm), por lo que son insignificantes. La arena sílice es la más abundante en la naturaleza y constituye el 60% de corteza terrestre, además, es la más usada en la industria de la fundición debido a su bajo costo ya que es fácil de extraer de los depósitos naturales, sin embargo, para algunos procesos de fundición se ha desplazado este material pues tiene una expansión volumétrica pronunciada y presenta polimorfismo principalmente en la interfase molde/metal [6].



Figura 3. Arena sílice (Finos y Granitos, “M20-40,” [En línea]. Disponible en: <https://www.finosygranitos.com/productos/m20-40/>)

1.3.2 Arena zirconio

Está compuesta por silicato de circonio ($ZrSiO_4$), 67% circonio y 33% de sílice, tiene una dureza de 7.5 Mohs, una densidad de 4.7 kg/dm^3 , presenta una conductividad térmica superior a la sílice y una muy baja expansión térmica [11]. Se usa en la fabricación de corazones y moldes que son sometidos a altas temperaturas o que tienen formas complicadas y delgadas, comúnmente se aglomera con bentonita y resinas y permite obtener piezas con muy baja rugosidad, pero su costo es elevado, su índice de finura es 120 a 140 AFS lo cual indica que se trata de una arena muy fina. El valor AFS (por sus siglas en inglés, American Foundry Society) representa un promedio ponderado del tamaño de las partículas de arena, este índice permite clasificar la arena según su finura para así usarla adecuadamente según los requerimientos de las piezas a fundir.



Figura 4. Arena de zirconio (Zirconium Sand, “Arenas de circon,” [En línea]. Disponible en: <https://sp.zirconiumsand.com/product/arenas-de-circon/>)

1.3.3 Arena cromita

Es un óxido de cromo ($\text{FeO}:\text{Cr}_2\text{O}_3$), normalmente tiene un contenido de 68% de óxido de cromo, puede estar combinado con otros óxidos como MgO , FeO , MnO y ZnO , presenta una dureza de 5.5 Mohs y una densidad de 4.55 kg/dm^3 , esta arena se caracteriza por no presentar reacción química a alta temperatura, además de tiene una expansión térmica inferior a la arena sílice, por su elevado costo, esta arena solo se emplea en la producción de piezas especiales tales como acero al cromo, cromo-níquel y acero al manganeso [12].



Figura 5. Arena cromita (South Metals, “Arenas,” [En línea]. Disponible en: <https://south-metals.cl/arenas/>)

1.3.4 Arena olivina

Es un ortosilicato de color verde (Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4), debido a que esta arena es producto de la trituración de la fosforita, solo se puede obtener en formas angulares, posee una conductividad térmica mayor a la arena sílice y menor a la arena cromita, se utiliza principalmente para el moldeo de aceros al manganeso debido a su alta resistencia a la penetración y ataque químico [13].



Figura 6. Arena olivina (South Metals, "Arenas," [En línea]. Disponible en: <https://south-metals.cl/arenas/>.)

1.3.5 Arenas sintéticas

Están constituidas principalmente por mulita (aluminosilicatos naturales $2SiO_2:3Al_2O_3$) en formas esféricas, tienen alta estabilidad térmica y baja expansión, presentan gran porosidad y su costo es muy elevado [6].

1.4 Mezcla de moldeo.

Se conoce como mezcla de moldeo a los materiales inorgánicos como la arena, sílice, aglutinantes y agua, cuya estructura depende del método de moldeo, el tipo de material que se introduce en el molde, la masa y la forma de la pieza. Esta mezcla debe poseer características específicas para asegurar la calidad de las piezas finales. Entre estas propiedades se incluyen:

- **Plasticidad:** Capacidad que le permite a la arena deformarse sin presentar grietas al someterse a algún esfuerzo mecánico, esta característica depende de la cantidad de agua presente en la mezcla.

- **Resistencia:** Existen dos tipos de resistencia, en estado húmedo (resistencia en verde) y estado seco. La resistencia en verde es la que soporta la solidificación de la pieza, entre mayor es la humedad menor será la resistencia, la resistencia en seco es la resistencia necesaria para mantener la forma después de haber sido la arena sometida a un proceso de secado con el propósito de mejorar las propiedades.
- **Homogeneidad:** Es la distribución uniforme de componentes en la mezcla de moldeo.
- **Durabilidad:** Capacidad de la mezcla de conservar sus propiedades durante la repetición de las coladas.

1.5 Recuperación de arenas de fundición.

El nivel de residuos industriales originados por la industria metalúrgica ha aumentado en años recientes gracias a los avances en los procesos de producción, debido a que se ha tenido que aumentar la capacidad de fabricación, mejorar la eficiencia de los ciclos de producción y ampliar el catálogo de aleaciones y productos metálicos, como resultado de esto, se ha incrementado el uso de materias primas como arenas, fundentes, escorias y productos químicos, lo que genera una mayor cantidad de residuos que contienen metales pesados o compuestos que requieren un manejo especializado, respecto a esta situación, existen dos opciones factibles: reducir la producción de desechos desde el inicio o fomentar acciones que promuevan su reutilización y reciclaje, como se explicó en el apartado “*tipos de arena*” de este documento la composición de las arenas utilizadas en el proceso de fundición varía a través de las etapas del proceso de fusión, los materiales empleados y las tecnologías utilizadas.

Hay dos vertientes en las cuales se ha demostrado que las arenas provenientes de la fundición pueden ser usadas nuevamente; la reutilización, que implica su recuperación para ser utilizadas de nuevo en el mismo procedimiento, y el reciclaje, que tiene como fin a proporcionarles un uso distinto [14]. En la actualidad, existen tres procedimientos para recuperar estas arenas:

1.5.1 Recuperación mecánica.

Durante el proceso de recuperación mecánica, la arena se somete a una técnica de abrasión en la cual los aglomerados se desintegran en partículas individuales y los restos de

resina adheridos se separan de los granos de arena. Este proceso no elimina la totalidad de los residuos de resina de las partículas de arena, además de que las propiedades de reaglomeración de la arena son inferiores en comparación con las propiedades de una arena nueva, por lo que las arenas que son recuperadas mecánicamente pueden llegar a tener un uso muy limitado [15].

1.5.2 Recuperación térmica.

Proceso en el cual la arena se calienta a una temperatura suficientemente alta para separar cualquier residuo de aglomerante que esté presente en la mezcla de moldeo, para esto, se emplean unidades rotativas con quemadores las cuales son alimentadas con toneladas de arena usada o arena triturada [15].

Este proceso es mucho más eficiente que el anterior ya que los procesos mecánicos no eliminan por completo los productos que van siendo absorbidos por la arena durante los procesos sucesivos de fundición, esto hace que las arenas se vayan deteriorando progresivamente hasta saturarse y hacerlas inservibles [15].

1.5.3 Recuperación húmeda

El proceso consiste en lavar la arena utilizando solventes para eliminar los aglutinantes presentes. Durante esta operación, la arcilla suelta se suspende fácilmente en el agua, lo que permite que los residuos de aglutinantes se separen de manera efectiva mediante el lavado. Este método de recuperación es más eficiente que otros procesos, ya que la arena obtenida alcanza un nivel de pureza y limpieza comparable al de la arena nueva.

Sin embargo, este procedimiento presenta algunos desafíos operativos, como el elevado consumo de agua y la necesidad de recircularla para minimizar el desperdicio. Además, requiere disponer de grandes espacios para la instalación de los equipos necesarios. [15]

1.6 Ensayos de las mezclas de moldeo.

Al conocer las propiedades de la arena (compactabilidad, permeabilidad, humedad y el contenido de arcilla presente), se puede determinar si la arena cuenta con las propiedades químicas y físicas adecuadas para ser empleada en el proceso de moldeo, de esta manera se pueden ajustar parámetros de los aditivos para obtener mejores resultados además de prevenir

defectos como sopladuras, porosidades, deformaciones, etc. Al realizar estas pruebas de manera regular, se puede garantizar que las piezas fundidas cumplan con los requisitos de diseño y que se reduzcan los rechazos.

A continuación, se muestran las principales características que debe cumplir para su utilización en la industria de la fundición

1.6.1 Granulometría, tamaño y forma de grano.

El propósito de esta prueba es determinar la distribución del tamaño de partícula y estimar el promedio del tamaño de tamiz de la arena utilizando tamices de pruebas estándar, es comúnmente expresado como el número AFS que es una nomenclatura designada por la Sociedad Americana de Fundidores (AFS por sus siglas en inglés). El resultado de este método indica si la arena es de tipo gruesa, mediana o fina, es decir, muestra que tan presente esta la aglomeración en el sistema de arena verde. [16]

La arena se considera gruesa cuando tiene un AFS menor a 45, esta arena tiene una menor área de superficie: la principal ventaja que presentan las arenas gruesas es que se necesita una menor cantidad de resina para recubrir el grano. La arena fina corresponde a un AFS mayor a 55, esta arena tiene una mayor área de superficie por lo que sucede todo lo contrario a la arena gruesa, la arena fina tiene requerimientos altos de resina y mayor suciedad del molde [12].

El método AFS se debe realizar con una muestra seca de arena, para este procedimiento se utiliza un equipo llamado RO-TAP que consta de un grupo de tamices o cribas apiladas según el grosor de la malla (del más grueso al más fino), debajo de todas las cribas se coloca una bandeja recolectora llamada PAN, esta bandeja recolecta las partículas más finas que logran pasar incluso por la criba más fina (malla #270).

En el RO-TAP se coloca la muestra de arena de aproximadamente 50 g y que se someten a vibración por 15 minutos, de esto se obtiene el peso retenido en cada tamiz, después de vibrar y sumar los pesos retenidos, se multiplica por el múltiplo mostrada en la *tabla 1* [17].

Tabla 1. Múltiplos correspondientes al número de criba

Numero de criba	Múltiplo
6	0.03
12	0.05
20	0.1
30	0.2
40	0.3
50	0.4
70	0.5
100	0.7
140	1
200	1.4
270	2
PAN	3

Para determinar la forma de grano se observa bajo microscopio una cierta cantidad de arena seca, se dispersa sobre una superficie lisa y clara que permita determinar la esfericidad y redondez y de esta manera saber el tipo de granos presentes en la mezcla de moldeo.

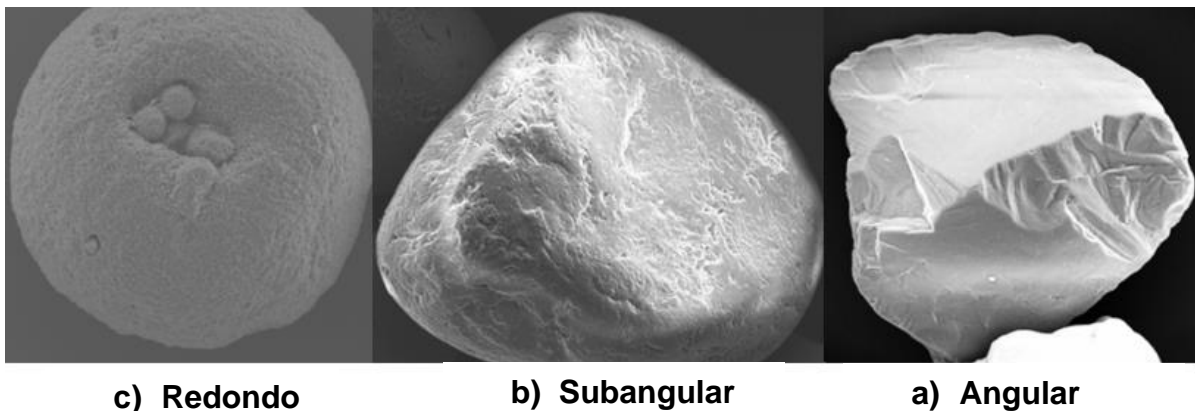


Figura 7. Tres tipos de morfología de los granos de arena a) grano redondo, b) grano subangular y c) grano angular (A. Esquivel Herrera, Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena, tesis doctoral, Univ. Nacional Autónoma de Nuevo León, 2010. [En línea]. Disponible en: http://eprints.uanl.mx/10352/1/36_altoshornos.pdf)

Los granos de arena pueden clasificarse por redondeados, subangulares y angulares (ver figura 7). Los granos redondos proveen el mejor arreglo de los poros conectados y

también la mínima relación área – volumen. Un grano redondo entonces proporcionará la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario al de tipo angular y subangular [18]

1.6.2 Permeabilidad

La permeabilidad mide la facilidad con la que los gases pueden escapar a través de los granos de arena, los factores que afectan directamente esta característica son el tamaño del grano, distribución y tipo de grano de arena, la cantidad de aglutinante, la densidad a la cual la arena verde ha sido apisonada, un contenido de arcilla elevado, así como el contenido de humedad.

La baja permeabilidad origina una superficie lisa de fundición, pero también causa burbujas y defectos de expansión. La alta permeabilidad resulta en la penetración mecánica y un acabado de superficie áspero, una buena permeabilidad es esencial para evitar defectos que son generados durante el vaciado y la solidificación del metal, la permeabilidad afecta la velocidad a la que el metal se solidifica, lo que influye en las propiedades mecánicas de la pieza [1].

1.6.3 Contenido de humedad.

Esta prueba es utilizada para determinar el porcentaje de humedad de la arena del molde. El contenido de humedad de un sistema de moldeo debe mantener un rango estrecho de valores ya que la cantidad de agua presente en el molde afecta la plasticidad del enlace de arcilla, el exceso de humedad produce una atmosfera oxidante lo que promueve una evolución excesiva de gases y provoca una mala permeabilidad, mantener el contenido de agua bajo asegura altas propiedades de aglutinación; todas las propiedades de resistencia bajan drásticamente cuando el contenido de humedad presente en la arena es alto, por ejemplo, si obtenemos una resistencia a la tracción en verde demasiado baja se produce un mal desmoldeo y rotura de moldes, una resistencia a la compresión demasiado baja da problemas en el manejo de moldes y una cavidad de molde inestable, una resistencia a la tracción en húmedo demasiado baja provoca la desintegración del molde y por ende, un alto índice de defectos de expansión de arena [19]

Los factores más importantes que afectan el requerimiento de humedad son el tipo y cantidad de arcilla, así como el tipo y la cantidad de aditivos en la mezcla de arena verde.

1.6.4 Contenido de arcilla.

Esta prueba mide la cantidad de arcilla presente en una muestra de moldeo, se determina la cantidad de iones cambiabiles presente en la arcilla activa por la adsorción de colorante de azul de metileno. La arcilla que sigue teniendo capacidad cambiabie de iones contribuirá a las propiedades de resistencia de arena seca y en verde. Un contenido inadecuado de arcilla puede provocar problemas como el desmoronamiento del molde o la formación de defectos en la pieza fundida [20].

1.7 Influencia de la arena en la calidad de las piezas terminadas.

La arena regenerada afecta directamente las características de los moldes producidos y por ende, la calidad del hierro fabricado (figura 8), además de que se mantiene estable parámetros clave como la permeabilidad, compactabilidad y absorción de humedad, esta arena puede ser utilizada en la fundición de hierro gris y nodular sin comprometer las propiedades mecánicas y metalúrgicas de los productos terminados, la regeneración adecuada ayuda a mantener una microestructura uniforme en el hierro gris, reduciendo la formación de carburos indeseables [21].

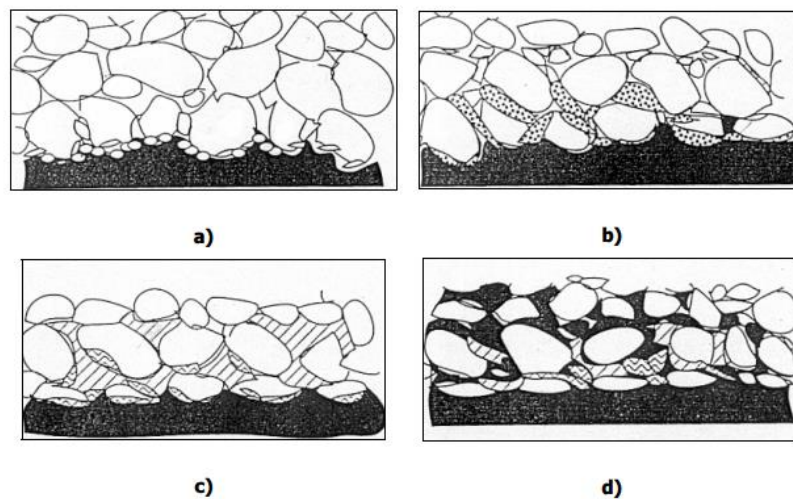


Figura 8. Defectos principales de penetración de metal en el molde a) Superficie rugosa, b) Burn-on, c) Burn-in y d) Penetración de metal (J Z. Janjusevic et al., "A Contribution to Study of Processes on the Steel CastSand Mould Contact Surface during Casting, *Materials Letters* 45, 2000, pp. 234-235.)

1.8 Máquina SINTO-FBO ((Full Automated Blow-off))

Las máquinas SINTO FBO son máquinas moldeadoras sin caja en la industria de la fundición, el proceso de moldeo se realiza en posición horizontal que facilita la extracción del diseño de la pieza y la compactabilidad de la arena, esta compactación se logra mediante un flujo de aire a alta presión lo que garantiza una densidad uniforme y una alta resistencia del molde. Las ventajas más destacables de las máquinas es que reducen los tiempos de ciclo y se aumenta la productividad, además de que permite una amplia variedad de producción de piezas fundidas, desde pequeñas hasta grandes y con geometrías complejas.



Figura 9. Máquina SINTO-FBO (Sinto America, “FBO – Moldeadora de alta precisión,” [En línea].

Disponible en: <https://sintoamerica.com/product/fbo/?lang=es>)

Capítulo 2. Metodología

En este capítulo se explica el desarrollo experimental de esta investigación la cual se divide en 2 partes, en la primera fase se identificaron las deficiencias en la realización de las pruebas en el laboratorio de arenas de la fundidora de estudio ya que se han ejecutado de una manera inconsistente a los métodos establecidos por la American Foundry Society (AFS) además de la implementación de una nueva metodología alineada con las prácticas de la AFS para realizar las pruebas mecánicas, garantizando resultados más confiables y repetibles, posteriormente, finalmente se continuará en la segunda fase con la regeneración mecánica para eliminar los finos y mejorar las propiedades de la arena, asegurando su reutilización en la fundición.

2.1 Primera fase: diagnóstico del método actual

En la fundidora de estudio se realizan diferentes pruebas diarias y semanales para asegurar la calidad de la arena, sin embargo, se descubrió que la metodología empleada no se encontraba estandarizada con las normativas AFS, se detectó que la preparación de la solución usada para las pruebas químicas y la metodología de las pruebas físicas se realizaban de una manera incorrecta, por lo que se recurrió a bibliografía de la American Foundrymen's Society, específicamente los métodos 210-87-s, 211-87-s, 110-87-s, 106-87-s y 105-87-s donde se pudo obtener información real acerca de la correcta realización de dichos procesos.

2.1.1 Preparación de solución de azul de metileno.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, la prueba de azul de metileno mide la cantidad de arcilla activa presente en las arenas de moldeo, esta arcilla es aquella que no se ha quemado y tiene la capacidad de adherirse a los granos de arena, si no existiera una buena cantidad de arcilla activa ocasionaría el rompimiento de molde, dificultad para controlar la humedad y piezas deformes.

Anteriormente la preparación de la solución de azul de metileno se realizaba de una manera distinta a la descrita a continuación, la AFS indica que se deben de pesar 3.739 gramos de azul de metileno los cuales son transferidos a un matraz volumétrico de 1000 mililitros. A continuación, agregar aproximadamente 500 mililitros de agua destilada al matraz con los cristales, posteriormente introducir un agitador magnético y agitar por media hora, pasado

este tiempo, aforar el matraz con agua destilada y agitarlo por 30 minutos más , finalmente transferir la solución a un recipiente de vidrio color ámbar y permitir espesar 12 horas antes de usarse.

2.1.2 Método de determinación de arcilla activa mediante azul de metileno.

Asimismo, se identificó que existían variaciones en el procedimiento utilizado para determinar el contenido de arcilla activa presente en la arena de moldeo. Con el objetivo de estandarizar el método del azul de metileno, se implementaron las siguientes modificaciones en el protocolo experimental:

Se toma una muestra de 20 gr de arena de moldeo y se somete a secado en una estufa marca Thelco (figura 10) durante 2 horas a una temperatura de 110 °C. Una vez seca, pesar 5 gr de arena seca y transferirla a un matraz Erlenmeyer de 250 ml. A continuación, adicionar 50 ml de agua destilada y 5 ml de pirofosfato sódico al 2% (figura 11). La mezcla se lleva a ebullición durante 5 minutos, luego retirarla del calor y dejar enfriar a temperatura ambiente para continuar con el procedimiento de análisis.



Figura 10. Thelco Precision Scientific Incubator Oven 31480 Modelo 2 (fotografía tomada por el autor)

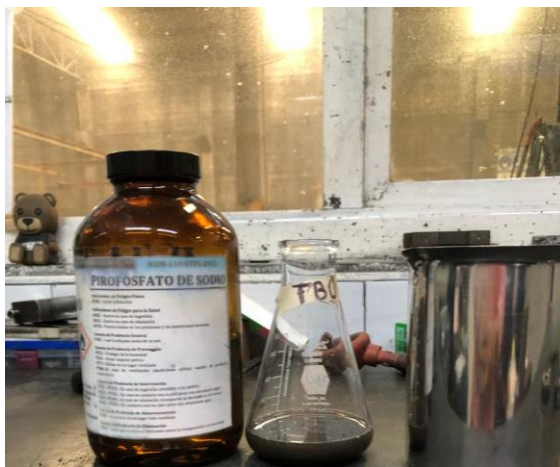


Figura 11. Agua destilada y 5 ml de pirofosfato sódico al 2% (fotografía tomada por el autor)

Una vez que la solución se encuentra fría, se agregan 2 mililitros de ácido sulfúrico y, posteriormente entre el 80-85% de los requerimientos de azul de metileno como se muestra en la figura 12 (montar previamente la cristalería usada para titular). El matraz se coloca sobre la parrilla de agitación durante 2 minutos, transcurrido el tiempo de agitación se retira la solución y se toma una muestra con la varilla de vidrio (figura 13-a), la cual se deposita en el papel filtro (figura 13-b) para poder comparar el halo azul con la ayuda visual que se muestra en la figura 14.

En caso de que el halo no se parezca a la referencia llamada “Good halo”, se continúa adicionando azul de metileno en incrementos de 2 mililitros, agitando la muestra durante 1 minuto por cada adición. Una vez que se alcance el halo de referencia (Good halo), se agita la solución durante un minuto adicional para confirmar que halo se mantiene estable.



Figura 12. Titulación de azul de metileno (fotografía tomada por el autor)

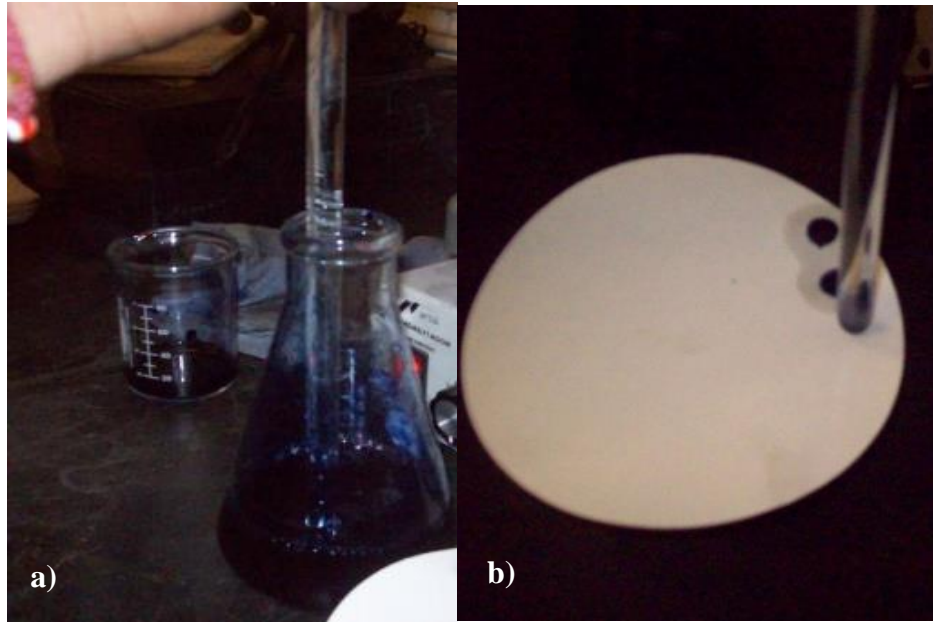


Figura 13. a) Toma de muestra y b) halos de azul de metileno. (fotografía tomada por el autor)



Figura 14. Ayuda visual (fotografía tomada por el autor)

2.1.3 Análisis granulométrico antes y después de lavar

En el capítulo 1 se mencionó que el propósito de este método es determinar la distribución del tamaño de grano y el porcentaje de finos en las arenas que participan en los procesos de moldeo, esta prueba es vital realizarla antes y después del lavado de arenas para identificar si el contenido de finos se redujo a partir del lavado. Anteriormente, el tiempo de vibración del equipo ROTAP era de 10 minutos lo que no aseguraba su correcta distribución

en cada una de las mallas. Con la bibliografía consultada, el proceso de la AFS correcto es el siguiente:

Se debe pesar 50 gramos de arena previamente seca y transferirla a el juego de tamices para determinar el tamaño de grano AFS. A continuación, colocar el equipo de análisis granulométrico ROTAP, programando un tiempo de operación de 15 minutos. Una vez finalizado este tiempo, retirar el juego de tamices del ROTAP para obtener el peso retenido por cada tamiz (registrar los pesos) y multiplicar por el múltiplo mostrado en la tabla 1 del capítulo 1, graficar los valores para obtener el tamaño de grano AFS.



Figura 15. Equipo ROTAP (fotografía tomada por el autor)



Figura 16. Cepillado de tamiz para obtener el peso retenido (fotografía tomada por el autor)

El lavado de la arena forma parte del análisis granulométrico, nos brinda información acerca del contenido de finos, los finos son todas las partículas menores a 0.02mm que cuando son mezclados con agua, no imparten resistencia ni plasticidad a la arena de moldeo, al contrario, sirven para reducirla. Inicialmente la prueba de lavado de la arena se realizaba de una forma contraria a la señalada en la literatura, los mililitros de pirofosfato utilizados como abrasivo eran menores a los recomendados en la bibliografía, además, el tiempo de mezclado y asentamiento era mucho mayor al sugerido. En la actualidad, se usan 25 mililitros de pirofosfato y la duración de mezclado y asentamiento es de 5 minutos. El procedimiento alineado a la American Foundry Society es el siguiente:

Se toma una muestra seca correspondiente a 50 gr de arena de moldeo y se transfiere a un vaso de precipitado de 1000 mililitros. A continuación, se adicionan 475 ml de agua destilada y 25 mililitros de solución de pirofosfato al 2%. La solución se coloca en la máquina de agitación durante 10 minutos (figura 17-a). Una vez transcurrido el tiempo de agitación, se enjuagan con agua destilada las aspas de la máquina para asegurar que todos los granos de la muestra estén dentro del vaso (figura 17-b), retirar el vaso y dejar reposar 10 min.

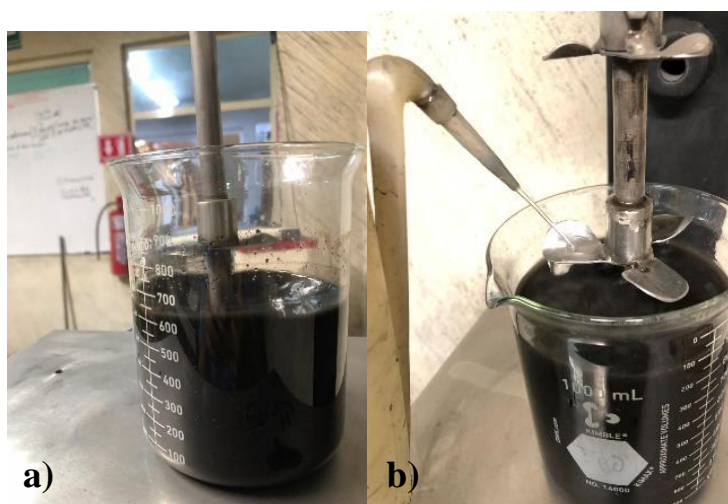


Figura 17. a) Agitación de la arena y b) limpieza de aspas (fotografía tomada por el autor)

A continuación, retirar el agua del vaso mediante sifonado. Posteriormente, se llena nuevamente el vaso hasta 900 mililitros con agua del grifo y se coloca en el agitador durante 5 minutos (el lavado del aspa se hará cada vez que se retire el vaso del agitador). El proceso de sifonado y agitación se repite las veces que sean necesarias hasta que el agua presente en

el vaso adquiriera un aspecto visualmente claro, lo que indica una limpieza efectiva del material en suspensión.



Figura 18. Sifonado (fotografía tomada por el autor)

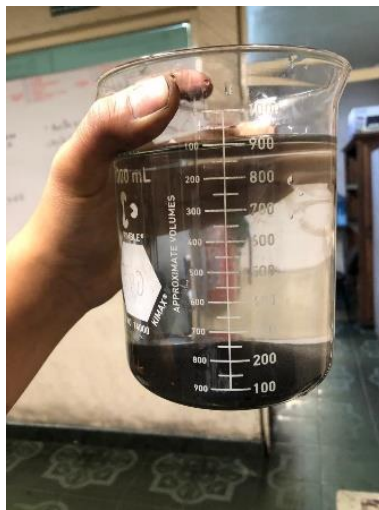


Figura 19. Clarificación de agua (fotografía tomada por el autor)

Finalmente, poner a secar la arena lavada en la estufa a una temperatura de 120-140 °C, pesar la arena seca y registrar le peso final, para después vaciar la arena en el juego de tamices para determinar el tamaño de grano AFS.

2.1.4 Pruebas de compactación y permeabilidad

La caracterización de las arenas de fundición es fundamental para asegurar la calidad final de las piezas producidas, entre las propiedades más importantes a considerar se

encuentran la compactabilidad y la permeabilidad ya que afectan directamente en las propiedades del molde, el control adecuado de estas dos pruebas puede prevenir defectos como inclusiones, sopladuras y llenado incompleto.

Para la realización de dichas pruebas no fue necesario modificar la metodología ya establecida por la fundidora del caso de estudio ya que los métodos muestran resultados consistentes, adaptables y replicables. El uso de equipos como compactómetro y permeámetro aseguró la repetibilidad de los ensayos realizados en la arena antes y después de regenerar.

Para la prueba de compactabilidad se tomó una muestra de 140 gramos aproximadamente con la cual se llenará el tubo del equipo, una vez lleno, se procede a aplicar tres golpes con el pistón para después medir la altura final del cilindro compactado, el valor obtenido representa el porcentaje de compactación de la arena de moldeo.

El permeámetro es un dispositivo digital que tiene una pantalla en la cual muestra el porcentaje de permeabilidad al colocarle el mismo cilindro de la prueba anterior, dicho tubo se conecta al permeámetro y se hace pasar un volumen de aire a través de la muestra de arena (que es igual 140 gramos), inmediatamente la pantalla muestra el nivel de permeabilidad de la mezcla de moldeo.



Figura 20. Compactómetro (Simpson Technologies, Simpson Analytics Catalog 2012 v2.8, 2012. [En línea]. Disponible en: https://spectechsnab.ru/dokumenti/Simpson_Analytics_Catalog_2012_v2_8.pdf)



Figura 21. Permeámetro (UMI, “Permeámetro digital,” [En línea]. Disponible en: <https://www.umi.es/productos/permeametro-digital/>)

2.2 Segunda fase: regeneración mecánica

Se sabe que la arena de la fundidora en cuestión presenta un alto índice de arcilla que no participa activamente en la arena de moldeo, dicha arcilla trae consigo un exceso de absorción de agua y bentonita. Una de las principales causas es la presencia excesiva de finos, después de evaluar todos los métodos de regeneración de arenas, se escogió la regeneración mecánica debido a que implica menor gasto energético y monetario.

Para no incidir en la producción de piezas metálicas, se decidió hacer la regeneración mecánica en 4 estrategias:

1. Estrategia de extractor de finos: Alrededor de la zona de moldeo se encuentran instalados unos extractores de finos los cuales no siempre son utilizados, estos extractores fueron diseñados para remover partículas sólidas (un tamaño mayor que 500 micrómetros) que son capaces de estar en suspensión temporal en el aire y así evitar la contaminación de las tolvas. Se propuso que los extractores estuvieran prendidos durante toda la jornada laboral para ver una mejora en el porcentaje de finos presente en las arenas de moldeo.
2. Estrategia de no retorno (eliminación de arena de piso): En el proceso de fabricación de moldes, una práctica común era barrer diariamente la zona de trabajo al final de la jornada laboral para recolectar la arena que se acumulaba en el piso. Esta arena se reincorporaba al sistema al ser vertida nuevamente en las tolvas de alimentación, sin embargo, esta práctica representaba un problema significativo, ya que la arena

recolectada contenía altos niveles de finos, provenientes de partículas suspendidas en el ambiente que se depositaban en la arena y fragmentos de arena quemada, óxidos y otros contaminantes generados durante el moldeo y vaciado. La reincorporación de esta arena contaminada al sistema provocaba un aumento progresivo de los finos, afectando negativamente las propiedades mecánicas de la arena y el rendimiento del proceso. La estrategia denominada "No Retorno" consistió en eliminar la reincorporación de arena de piso al sistema, para ello se recolectaron y almacenaron 3 toneladas de arena del piso acumuladas en la zona de moldeo, esta arena fue desechada en su totalidad, evitando que continuara incrementando la cantidad de finos en las tolvas.

3. Estrategia de arena nueva: para recompensar la arena eliminada se agregaron 12 kilos de arena nueva en cada carga de 500kg, esto se realizó cada tercer día para así no afectar la composición de la arena de moldeo.
4. Estrategia de capacitación del personal: Se brindaron sesiones informativas sobre las propiedades de la arena de moldeo (humedad, compactabilidad, permeabilidad, etc.) y su impacto en la calidad de los moldes y del producto final, también se explicaron las mejores prácticas para la manipulación de la arena regenerada, evitando contaminación cruzada con materiales externos, se informó al personal involucrado en las actividades de moldeo para mejorar el manejo de arenas, moldes y residuos, reduciendo incidencias operativas y promoviendo una gestión más eficiente de los recursos.

Capítulo 3. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, así como su análisis e interpretación. Se muestran las gráficas del análisis granulométrico antes y después del lavado de arena y la interpretación correspondiente a cada muestra, así como la determinación de la cantidad de arcilla activa y la comparación de las propiedades físicas de la arena antes y después de las estrategias implementadas. Finalmente, el trabajo concluye con las gráficas del índice del rechazo que presenta la empresa.

3.1 Análisis granulométrico antes de las adecuaciones a los procesos

A continuación, se muestran 3 graficas donde se pueden apreciar los distintos perfiles de la arena proveniente de la FBO.

Para analizar y poder entender el comportamiento que presentaba la arena de moldeo, era necesario tener una referencia confiable, dicho punto de partida debía ser un material cuya composición fuera conocida y sus propiedades constantes, se utilizó arena nueva (que no necesita pasar por el método de lavado porque no presenta contaminante alguno) como referencia.

Al utilizar arena nueva, se pueden identificar las diferencias generadas por el uso y regeneración de la arena en el sistema, permitiendo evaluar el impacto de los ciclos de reutilización, los efectos del desgaste ocasionados por las altas temperaturas a las cuales las arenas son sometidas y la eficiencia de los procesos de regeneración.

Esta referencia fue clave para establecer una línea base que facilito el monitoreo y control del sistema de arenas asegurando un análisis preciso.

En la figura 22, se observa que la arena presenta un mayor porcentaje de retención en las mallas que van del número 40 al 100. Esto es característico de una arena “virgen”, que se clasifica como de granulometría media a gruesa con un contenido mínimo de finos. Estas características influyen directamente en el desempeño de la arena durante los procesos de fundición.

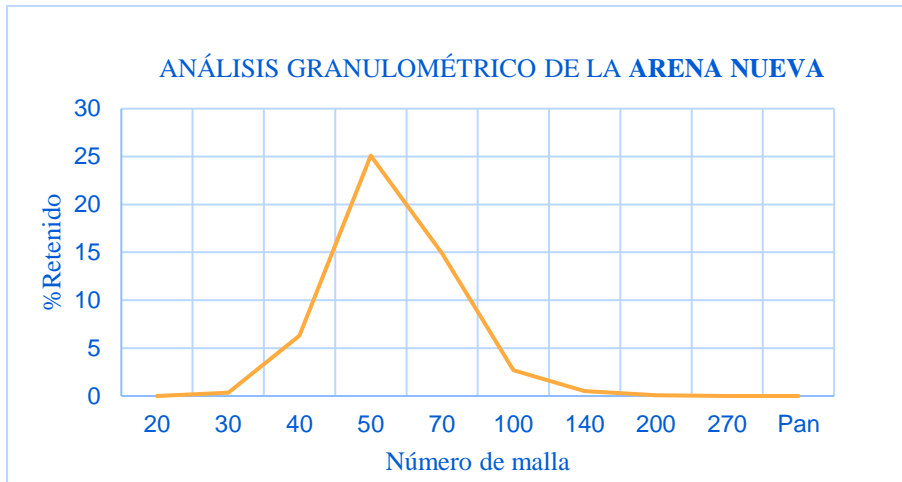


Figura 22. Análisis granulométrico de la arena nueva

Como se comentó anteriormente, el análisis granulométrico antes de lavar nos indica que tan aglomerada y contaminada se encuentra la arena de moldeo. El porcentaje de aglomeración que se muestra en la figura 23 empieza a presentarse desde la primera malla indicativo claro de que la arena es demasiado gruesa para los procesos de fundición

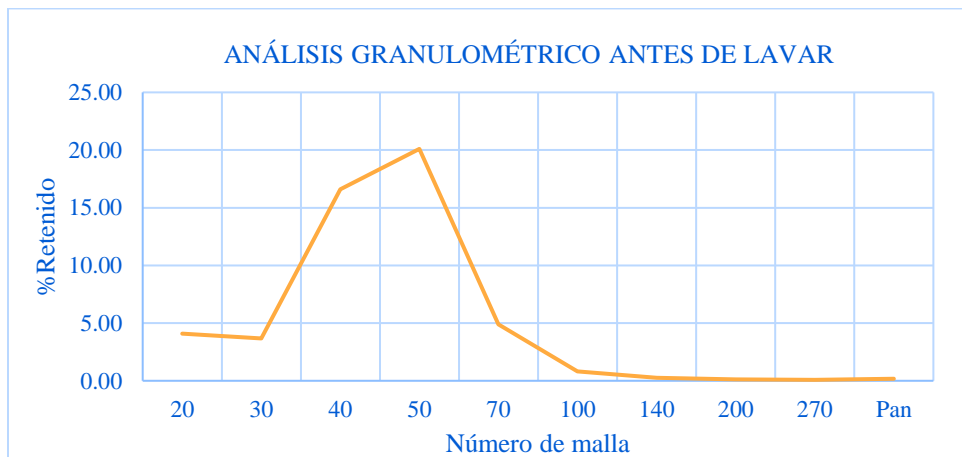


Figura 23. Análisis granulométrico antes de lavar

Tras el lavado de la arena, el análisis granulométrico mostrado en la figura 24 muestra que la distribución de los granos de arena se aproxima nuevamente al perfil característico de una arena nueva, es decir, hay más proporción de granos dentro del rango óptimo para procesos del moldeo. Este cambio sugiere que el lavado no solo es efectivo para eliminar impurezas superficiales, sino que también es eficaz para reducir significativamente el

contenido de finos (partículas menores a 150 micras y que tienden a afectar negativamente las propiedades de la arena) y mejorar la calidad granulométrica de la arena.

El efecto de este proceso contribuye a restaurar las propiedades físicas de la arena de moldeo al proporcionar una mejor distribución granulométrica, esto es fundamental para asegurar la fluidez del metal líquido y obtener mejores detalles en las piezas terminadas.

Al reducir la cantidad de finos presente en la arena de moldeo, también se disminuyen las zonas de acumulación de aditivos como la bentonita y carbón activo, propiciando así una mezcla homogénea que puede ser usada en cargas de producción posteriores. Por lo tanto, la similitud entre los perfiles granulométricos es un indicador confiable de que el proceso de lavado está siendo eficaz.

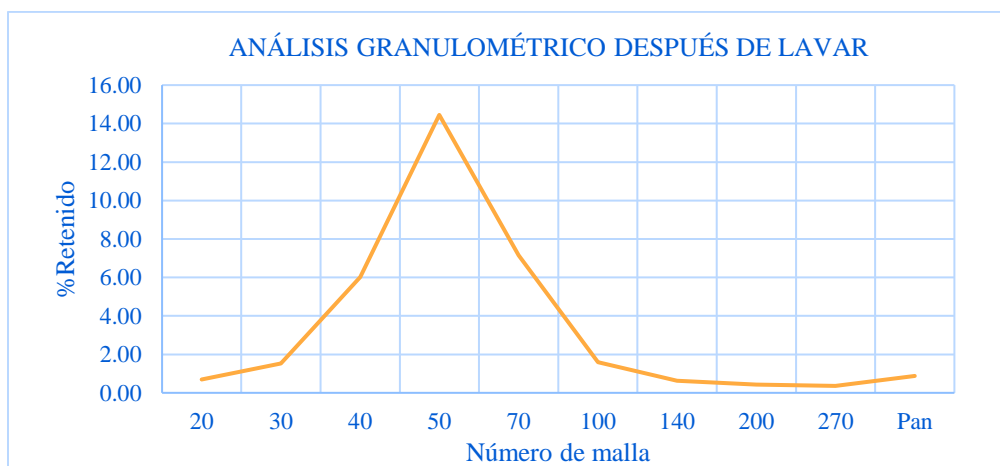


Figura 24. Análisis granulométrico después de lavar

Aunque las gráficas individuales brindan información valiosa, al superponerlas (figura 25) se puede visualizar con mayor claridad el comportamiento de la arena de moldeo en sus distintas etapas. Los perfiles granulométricos obtenidos presentan diferencias significativas; sin embargo, el perfil posterior al lavado (curva azul marino) es más similar a la curva de una arena nueva.

Este acercamiento de curvas se debe a la eliminación de contaminantes y partículas finas como la bentonita residual, así como fragmentos de cascarilla metálica adherida y residuos orgánicos que se acumulan tras múltiples ciclos de moldeo.

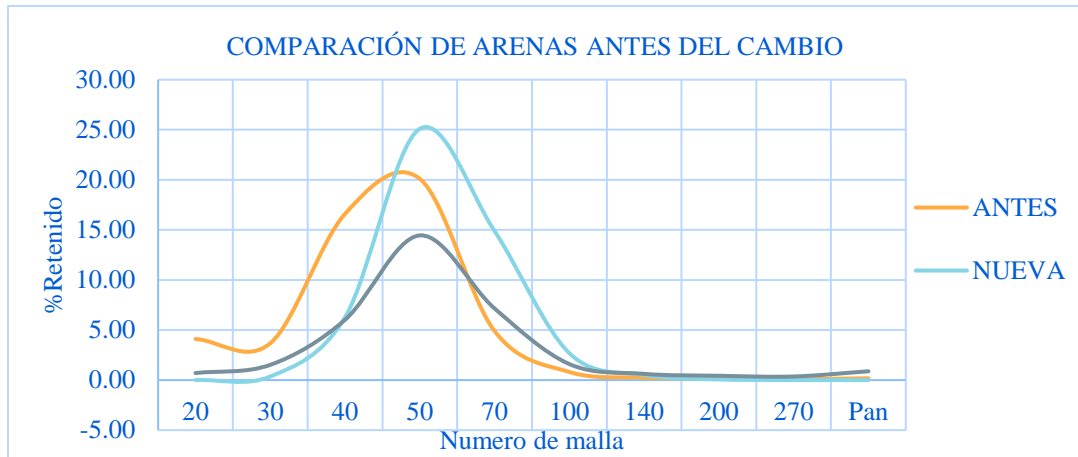


Figura 25. Comparación de los análisis granulométricos antes del cambio

Realizar estos estudios previos a la implementación de las 4 estrategias de regeneración era vital para saber el estado actual y real de la arena de moldeo de la FBO para, después de 3 semanas de prueba con la nueva metodología de trabajo, los resultados de los análisis granulométricos fueron los siguientes:

Después de 3 semanas en las cuales la cantidad de finos fue disminuyendo se puede notar en el análisis granulométrico que incluso antes de lavar, la arena comienza a mostrar un perfil más cercano al de la arena nueva, es decir, presenta una menor concentración de finos. Este comportamiento, comparado con lo observado en la figura 26, es evidencia de que las medidas de regeneración fueron eficaces. La mejora en la distribución granulométrica representa que las acciones correctivas están correctamente orientadas a la mejora de la calidad de la arena.

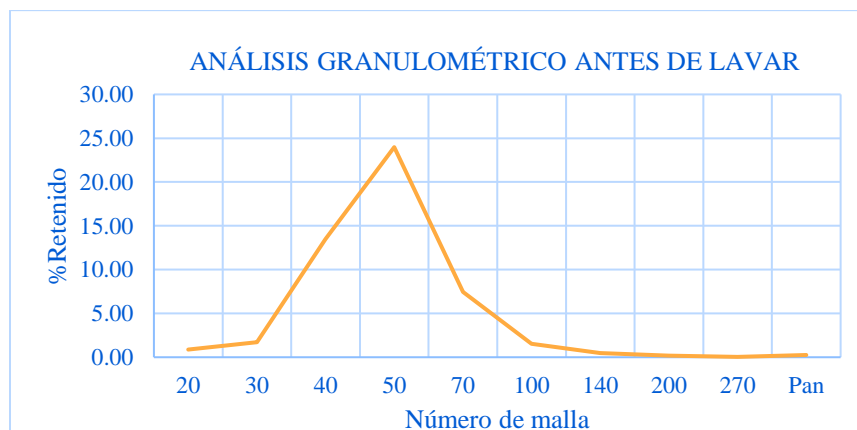


Figura 26. Análisis granulométrico antes de lavar

En la figura 27 se puede apreciar que después del lavado la arena tiene un perfil completamente regenerado, los porcentajes de retención son casi completamente nulos en las mallas grandes, mientras que el pico más alto de retención se encuentra en la malla 50.

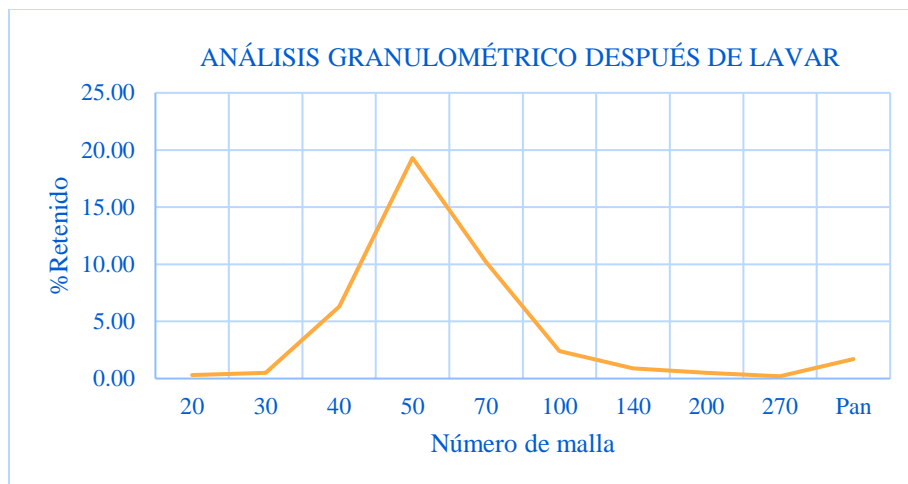


Figura 27. Análisis granulométrico después de lavar

La figura 28 muestra de manera clara el nivel de regeneración alcanzado por la arena utilizada en la máquina FBO. Los perfiles granulométricos de la arena, tanto antes como después del lavado, son muy cercanos a nuestra referencia de arena nueva. Este comportamiento es indicativo de que el ciclo de regeneración de la arena se está estabilizando y mejorando, logrando condiciones óptimas para su reutilización en los procesos de fundición.

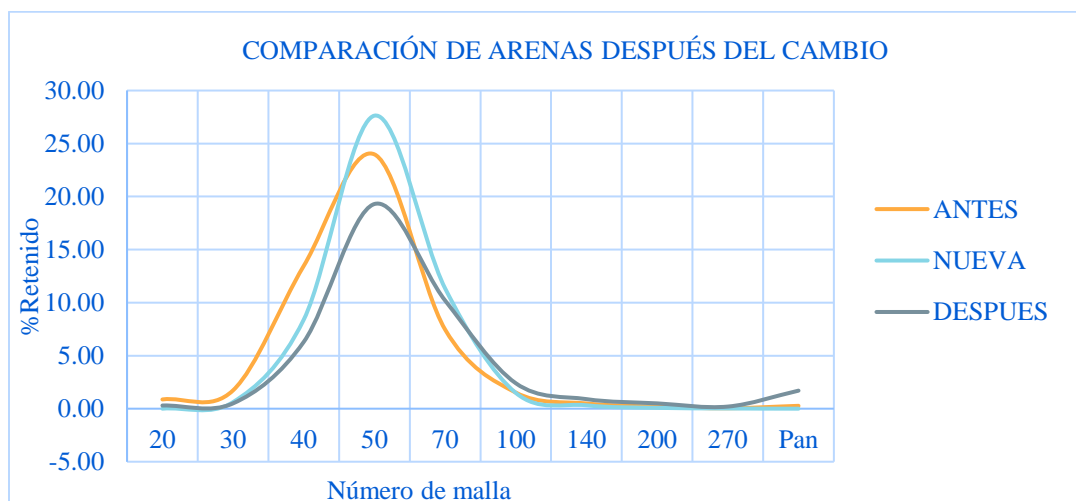


Figura 28. Comparación de arenas después del cambio

3.2 Prueba del azul de metileno.

Esta prueba se realiza de forma semanal en la empresa para tener un mayor control de la composición química de la arena, esto para saber la cantidad de aditivos que deben de tener, la cantidad óptima de arcilla depende del tipo de moldeo y las propiedades que se desean en la arena de moldeo, lo que, junto con los análisis granulométricos realizados antes del cambio, evidenciaba que la arena era demasiado gruesa, esto es una señal clara de la presencia excesiva de finos y de altos contenidos de bentonita. Durante las pruebas de azul de metileno, se determinó que el halo permanecía constante a los 64 mililitros (figura 29), lo que representa un consumo elevado de solución. Este resultado confirma una alta concentración de arcilla en la arena, lo que puede influir negativamente en su desempeño durante el proceso de fundición.

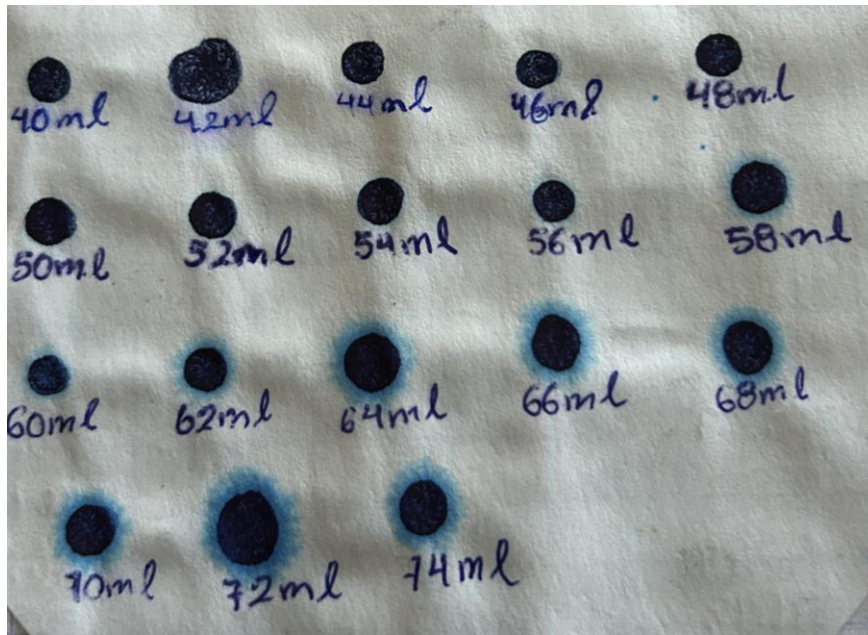


Figura 29. Mililitros gastados de azul de metileno antes de la mejora del proceso (fotografía tomada por el autor)

Tras las mejoras en los procesos, se observó una disminución en el número de mililitros utilizados de azul de metileno, el descenso en la cantidad gastada en la prueba indica una disminución en el contenido de arcilla o bentonita en la mezcla de arena de moldeo. Esto podría deberse a varios factores, debido a que se estuvo añadiendo arena nueva sin aumentar proporcionalmente la cantidad de bentonita, la concentración de arcilla en la

mezcla total se ha diluido, lo que provocó que la prueba mostrara un menor consumo de azul de metileno acercándonos a una concentración más equilibrada.

Con la eliminación de los contaminantes se mejoró la capacidad de absorción del colorante por parte de las partículas realmente activas, en la prueba correspondiente a la figura 30, el consumo se redujo a 46 mililitros, lo que representa un claro descenso en el consumo de azul de metileno. Este cambio refleja una mejora en la calidad química y funcional del sistema de arenas tras los cambios realizados.



Figura 30. Mililitros de azul de metileno ocupados después del cambio (fotografía tomada por el autor)

3.3 Resultados de las propiedades físicas

Las pruebas físicas se llevan a cabo diariamente con el objetivo de controlar la cantidad de aditivos utilizados durante la fabricación de los moldes. Un exceso en los niveles de aditivos, por encima de los valores recomendados, puede reflejarse directamente en la calidad de las piezas solidificadas.

A continuación, se anexa una tabla con los valores obtenidos en estas pruebas y su influencia en las características finales de las piezas producidas.

Tabla 2. Parámetros obtenidos antes de las estrategias implementada

Ensayos	Resultados	Indicadores
Permeabilidad [Cm/seg]	270	Soplados, inclusiones
Humedad (%)	6.3	Explosiones de moldes
Compactabilidad	37	Moldes duros

Tabla 3. Parámetros obtenidos después de las estrategias implementadas

Ensayos	Resultados	Indicadores
Permeabilidad [Cm/seg]	230	Menos expansión térmica
Humedad (%)	5.3	Mejores acabados
Compactabilidad	34	Mejor resistencia en molde

Comparando la tabla 2 y 3 se puede observar que hubo una disminución en el porcentaje de humedad, mientras que antes del cambio se obtenían humedades promedio de 6.3%, después de la regeneración, la humedad bajo una unidad, los valores de permeabilidad también bajaron 40 unidades debido a que la composición de la arena ya era más adecuada, el porcentaje de compactabilidad bajo dado que la arena ya presenta mejor cohesión. Estos cambios tienen una repercusión significativa en las piezas finalizadas (mejor apariencia visual), se disminuyó el número de defectos por arena, así como explosión de moldes a causa de la humedad y la mala permeabilidad.

3.4 Índice de rechazo

Durante el mes de mayo, antes de la implementación de la nueva metodología, se produjeron 104,728.44 kg de hierro fundido. De esta cantidad, 221 piezas presentaron defectos causados por la arena, lo que representó un 28.84% de la producción total (figura 31). Este alto porcentaje de piezas defectuosas tuvo un impacto significativo en la eficiencia de la producción, ya que requirió un mayor consumo de energía debido al retrabajo necesario para corregir los defectos.

Sin embargo, tras la mejora de los procesos, en el mes de agosto se produjeron 95,001.12 kg de hierro fundido, de los cuales solo 15 piezas presentaron defectos relacionados con la arena. Esto representa un 4.82% de defectos sobre la producción total (figura 32), lo que indica una mejora notable en la calidad del producto final y una reducción sustancial en los costos asociados al retrabajo y consumo energético.



Figura 31. Rechazo mes de mayo



Figura 32. Rechazo mes de agosto

Se puede observar que hubo una disminución del 80% de piezas defectuosas lo que se traduce a un aproximado de \$40000 ahorrados al mes. También, se notó que el proceso de desmoldeo es más fácil ya que la arena no se pega a las paredes de los moldes, el tiempo de granallado es menor y se mejoró la textura de las piezas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a través de este trabajo son evidencia de que la regeneración mecánica de arenas y la modificación de los procedimientos que se realizan en el laboratorio de arenas de la fundidora X son métodos eficaces para reestablecer las propiedades físicas de la arena. Se logró una reducción importante del contenido de finos presente en la mezcla de moldeo, así como una mejora en la distribución granulométrica, lo que permitió estandarizar los parámetros de humedad, permeabilidad y compactabilidad.

Adicionalmente, la prueba de azul de metileno realizada después de los cambios en el sistema de alimentación de arena reflejó una disminución en los requerimientos del reactivo, mostrando que existió un descenso en la cantidad de bentonita y contaminantes presentes en la mezcla de moldeo. Esta mejora en las propiedades químicas de la arena da como resultado moldeos de mayor calidad y menor incidencia de defectos en las piezas producidas.

A partir de los resultados obtenidos en esta tesina se puede concluir que la vigilancia de los datos relacionados con la composición y del estado de la arena son esenciales para conseguir un rendimiento correcto del proceso de moldeo. Con un sistema controlado, se pueden llevar a cabo ajustes en la arena que garanticen que la granulometría, la humedad y el contenido de bentonita permanezcan dentro de los niveles establecidos para cada tipo de moldeo para así mejorar el desempeño del proceso de fundición.

La regeneración constante de las arenas de moldeo también permite un mayor aprovechamiento de la arena, reduciendo el material nuevo que hay que añadir y, con ello, los costos. También permite que la arena mantenga sus propiedades de estabilidad, y se generen menores variaciones en los productos finales, dado que el proceso evita la acumulación de contaminantes y de las partículas finas.

Finalmente, se recomienda realizar estudios complementarios para fortalecer la trazabilidad y el control de calidad en el proceso metalúrgico.

Bibliografía

- [1] Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- [2] Campbell, J. (2011). *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [3] Beeley, P. R. (2001). *Foundry Technology* (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [4] Heskell, Dennis L. (1983). [«A Model for the Adoption of Metallurgy in the Ancient Middle East»](#). *Current Anthropology* **24** (3): 362-366. doi:[10.1086/203007](#)
- [5] Industriemuseum Brandenburg an der Havel, ed. (2002). [Vom zum Stahl Eisen](#) (mayo edición).
- [6] Delannoy P., Stefanescu D.M., Piwonka T.S., “A Critical Literature Review of Theories for the Formation of Casting Metal Penetration Defects”, AFS.
- [7] Wagner C.G., “Observations on the Penetration of Steel into High Density Clay Bonded Molds with Controlled Atmospheres”, AFS Transactions, Vol. 87, 1979, p.573.
- [8] Gómez Moyeda Ernesto. “Tecnología de las arenas de moldeo”. Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
- [9]] Flinn, R. A., & Trojan, P. K. (1995). *Engineering Materials and Their Applications* (4th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- [10] ASM International. (1998). *Metals Handbook: Casting* (10th ed., Vol. 15). Materials Park, OH: ASM International.
- [11] Clyde Anton Sanders. “Foundry sand practice”. American Colloid Company Bulletin. E.U.A. 1960.
- [12] Garcia Sosa Victor. “Tecnología del control de las arenas”. México. 2008
- [13] C. E. Canales Nañez, «Efecto de aglutinantes organicos e inorganicos sobre arenas angulares para la fabricacion de corazones de fundicion,» Tesis de Licenciatura, FIME-UANL, Mexico, 2011.

- [14] R. Oropeza Cortes , E. A. Sánchez Puerto y R. Aviles Reyes , «La arena residual de fundicion y su revalorizacion para la industria de construccion.,» Informe Técnico, Hidalgo, 2012.
- [15] García Montalvo, O. (2017). *Modelado y simulación de proceso flexible para la recuperación de arena para fundición* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- [16] “ASM casting handbook”, Vol. 15, 2nd Edition, E.U.A, 1992
- [17] Mold & Core Test Handbook, 1989 2nd edition, American Foundrymen’s Society
- [18] Esquivel Herrera, A. (2010). *Desarrollo de un aglutinante orgánico para la fabricación de moldes y corazones de arena* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de Nuevo Leon
- [19] **Desconocido.** (s.f.). *Manual de aplicaciones: arena de moldeo* (9151 H 3642).
- [20] American Foundry Society. (2008). *Foundry Sand Testing Manual*. Schaumburg, IL: American Foundry Society
- [21] Riaz, M., & Zhang, X. (2017). "Thermal and Mechanical Properties of Grey Iron Using Recycled Sand". *Foundry Science International*