



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE MOLDEO EN TALLERES PRODUCTORES DE FUNDICIONES GRISES EN EL NORTE DEL PERÚ

Yajaira Cardoza-Cazeneuve

Piura, febrero de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Cardoza, Y. (2019). *Diagnóstico del proceso de moldeo en talleres productores de fundiciones grises en el norte del Perú* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Diagnóstico del proceso de moldeo en talleres productores de fundiciones grises en el norte del Perú”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Yajaira Jackeline Cardoza Cazeneuve

Asesor: Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla

Piura, 26 de febrero de 2019

A la mirada de mamá, los consejos de papá y las sonrisas de mis hermanos: Anyel, Geanca y Arlette. A la tranquilidad que me inspira la señora Alicia Neyra, mi abuela; y a la fortaleza que me da Ismael. A mi abuelo Rubén, a toda mi familia; al apoyo incondicional de Flavio, a mis amigos: Diego, Jan, Irvin, Enrique, Luis, Nils, Jean Pierre y Moisés; pero, sobre todo, a las bendiciones infinitas de Dios.

Prólogo

La fundición gris es una de las aleaciones férricas más utilizadas en la industria debido a la amplia gama de propiedades que ofrece. Sin duda, una de sus principales ventajas es el bajo costo de producción en comparación con el acero. Esta propiedad, junto con su excelente colabilidad han dado lugar a un extenso desarrollo del material, en aplicaciones como: bloques de motor, camisas de pistón, engranajes, cuerpos de válvulas, piezas de automóvil y muchas piezas para maquinaria.

Las grandes industrias de aleaciones producen en altos volúmenes fundiciones con características mejoradas, como las aleadas de alta resistencia o las de grafito esferoidal. Incluso en el Perú, se han desarrollado significativamente, sobre todo en la capital, produciendo piezas de calidad estándar, a través de procesos cuidadosos y tecnificados. Sin embargo, esta realidad no alcanza al norte peruano, donde se realiza con escaso criterio técnico en lo referente a la selección de arenas, de chatarras, de combustible, diseño de sus moldes, proceso de moldeo, diseño de los hornos, etc.

Esta tesis forma parte del proyecto “Impulso de la industria manufacturera de aleaciones férricas mediante el estudio de procesos de mejoramiento de la calidad de fundiciones grises producidas en el norte del Perú, con aportes de investigadores peruanos y colombianos”, que se viene desarrollando en la Universidad de Piura. Dicho proyecto es financiado por CONCYTEC a través de FONDECYT y busca apoyar el desarrollo de las fundiciones grises del país, partiendo de una evaluación de los procesos que actualmente se aplican en los talleres de fundición del norte.

La presente tesis tiene como objetivo diagnosticar la situación de los procesos involucrados en la etapa de moldeo de 10 talleres de fundición de Sullana, Piura, Chiclayo y Trujillo; a partir de frecuentes visitas realizadas a sus instalaciones se pudieron identificar los aspectos críticos que impactan en la calidad de las piezas obtenidas. Se incluye, además, la caracterización de 8 muestras de arenas de 7 canteras de las tres regiones del norte del Perú. Con dichos resultados se definirá para qué tipo de fundición son aptas, según sus características y propiedades.

Se hace un especial agradecimiento a CONCYTEC, ente financiador del proyecto a través de FONDECYT, a la Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla, Coordinadora general del proyecto y asesora de esta tesis, así como al Mgr. Ing. Jorge Yaksetig Castillo y al Ing. César Dioses Gutiérrez, que, sin inconveniente alguno, guiaron hacia su objetivo principal esta investigación.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo diagnosticar la etapa de moldeo de 10 talleres de fundición del norte del Perú, con la finalidad de encontrar qué aspectos inciden en la aparición de defectos sobre sus piezas de fundición gris laminar.

Este procedimiento es realizado manualmente con escasa aplicación de criterios técnicos, y comprende: la selección y dosificación de arenas e insumos, la conformación del molde, el diseño de los sistemas de alimentación y distribución, el curado y sellado de los moldes.

A partir de las visitas técnicas realizadas a los talleres de fundición de Piura, Sullana, Chiclayo y Trujillo, y la caracterización macroscópica de 24 muestras de fundición de acuerdo al Atlas de Defectos de la AFS, se han identificado las malas prácticas que inducen la aparición dichos defectos, entre ellas: el uso de arenas vírgenes, el exceso de reutilización de arenas, el escaso uso de aglutinantes u otros elementos que mejoren las propiedades de sus arenas, el dimensionamiento incorrecto de los sistemas de alimentación y distribución, sin herramientas técnicas que garanticen la distribución eficiente del material fundido en el molde.

Por otro lado, como un aporte al sector, se caracterizaron 8 muestras de arenas de canteras locales. Los datos obtenidos serán un punto de partida para empezar a formular arenas y dosificar los insumos que conformarán los moldes a partir de los cuales se obtendrán piezas de mejor calidad.

Índice general

Introducción.....	1
Capítulo 1 Industria manufacturera de fundición	3
1.1. Etapas del proceso de fundición	3
1.1.1. Etapa de moldeo	7
1.1.2. Etapa de fusión	13
1.1.3. Etapa de colada y desmoldeo.....	15
1.2. Fundiciones grises.....	17
Capítulo 2 Etapa de moldeo.....	23
2.1 Selección de insumos para moldeo.....	25
2.1.1. Tierras de moldeo	26
2.1.2. Ensayos para determinar las características físicas de las tierras de moldeo	32
2.1.3. Ensayos para determinar las propiedades de las tierras de moldeo.....	38
2.2. Preparación de las tierras de moldeo	42
2.3. Conformación del molde	47
2.3.1. Sistemas de alimentación de un molde.....	49
2.3.2. Empuje metalostático	54
2.4. Normativa y referencias	55
Capítulo 3 Situación actual de la etapa de moldeo en el norte del Perú.....	57
3.1. Talleres de fundición participantes	57
3.2. Descripción del proceso de moldeo	62
3.2.1. Arenas de fundición.....	66
3.2.2. Preparación de arenas de fundición.....	68
3.2.3. Diseño del molde	70
3.3. Características macroscópicas de las piezas de fundición gris	72
3.4. Costos de la producción de fundiciones grises en el norte	101
3.4.1. Mezcla de arena	102
3.4.2. Fusión y colada.....	105
Capítulo 4 Diagnóstico de la situación actual del proceso de moldeo de las industrias manufactureras de fundición en el Norte del País.	107

4.1. Influencia del moldeo en la calidad macroscópica de las piezas de fundición gris laminar	107
4.2. Fortalezas y debilidades de la práctica de moldeo en el norte del Perú	119
4.3. Problemas específicos encontrados	120
4.3.1. En cuanto a la selección de arenas e insumos	121
4.3.2. En cuanto a la preparación de arenas	121
4.3.3. En cuanto al moldeo	122
4.4. Identificación de propuestas de mejora	123
4.5. Caracterización de las canteras de arena del norte del Perú	127
Conclusiones y recomendaciones.....	141
Bibliografía.....	145
Anexos.....	149
Anexo A.....	151
Anexo B.....	163
Anexo C.....	179
Anexo D.....	185

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de las aleaciones metálicas.	4
Figura 2. Representación esquemática del proceso de fundición.....	6
Figura 3 Diagrama de la etapa de moldeo.....	7
Figura 4. Tipos de modelos empleados para fundir una bomba de agua. a) Modelo de madera en una placa modelo. b) Molde de placa bipartido). c) Modelos divididos.	8
Figura 5. Soportes de corazones de arena seca.	9
Figura 6. Utensilios empleados en el moldeo.	11
Figura 7. Esquema de un molde de arena.....	12
Figura 8. Diagrama de la etapa de fusión y colada.	13
Figura 9. Horno de cubilote. Partes principales.	14
Figura 10. Diagrama de la etapa de desmoldeo.....	16
Figura 11. Microestructura de la fundición gris. a) matriz perlítica. b) matriz ferrito - perlítica. c) matriz ferrítica.	20
Figura 12. Representación esquemática del proceso de moldeo mediante arena verde.	24
Figura 13. Materiales de revestimiento para moldes.....	31
Figura 14. Clasificación de los granos de arena según la AFS. a) Redondeados. b) Angulares. c) Sub-angulares. d) Compuestos.	34
Figura 15. Clasificación de los granos de arena según su angularidad y esfericidad.....	35
Figura 16. Pisón de arena.	38
Figura 17. Permeámetro digital.....	40
Figura 18. Máquina con mordazas para realizar ensayos de resistencia a la tracción de mezclas de arenas para machos. /	41
Figura 19. Probador universal de resistencia a la compresión en arenas.	42
Figura 20. Área de moldeo en una fundición.	44
Figura 21. Desterronadora de arena.	44
Figura 22. Molino de arena.	45
Figura 23. Ilustración de la relación entre la resistencia a la tracción R de una tierra y su compactación.....	48
Figura 24. Durómetro portátil para arenas en verde.	48
Figura 25. Esquema de un sistema de alimentación horizontal.....	50
Figura 26. Tipos de enfriadores y ubicación en un molde de arena.	52
Figura 27. Simulación de aparición de rechupes en la pieza.....	53
Figura 28 Secuencia del llenado del molde en un intervalo de 2.15 s.....	54
Figura 29. Esquema del proceso de moldeo del norte del Perú.....	61
Figura 30. Modelo de hierro fundido, de una sola pieza.....	62
Figura 31. Modelos de madera compuestos por dos piezas.	62
Figura 32. Cajas de moldeo metálicas circulares y cuadradas.	64
Figura 33. Llenado de caja de moldeo circular para hacer un impulsor de bomba centrífuga.	64
Figura 34. Herramientas para compactación del molde.	65
Figura 35. Colocación de refuerzos para el moldeo de una pieza grande.	65
Figura 36. Extracción del modelo de la semicaja de moldeo.	65
Figura 37. Revestimiento de los moldes con plombagina.	66

Figura 38. Cantera de la Nariz del Diablo en Sullana, Piura.....	68
Figura 39.Patio de moldeo del taller 6, Lambayeque.....	68
Figura 40. Patio de moldeo de taller 9.....	68
Figura 41. Tamizado de la arena.	69
Figura 42. Sistemas de alimentación.....	72
Figura 43 Barra de hierro gris en estado de colada.	73
Figura 44.Corte transversal de la barra. a) Cavidades esféricas a una distancia de la superficie de la barra. b) Cavidades esféricas sub-superficiales.....	73
Figura 45.Superficie exterior de la barra irregular.....	74
Figura 46.Cavidades irregulares rellanadas en la superficie externa de la barra.....	74
Figura 47.Superficie externa de la barra.....	75
Figura 48.Aletas que siguen los bordes del molde de arena.....	75
Figura 49.Cavidades sobre la superficie de la barra rellenas.	76
Figura 50.Cavidades huecas en el extremo superior de la barra.	76
Figura 51.Superficie irregular de la barra.....	77
Figura 52.Extremo de la barra de hierro gris.....	77
Figura 53.Sección transversal de la barra de hierro gris.....	78
Figura 54.Sección transversal de la barra de hierro gris. Cavidad interna tapada.....	78
Figura 55.Superficie externa de la barra, fundida en molde de arena.	79
Figura 56.Superficie de la mazarota.....	79
Figura 57.Se muestra una cavidad esférica en la superficie.....	80
Figura 58.Barra de hierro gris en estado de colada.	80
Figura 59.Corte transversal de la pieza. a) Inclusión metálica esférica. b) Sopladura donde se encontró la inclusión metálica.....	81
Figura 60.Barra de hierro gris en estado de colada.	81
Figura 61.Barra de hierro gris en estado de colada..	82
Figura 62.Sección transversal de la barra, se aprecian cavidades de forma irregular.	82
Figura 63.Barra de hierro gris en estado de colada. Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.	83
Figura 64.Sección transversal de la barra de hierro gris.	83
Figura 65.Sección transversal de la barra de hierro gris. Cavidad interna tapada.....	84
Figura 66.Acercamiento de una sección de la pieza. a) Se muestran cavidades. b) Corte transversal de la barra, se observan picaduras en superficie.....	84
Figura 67. Extremo de la pieza.	85
Figura 68.Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista panorámica de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.	85
Figura 69.Superficie irregular de la barra.....	86
Figura 70.Cavidad en forma de cono truncado.	86
Figura 71.Cavidad esférica en la superficie de la barra.....	87
Figura 72. Poros en la sección transversal del trozo de fundición fabricado - por el taller 5.....	87
Figura 73.Barra de hierro gris. a) Contracción interna. b) Cavidad interna tapada.....	88
Figura 74.Barra mecanizada.e.	88
Figura 75.Extremo de la pieza.....	89
Figura 76.Pieza de Fundición Rivera, que muestra una cavidad.....	89
Figura 77.Superficie de la barra de hierro gris.	90
Figura 78.Superficie irregular de la barra, proporcionada por el taller 6.	90
Figura 79.Cavidades irregulares conectadas a la superficie exterior de la pieza.....	91
Figura 80.Pequeña cavidad irregular en el centro de la barra.	91
Figura 81. Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista panorámica de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.	92
Figura 82.Extremo de la barra de hierro gris.....	92
Figura 83.Extremo de la barra de fundición gris. Fractura oxidada.....	93
Figura 84.Picaduras superficiales en sección lateral de la barra de hierro colado.	93
Figura 85.Extremo de la barra de hierro gris.....	94
Figura 86.Superficie de la barra de hierro gris.	94

Figura 87.Superficie exterior de la barra fabricada por el taller 7.....	95
Figura 88.Cavidad esférica conectada a la superficie externa de la barra.	95
Figura 89.Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista de la parte superior de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se muestra una superficie irregular con aspecto granular.	96
Figura 90.Extremo superior de la barra de hierro colado. Se observa hinchazón en esta zona.....	96
Figura 91.Parte inferior de la barra de hierro colado.	97
Figura 92.Borde inferior de la pieza "manguito". Se muestra cavidades de forma irregular.	97
Figura 93.Picaduras en toda la superficie de la pieza de hierro colado.....	98
Figura 94.Bordes adyacentes al macho o corazón del molde. a) Borde inferior redondeado. b) Borde superior irregular. c) Borde superior de la fundición correcto. d) Borde de la fundición irregular.	98
Figura 95.Sección de cocina mejorada mostrando una irregularidad en la superficie.	99
Figura 96.Acercamiento de una sección de la pieza, se muestran cavidades.	99
Figura 97.Trozo de cocina mejorada en estado de colada. Acercamiento de la superficie, se muestra una superficie irregular de aspecto granular.	100
Figura 98.Cocinas mejoradas fabricadas por Fundición Salinas. a) Aro base con evidente discontinuidad. b) Aro base sano.	100
Figura 99.Superficie externa de la barra.	101
Figura 100.Acercamiento de una sección de la pieza, se muestran cavidades.	101
Figura 101. Organigrama funcional común de los talleres del norte del Perú.	102
Figura 102. Piñón dentado de fundición gris laminar.	102
Figura 103. Molde y modelo diseñado en Solidworks.	103
Figura 104 Diagrama de Pareto en el que se resumen los defectos macroscópicos encontrados en el norte del Perú.	108
Figura 105. Modelo de Diagrama de Ishikawa.	109
Figura 106. Diagrama Ishikawa del defecto: Arena vitrificada.	110
Figura 107. Esquema de una pieza descentrada.	111
Figura 108. Diagrama de Ishikawa del defecto identificado como: Sopladuras y picaduras.....	112
Figura 109. Diagrama de Ishikawa del defecto macroscópico conocido como: inclusiones de escoria, sedimento o fundente.	114
Figura 110. Diagrama de Ishikawa del defecto macroscópico conocido como: picaduras en la superficie.....	116

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de procesos de colado, sus ventajas y limitaciones.	5
Tabla 2. Cargas típicas del horno de cubilote.....	14
Tabla 3. Clasificación de las fundiciones grises laminares a partir de su resistencia a la tracción.	19
Tabla 4. Resumen de los defectos macroscópicos encontrados en las piezas de fundición gris laminar, por inspección visual.	21
Tabla 5. Características en algunos tipos de arenas comerciales.	28
Tabla 6. Características térmicas de las bentonitas.	30
Tabla 7. Clasificación de los granos de tierra según el sistema A.F.S.	36
Tabla 8. Cálculos típicos del número de finura de grano AFS.	37
Tabla 9. Propiedades de las arenas en verde para fundición de hierro.	55
Tabla 10. Caracterización de los talleres participantes de la región norte del Perú.	58
Tabla 11. Cronograma de visitas a los talleres de fundición del norte del Perú.....	59
Tabla 12. Muestras analizadas macroscópicamente.	59
Tabla 13. Resultados de la encuesta realizada a 08 talleres de fundición.	60
Tabla 14. Canteras de arena para fundición del norte del Perú.	67
Tabla 15. Fórmula referencial de mezcla de arenas de moldeo.....	103
Tabla 16. Costos de insumos de la preparación de arenas de moldeo.....	104
Tabla 17. Mano de obra directa para preparar arenas.....	104
Tabla 18. Insumos para revestimiento de moldes.....	105
Tabla 19. Datos considerados en la estructura de costos.....	105
Tabla 20. Resumen de los costos unitarios del taller 2.....	105
Tabla 21. Margen de ganancia del taller 2.....	106
Tabla 22. Frecuencia de incidencia de defectos en las piezas.	108
Tabla 23. Matriz F.O.D.A de la etapa de moldeo en el norte del Perú.....	120
Tabla 24. Puntos críticos y problemas prioritarios de la etapa de moldeo.	123
Tabla 25. Equivalencia entre los tamices y las aberturas de las mallas.....	124
Tabla 26. Índice de finura de arenas para ciertas aleaciones.....	125
Tabla 27. Registro de compuestos para la mezcla de arenas.	126
Tabla 28. Registro de prueba y error para las mezclas elaboradas.	126
Tabla 29. Ubicación de canteras y codificación de muestras obtenidas.....	127
Tabla 30. Resultados de los ensayos practicados a las arenas de fundición del norte del Perú.	129
Tabla 31. Propiedades de las arenas de fundición.	130
Tabla 32. Contenido de humedad de las muestras de arenas.	132
Tabla 33. Contenido de arcilla de las muestras de arena.	133
Tabla 34. Índice de finura de las muestras.	134
Tabla 35. Forma de grano de las muestras.	135
Tabla 36. Permeabilidad de las muestras de arena.	137

Tabla 37. Resistencia a la compresión en verde de las muestras.	138
Tabla 38. Resumen de los resultados de las características y propiedades de las arenas empleadas en el norte del Perú.	138

Introducción

La fundición de metales hace referencia al proceso de solidificación de un material metálico líquido que se vierte o inyecta en un molde de forma hueca predeterminada con la configuración y dimensiones deseadas.

Como actividad, despierta notable interés en el sector productivo debido a la cantidad y calidad de las piezas obtenidas por colada. Ofrece bienes y servicios a la minería, pesca, agricultura, sectores eléctrico y energético; es decir, contribuye al desarrollo del país en forma integral. (Secciani & Villani , 1996)

La presente investigación denominada: “Diagnóstico del proceso de moldeo en talleres productores de fundiciones grises en el norte del Perú”, estudia a la fundición como un proceso ordenado y sistematizado; y se enfoca, particularmente, en la etapa de moldeo, la misma que comprende las primeras actividades en la producción de piezas de fundición gris, tales como: manufactura del molde y diseño de los sistemas de alimentación.

En Piura, Sullana, Chiclayo y Trujillo, el moldeo, en general, se sigue desarrollando de manera tradicional: se continúa empleando el proceso de moldeo en verde, mezclando con agua arenas naturales, es decir, sin añadir aglutinantes que mejoren sus propiedades, y, con ello, las propiedades del molde que conformarán.

La falta de innovación tecnológica, la irrupción de nuevos productos a bajo precio y el incumplimiento con estándares de calidad han reducido el mercado de las pequeñas industrias del norte, poniendo en peligro su subsistencia.

En este marco, se pretende elaborar un diagnóstico de la etapa de moldeo de arena en verde, que realizan los talleres de fundición gris para identificar qué factores inciden en la aparición de defectos macroscópicos encontrados en las piezas y que, consiguientemente, disminuyen su calidad.

Este trabajo está estructurado en cuatro capítulos.

El primer capítulo hace referencia a los aspectos generales del proceso de fundición. Inicialmente, se le describe como un conjunto de operaciones compuesto por etapas, atendiendo a lo que sugiere el Manual de la *American Society of Materials* (ASM Handbook). A su vez, se hace una clasificación de los procesos de fundición, de acuerdo al tipo de molde, procesos de moldeo y métodos de alimentación.

En las sub – secciones se detalla cada etapa del proceso de fundición. Además, se hace una introducción a las fundiciones grises para poder abordar el tema fundamental de esta tesis, las fundiciones grises laminares.

A continuación, en el capítulo 2, se describe la etapa de moldeo. Esta etapa comprende la preparación, dosificación de arenas de fundición, el diseño y elaboración de los moldes. Las arenas empleadas en la conformación de los moldes son el tema central de esta sección por lo que también se incluye el procedimiento estándar de los ensayos que deben realizarse para determinar tanto las propiedades como las características que las hacen aptas para cada tipo de fundición.

El tercer capítulo expone la situación actual del norte del Perú, a través de la presentación de 10 talleres productores de piezas de fundición gris en Piura, Sullana, Chiclayo y Trujillo. Se incluye, además, la caracterización macroscópica de 24 muestras de fundición gris laminar, proporcionadas por los talleres colaboradores; así como, un breve análisis de costos de la producción de piezas de fundición gris laminar.

En el capítulo cuarto se presenta el diagnóstico del proceso de moldeo que contrasta el modo de operación de los talleres fundidores del norte respecto a la metodología estandarizada que se propone en la bibliografía. Todas las empresas dedicadas a la fundición en los tres departamentos están catalogadas como pequeñas empresas, en ellas se producen piezas semielaboradas que después de un mecanizado pueden ser utilizados en aplicaciones industriales tales como: ruedas dentadas, poleas, bombas, impulsores, bastidores, entre otras.

En este capítulo, se presenta la caracterización de 8 muestras de arena provenientes de canteras del norte con el fin de determinar la aptitud de las mismas para fundir piezas de hierro gris.

Finalmente, se exponen las conclusiones del diagnóstico y algunas recomendaciones.

Se plantea que, a través de una mejor dosificación de arenas y aditivos, de la mano de un proceso de preparación de estas, se obtengan piezas con menor incidencia de defectos, de mejor calidad, que refuercen la confianza de los clientes hacia los pequeños productores de fundiciones grises en el norte del país.

Capítulo 1

Industria manufacturera de fundición

1.1. Etapas del proceso de fundición

La fundición es una industria fundamental para la fabricación de máquinas y es, también, un arte: el moldeador, sin más ayuda que la de un modelo y algunas herramientas rudimentarias, puede reproducir piezas muy complejas realizando un trabajo que puede llamarse de escultor.

Para terminar una pieza hace falta someter las materias primas (lingotes de metal y chatarra) y los insumos auxiliares (combustible, arenas, aglutinantes, etc.) a una serie ordenada de operaciones sucesivas para obtener fácil y económicamente, piezas de diversas formas y tamaños; así como, utilizar de modo conveniente algunos metales y aleaciones. (Capello, 1971)

Como método de fabricación de elementos de máquinas, ofrece múltiples beneficios, por la versatilidad del proceso en sí mismo. Por ejemplo:

- Es económicamente viable. En términos de valor y producción, ocupa el segundo lugar, después del laminado en acero, en la industria de producción de metales.
- Es un proceso flexible en cuanto a la forma y tamaño. En términos de diseño de componentes, se pueden obtener piezas que varían en peso desde menos de una onza hasta varios cientos de toneladas.

Según Secciani y Villani, autores del libro *“Produzione Metalmeccanica”*, existen tres criterios fundamentales para la clasificación de las fundiciones:

- a. El tipo de aleación (fundición gris, acero, aluminio, cobre, magnesio). En la Figura 1 se muestra la clasificación según este criterio.
- b. El proceso de moldeo (moldeo en arena, en concha, en cáscara, microfusión, moldeo a presión, etc.)
- c. El grado de mecanización (nulo, parcial, total).

El *ASM Handbook*, por su parte, señala que los procesos de fundición pueden clasificarse a partir de la condición de los moldes, es decir, si son permanentes o desechables. Los moldes desechables se caracterizan porque una vez solidificada la pieza, el molde se rompe para retirarla. Generalmente, son fabricados de arena, yeso, cerámica, entre otros materiales similares.

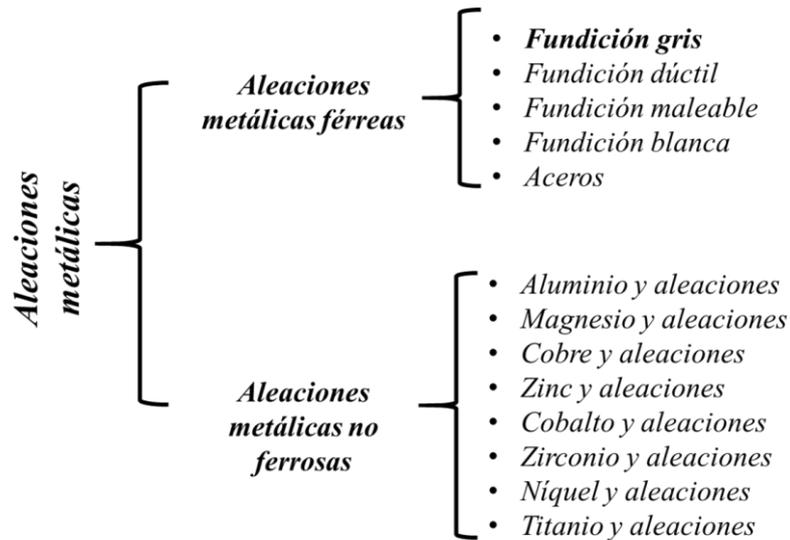


Figura 1. Clasificación de las aleaciones metálicas.
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, los moldes permanentes se utilizan más de una vez. De estos, la pieza puede retirarse con facilidad, para utilizar el molde en la siguiente colada. Por ejemplo, los moldes de metal.

De la misma manera, hay sub – clasificaciones relacionadas con los modelos empleados en el proceso, el material del molde o el método para alimentar el molde con metal fundido. En la Tabla 1 se muestra una sub – clasificación de acuerdo a los criterios antes mencionados.

Casi todas las aleaciones pueden fundirse con arena; de hecho, el moldeo en arena es uno de los procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como acero, níqueles y titanios. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande y en cantidades de producción que van desde uno a millones.

Proporciona gran libertad del diseño en términos de tamaño, forma y calidad del producto. Los moldes utilizados en este proceso están hechos de material refractario (partículas de arena) que se compacta para mantener su forma durante el vertido. (ASM Handbook - Vol. 15: Casting, 1992).

La fundición en arena, tema central de esta investigación, consiste en colocar un modelo con la forma de la pieza deseada en el molde de arena para crear una impresión, incorporar un sistema de alimentación, llenar la cavidad resultante de metal fundido, dejar que el metal se enfríe hasta que se solidifique, romper el molde y retirar la fundición. (Kalpakjian & Schmid, 2002)

De acuerdo al esquema de la Figura 2, la operación inicial es el diseño del plano. Para producir una pieza, se debe conocer el tipo de aleación y las condiciones de trabajo a las que estará sometida, es decir, sus características mecánicas y tecnológicas. Para ello, la pieza debe ser íntegra (ausencia de defectos), capaz de resistir el trabajo en progreso y los procesos posteriores, como: mecanizado de máquinas herramientas, tratamientos térmicos, soldadura, ensamblaje, etc. (Secciani & Villani , 1996).

Tabla 1. Resumen de procesos de colado, sus ventajas y limitaciones.

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Moldeo en arena	Se puede colar prácticamente cualquier metal; no hay límite de tamaño, forma o peso; costo de herramental bajo.	Se requiere algo de acabado; un acabado algo áspero; tolerancias.
Moldeo en cáscara (arena + resina termoestable)	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta velocidad de producción.	Restricciones en el tamaño de la pieza; se requieren modelos y equipos costosos.
Molde de yeso (sulfato de calcio, talco y harina de sílice)	Formas complicadas; precisión dimensional y acabado, buenos; porosidad baja.	Limitado a metales no ferrosos; tamaño y volumen de producción limitados; tiempo de fabricación del molde relativamente largo.
Molde cerámico ¹	Formas complejas; piezas de tolerancias estrechas; buen acabado superficial.	Tamaño limitado.
Molde permanente (fundición gris, acero, bronce, grafito o aleaciones de metal refractario)	Acabado superficial y precisión dimensional, buenos; porosidad baja; velocidad de producción alta.	Costo del molde elevado; forma y complejidad limitados; no adecuado para metales de alto punto de fusión.
Modelo consumible (poliestireno expandido)	La mayor parte de los metales pueden ser fundiciones sin límite de tamaño; formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y pueden ser costosos para pequeñas cantidades.
Fundición por revestimiento (a la cera perdida)	Formas complejas; acabado superficial y precisión excelentes; prácticamente, se puede fundir cualquier metal.	El tamaño de la pieza es limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos.
Troquel	Precisión dimensional y acabado superficial excelentes; velocidad de producción elevada.	El costo de la matriz es alto; por lo general, limitado a metales no ferrosos; tiempo de entrega alto.
Centrífugo	Grandes piezas cilíndricas de buena calidad; alta velocidad de producción.	El equipo es costoso; la forma de la pieza es limitada.

Fuente: Kalpakjan, S. Schmid, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson, 2002.

De acuerdo al esquema de la Figura 2, la operación inicial es el diseño del plano. Para producir una pieza, se debe conocer el tipo de aleación y las condiciones de trabajo a las que estará sometida, es decir, sus características mecánicas y tecnológicas. Para ello, la pieza debe ser íntegra (ausencia de defectos), capaz de resistir el trabajo en progreso y los procesos posteriores, como: mecanizado de máquinas herramientas, tratamientos térmicos, soldadura, ensamblaje, etc. (Secciani & Villani , 1996).

¹ El molde está compuesto por una mezcla de zirconio de grano fino, óxido de aluminio, sílice fundido y aglutinantes. Las paredes del molde se recubren con arcilla refractaria.

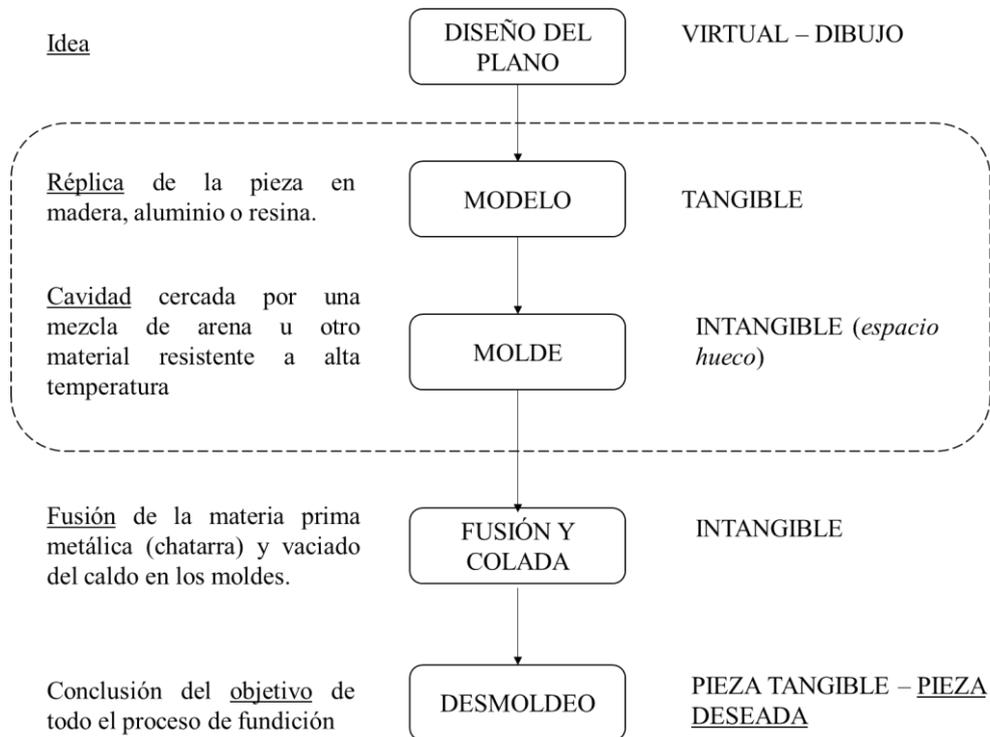


Figura 2. Representación esquemática del proceso de fundición.
Fuente: Rueda, Luis Fernando. Curso de Fundición. 2007.

Después del diseño del plano, el siguiente paso es la manufactura del modelo. Para confeccionarlo, se debe elegir el material de acuerdo al volumen de producción de piezas, el tamaño y la forma de la pieza moldeada.

Un modelo es un patrón de la pieza a producir, elaborado de madera, metal, plástico o materiales compuestos, alrededor del cual se apisona material de moldeo (arena preparada) para formar la cavidad de un molde. Generalmente, se producen en dos mitades para que el modelo se pueda retirar fácilmente después del apisonado en las cajas de moldeo.

Las arenas de moldeo son una mezcla de características y propiedades específicas para obtener una pieza de fundición solidificada de alta calidad. Esta mezcla, que debe ser homogénea, usualmente, contiene: arena de cuarzo, arcilla refractaria y cierto porcentaje de humedad. (Mazzoleni, 1978).

Por su parte, la preparación de arenas consiste en dosificar cada uno de los insumos y aditivos que conforman el molde.

El moldeo es, básicamente, la actividad de disposición de arenas en el molde alrededor del modelo para obtener la cavidad en la que se vaciará el metal fundido. El molde está conformado por una caja metálica que puede ser cuadrada o circular, de acuerdo a las dimensiones de la pieza a fundir.

La fusión y colada, comprenden actividades como: cálculo de la carga metálica que ingresa al horno, fusión, obtención, tratamiento y vaciado del caldo en los moldes. En este

paso se lleva a cabo la solidificación y enfriamiento de la pieza, después de verter el metal fundido en el molde.

El horno de cubilote es el más empleado para obtener hierro fundido². Para precalentarlo se emplea leña y una cama de combustible (coque o antracita). Posteriormente, se coloca la chatarra (piezas de acero, hierro fundido, arrabio), con una cama de combustible y caliza, intercalados.

Cuando el metal se ha fundido, se toma la callana y se vacía sobre los moldes, paulatinamente. Después de que el metal fundido ha solidificado en el molde, se procede al desmoldeo.

El desmoldeo, consiste en romper el molde para obtener la pieza fundida. Una vez extraída la pieza, se procede a limpiarla para verificar si tiene exceso de defectos y el grado de mecanización que requiere. Posteriormente, se mecaniza la pieza para darle la forma final con el acabado superficial respectivo.

El proceso de fundición específico que se tratará en adelante es el moldeo en arena verde. Básicamente, consiste en la fabricación de piezas fundiendo metal o aleación y vertiéndolo en moldes preparados con un aglomerado comprimido y homogéneo compuesto de una mezcla de arena de sílice con una cierta cantidad de arcilla y agua suficiente para dar una consistencia notable. (Mazzoleni, 1978)

1.1.1. Etapa de moldeo

El moldeo en verde consiste en la fabricación del molde, siendo éste una mezcla de arena de sílice y bentonita, humedecida. Este molde está compuesto por una caja de moldeo sobre la que se coloca el modelo para rellenarla de arena.

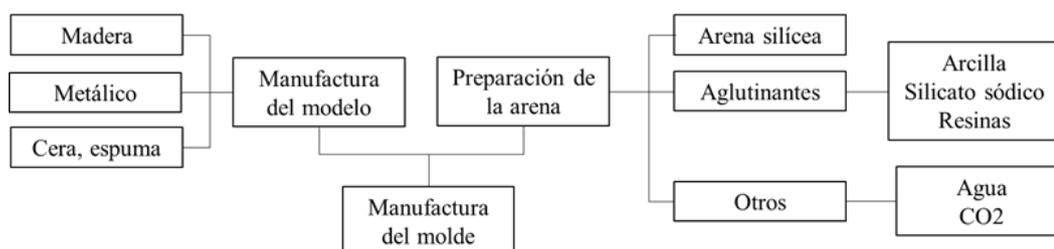


Figura 3 Diagrama de la etapa de moldeo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra el diagrama de trabajo de la etapa de moldeo. En este, se distinguen tres actividades principales: la manufactura del modelo, la preparación de las arenas y la manufactura del molde.

El paso inicial es la manufactura de un modelo adecuado, cuyo objetivo es reproducir las dimensiones de la pieza que desea obtenerse a partir de la solidificación del metal fundido.

² En esta investigación, el término *hierro fundido* hace referencia a los diferentes tipos de fundición que pueden obtenerse, ya sea: fundición blanca, gris, maleable, etc.

Un modelo tiene como función reproducir las dimensiones de la pieza, por lo que debe estar correctamente diseñado. Se construye teniendo en cuenta el sistema de moldeo, el grado de contracción del metal y los espesores de mecanización.

Los modelos deben sobredimensionarse para corregir la contracción del metal al enfriarse y soportar el mecanizado posterior. Además, deben contemplar cierta conicidad para asegurar su fácil extracción del molde. Generalmente, están hechos de materiales cuya durabilidad y resistencia vayan acorde al volumen de piezas a producir, como la madera, los polímeros y los metales; y sus pesos van desde unos gramos hasta toneladas.

La madera, por ejemplo, es un material bastante común para fabricar modelos, por la facilidad de trabajarla y darle forma. Sus desventajas son la tendencia a la torsión y al desgaste por la abrasión de la arena que se compacta a su alrededor, lo cual limita el número de veces que puede usarse. Los modelos de metal son más costosos, pero tienen mayor duración. Los polímeros (plásticos) representan un término medio entre la madera y los metales³.

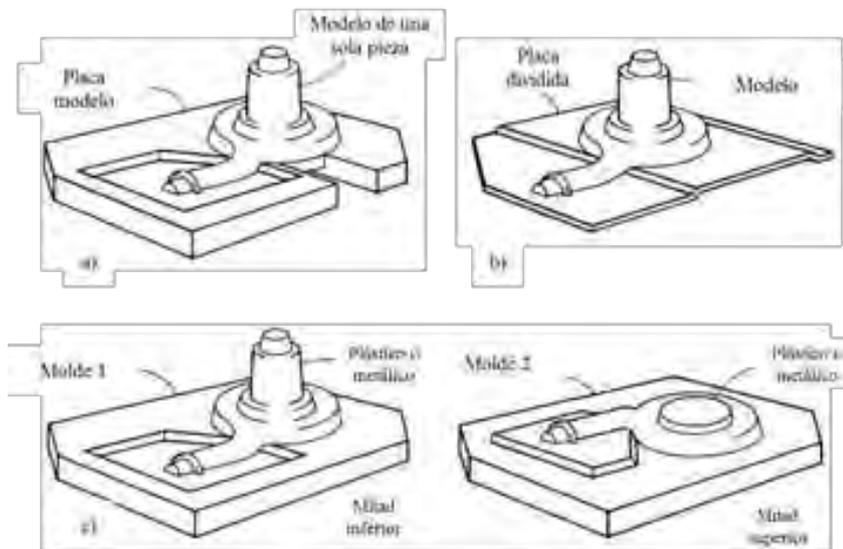


Figura 4. Tipos de modelos empleados para fundir una bomba de agua. a) Modelo de madera en una placa modelo. b) Molde de placa bipartido. c) Modelos divididos.

Fuente: ASM Handbook, 1992.

De acuerdo al ASM Handbook (1992), los modelos pueden clasificarse en:

- a. Modelos removibles, también llamado modelo de una sola pieza o modelo sólido. Es el modelo reutilizable más simple y menos costoso y solo se emplean para volúmenes de producción baja. Normalmente se hacen de madera, como se muestra en la Figura 4. Su manufactura es fácil, pero la complicación surge al hacer el molde de arena, cuando se incorpora el sistema de vaciado y el vertedero de colada para un modelo sólido.

³ Para volúmenes de producción reducidos se puede optar por construir modelos de madera suave (abeto, pino, álamo), mientras que para altos volúmenes de producción se emplea madera dura (nogal, aliso, haya, roble, alerce) o metal (latón, aleaciones de aluminio, bronce y fundición gris). (Capello, 1971)

Estos problemas se resuelven generalmente apelando al juicio y habilidad del operario del taller de fundición.

- b. Modelos con placa de acoplamiento (de placa bipartidos o de doble placa). Se usan para altos volúmenes de producción y para la fabricación de piezas pequeñas. En la Figura 4.b, se muestra un modelo con placa de acoplamiento. En este tipo de modelos, las dos piezas se adhieren a los lados opuestos de una placa o tarima de madera o metal. Los agujeros de la placa permiten una alineación precisa entre la parte superior y el fondo del molde.
- c. Modelos divididos o modelos de dos piezas (mitad superior e inferior), son fabricados de manera tal que, cada parte forme una porción de la cavidad para la fundición, al juntarse o montar una sobre otra, como se muestra en la Figura 4.c. Se pueden producir piezas fundidas con formas complicadas, en cantidades moderadas de producción. El plano de separación del molde queda predeterminado por las dos mitades del molde, según el juicio del operador.

Por otra parte, considerando la configuración de las piezas que se están produciendo, los modelos pueden ser:

- Modelos macizos, porque su configuración externa carece de espacio hueco.
- Modelos con machos, cuya forma hueca interior se configura mediante uno o varios machos.

Los machos, almas, nyos o corazones se utilizan para fundiciones con cavidades o pasajes internos, como los que se encuentran en un monoblock o en un cuerpo de válvulas automotrices.

En la literatura se distinguen dos tipos de corazones: corazones de arena verde y de arena seca. Los primeros, se caracterizan por formar parte del molde, y ser económicos. Sin embargo, no pueden producirse corazones de gran longitud porque pueden derrumbarse. Los de arena seca, por su parte, se ajustan al molde a partir de unas plantillas que los sujetan y proporcionan ventilaciones para el escape de los gases. Además, se anclan con soportes para darle soporte estructural e impedir que se muevan. (Ver Figura 5).

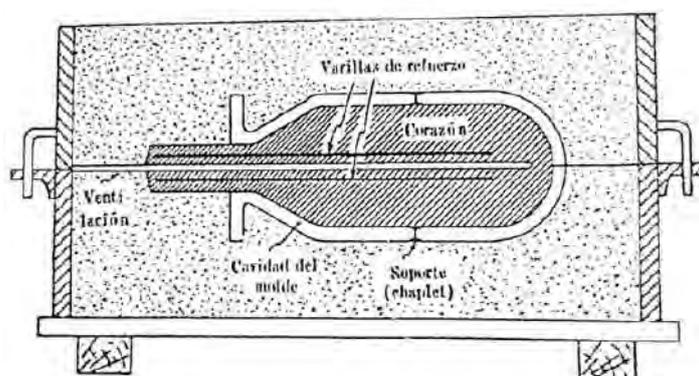


Figura 5. Soportes de corazones de arena seca.

Fuente: Higgins, Raymond, 1960.

Después de la fabricación del modelo se procede a preparar las arenas. Inicialmente, se debe seleccionar el tipo de arena con la que se procederá a moldear, considerando su refractariedad, para resistir altas temperaturas; permeabilidad, para permitir el escape de gases que se producen durante la colada y su carácter aglomerante, para mantener la forma del molde.

Una arena adecuada para moldear consiste, principalmente, en granos de sílice (SiO_2), mezclados con arcilla suficiente, en proporción entre el 5 y 20%, como material aglomerante. Una arena natural de este tipo, sólo necesita mezclarse con el agua para facilitar el moldeo. De no ser el caso, se pueden emplear arenas sintéticas que son, esencialmente, granos de cuarzo, mezclados antes de usarse con algún tipo de arcilla, por ejemplo: bentonita. (Higgins, 1984)

Para la manufactura de moldes se usan diversos tipos de arenas, diferenciando dos categorías: la arena de moldeo en verde y la de moldeo en seco.

Con la arena de moldeo en verde se confeccionan moldes en los que se efectúa la colada sin someterlos a ningún secado. Este proceso es más económico y permite producciones en serie. La principal desventaja asociada a este procedimiento es la dificultad para producir piezas grandes. En cambio, con la arena de moldeo en seco, se confeccionan moldes que antes de la colada son sometidos a un secado con la finalidad de aumentar la cohesión, resistencia, permeabilidad de las arenas y reducir el volumen de los gases que se producen durante la colada.

Es importante hacer distinción entre la arena de revestimiento y la arena de relleno. Se le conoce como arena de revestimiento a la que está en contacto directo con el modelo, y, por consiguiente, con el metal líquido durante la colada. Esta arena debe garantizar la refractariedad, permeabilidad y cohesión más elevadas.

Las arenas de relleno, por su parte, se utilizan para completar el molde y no requieren de tanto cuidado como las anteriores. Aun así, debido a las elevadas temperaturas a las que se encuentran sometidas, están expuestas a la pérdida del aglutinante arcilloso, resistiendo menos el calor y ruptura de los granos de sílice, que repercute en una menor cohesión, modificación de la granulometría, mayor cantidad de materiales impalpables y disminución de la permeabilidad; por lo que deben ser renovadas periódicamente. El período de renovación de las arenas depende de la frecuencia de uso de las mismas. Por ejemplo, de acuerdo a la experiencia de los fundidores, si las coladas se realizan dos veces a la semana, el período de renovación de arenas no debe ser mayor a tres meses.

La preparación de arenas tiene como finalidad obtener una masa homogénea, sin terrones, cuerpos extraños o polvo, compuesta solamente de granos de sílice, separados unos de otros y recubiertos en una capa de arcilla humedecida u otro aglutinante con la eventual adición de plombagina⁴. (Capello, 1971)

El procedimiento incluye dos fases distintas: la separación de las arenas recicladas de coladas anteriores y la mezcla de componentes. La primera fase incluye: la eliminación de las piezas de metal (clavos utilizados para asegurar los moldes,

⁴ También conocido como mineral negro. Su función principal en la fundición es ayudar a mejorar el acabado superficial de las piezas.

alambres, etc.), la trituración de terrones, la eliminación de polvo, el tamizado y la limpieza de cuerpos extraños. Y la segunda, incluye: la mezcla íntima de los componentes, envolviendo los granos de sílice con arcilla para evitar que se rompan, produciendo polvo; y, posteriormente, la humidificación dosificada y uniforme de la mezcla.

En las fundiciones modernas, todo el proceso se realiza automáticamente, empleando: separadores electromagnéticos, tamices giratorios, trituradoras, molinos o mezcladoras.

El moldeo se lleva a cabo en una caja de moldeo, en la que se disponen las arenas preparadas alrededor del modelo. Esta operación puede realizarse manualmente, a cargo del moldeador; o mecánicamente, con ayuda de equipos adecuados.

En el moldeo a mano, el moldeador utiliza herramientas para manipular la arena, confeccionar el molde, retocarlo y dejarlo en condiciones de recibir el metal fundido. Entre los principales utensilios, se encuentran: pisón plano, pisón en cuña, paleta alisadora, espátula, fuelle, criba, atacadores, terrajas, pinceles, cepillos, alisadores, etc. En la Figura 6 se pueden apreciar algunos de estos utensilios.

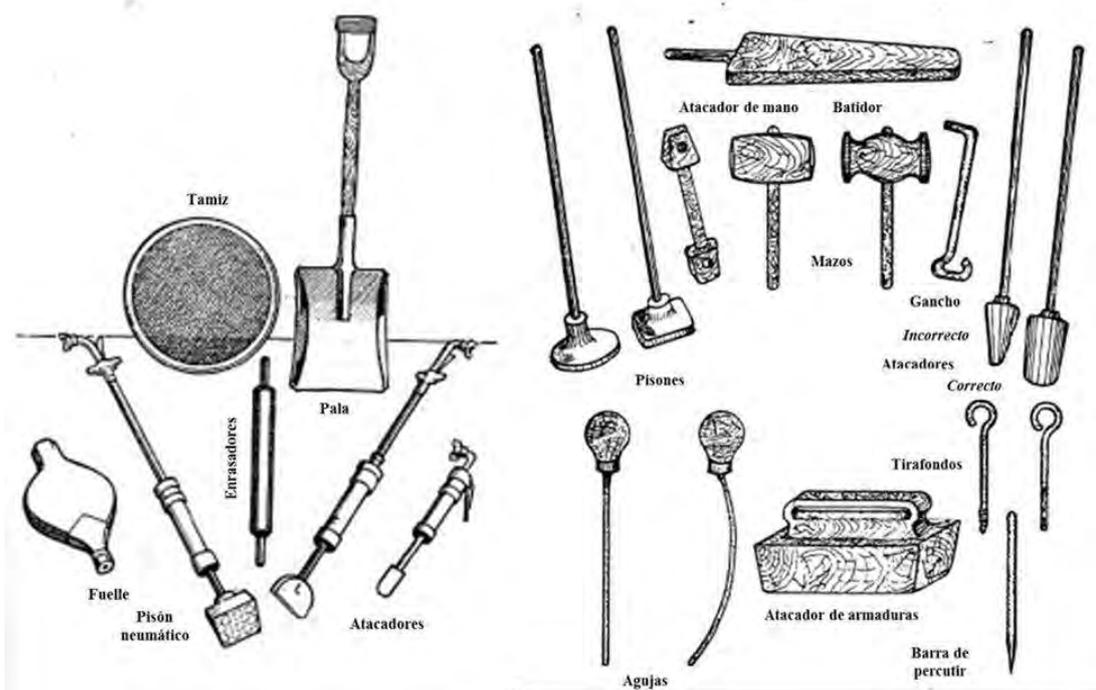


Figura 6. Utensilios empleados en el moldeo.
Fuente: SENA, 1966.

En la Figura 7 se puede apreciar el esquema de un molde de arena.

Una caja de moldeo es el recipiente en el cual la arena queda apisonada. Está compuesta, generalmente, por dos partes (mitad inferior y mitad superior), así como, por una estructura de paredes verticales, provistas de bordes para sostener la arena.

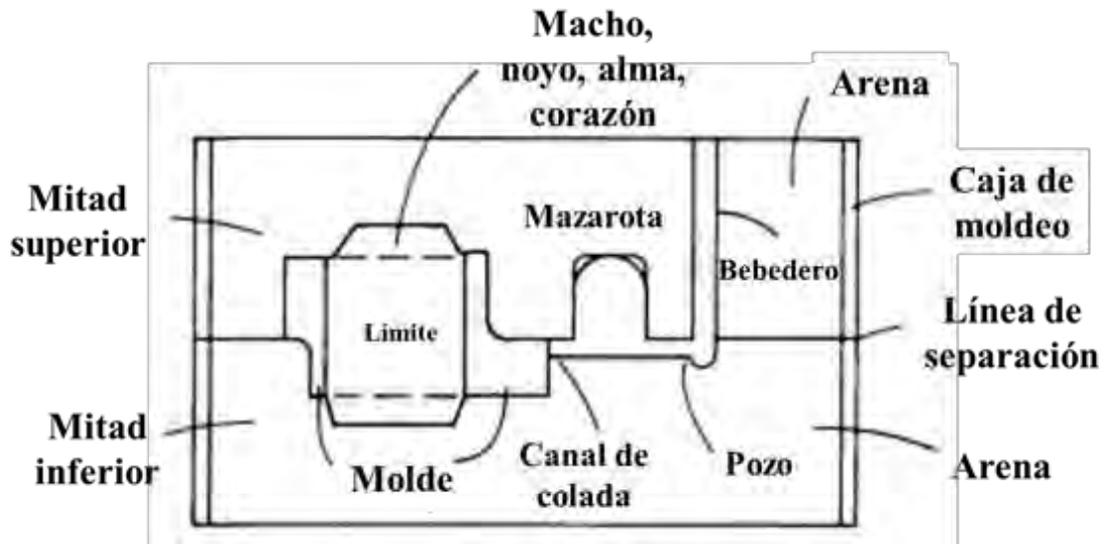


Figura 7. Esquema de un molde de arena.
Fuente: ASM Handbook, 1992.

Son fabricadas de distintas formas (rectangulares, cuadradas, circulares, etc.) y tamaños muy variados, en proporción a la forma y tamaño de las piezas a obtener⁵; comúnmente de hierro o acero⁶.

En el interior de la caja de moldeo se coloca el modelo sobre un tablero de moldeo. Luego, se agrega arena de revestimiento, comprimiéndola alrededor del modelo. Posteriormente, se adiciona arena de relleno y se apisona firmemente. Para esta operación, el moldeador se apoya en atacadores y apisonadores.

Después, se retira el exceso de arena con una terraja o rasqueta.

Para continuar con la caja superior es importante establecer un registro entre las cajas de moldeo con pasadores, ganchos, etc.

A continuación, se colocan los sistemas de alimentación y distribución (cargadores, bebederos, alimentadores) y para aumentar la permeabilidad del molde, se le practican varios respiraderos con un alambre.

Al término de este procedimiento, se retira cuidadosamente el modelo golpeando ligeramente las paredes del molde. Se cortan los canales de alimentación y distribución y después de quitar los excedentes de arena, se procede, en el caso de que los hubiera, a colocar los machos, sujetándolos apropiadamente para que resistan su propio peso.

Finalmente, se cierra definitivamente el molde, se colocan pesos sobre el mismo para contrarrestar la presión metalostática, quedando listo para efectuar el vaciado del metal fundido.

⁵ El tamaño de la caja debe ser el adecuado (de acuerdo a las dimensiones de la pieza a fundir) para asegurar la efectividad del apisonado.

⁶ No se recomienda que sean de madera por el hinchamiento del material al estar en contacto con la arena húmeda.

1.1.2. Etapa de fusión

La etapa de fusión hace referencia a la transformación de la materia prima en metal líquido que será vaciado, posteriormente en los moldes de arena, para su consiguiente solidificación.

En la Figura 8 se puede ver el diagrama de trabajo de esta etapa. En resumen, la materia prima metálica o chatarra ingresa al horno de fusión (generalmente horno de cubilote) que ha sido previamente calentado y cargado con combustible para producir el metal fundido. Antes de vaciar el caldo en los moldes, se procede a tratarlo para mejorar sus propiedades y aumentar su calidad.

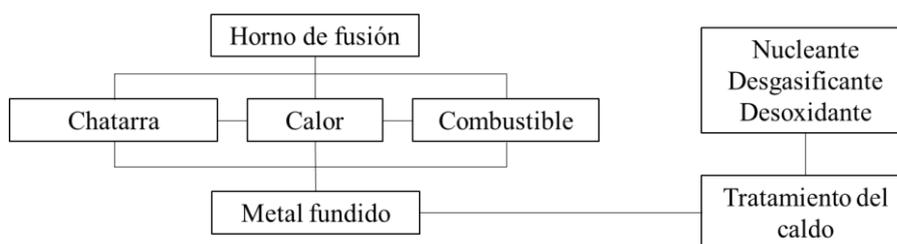


Figura 8. Diagrama de la etapa de fusión y colada.
Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de fusión se emplean hornos de cubilote, eléctricos o de crisol, para fundir metales no ferrosos.

La estructura más económica para fundir hierro es el cubilote, un horno de torre vertical recubierto en su interior por material refractario. Parte del principio del flujo a contracorriente continuo, donde los materiales de carga descienden y los gases de escape ascienden a través del horno. (Baquero, 2000).

En su interior, el metal es precalentado y fundido por el contacto directo con los gases calientes de la combustión. Sin embargo, debido al íntimo contacto del metal, las cenizas y el oxígeno, la fundición gris producida no puede ser rigurosamente controlada desde el punto de vista metalúrgico. El metal y la escoria fundidos se acumulan en el fondo, donde se descarga por orificios y picos.

En la Figura 9 se muestra la estructura básica del horno de cubilote.

El conjunto de materiales de fusión se denomina mezcla o carga y su naturaleza y proporciones se escogen de tal modo que se obtengan materiales con propiedades determinadas. El hierro fundido, por ejemplo, se obtiene a partir de chatarra de fundición, chatarra de acero, arrabio, ferroaleaciones, etc.

En la Tabla 2, se precisan las cargas del horno de cubilote para obtener fundiciones de clases determinadas. Por lo general, las cargas determinadas presuponen un porcentaje de arrabio, producto obtenido de la primera fusión del hierro en los altos hornos que contiene más carbono que el acero o que el hierro forjado y se rompe con mayor facilidad. Otros elementos con altos contenidos de carbono que pueden emplearse en la carga del cubilote son los hierros afinados, que se producen generalmente en cubilotes u hornos eléctricos, utilizando chatarra seleccionada; y

hierros de base dúctil, hechos de minerales especialmente puros, y que tienen muy bajos contenidos de elementos residuales. (Brown J. R., 2000)

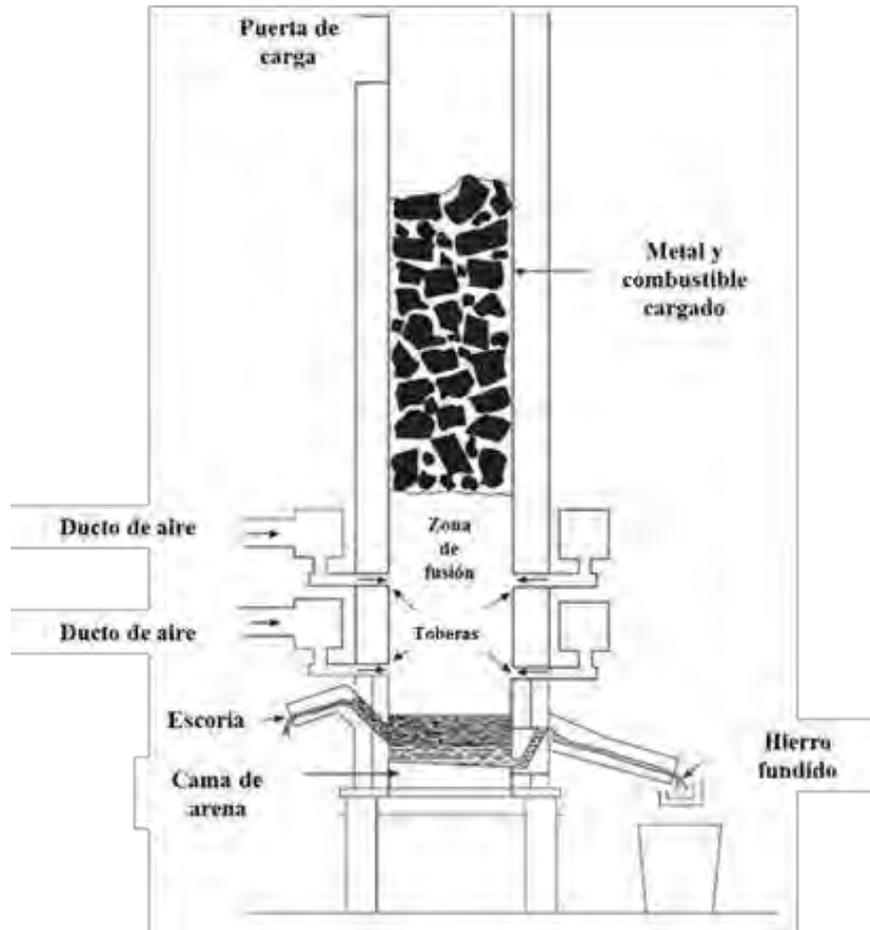


Figura 9. Horno de cubilote. Partes principales.
Fuente: Brown, 2000.

La obtención de una fundición de determinada clase está directamente relacionada con la carga y la proporción de la misma.

Tabla 2. Cargas típicas del horno de cubilote.

	CLASE		
	Clase 20	Clase 30	Clase 40
CARGA DETERMINADA	25% de arrabio	30% de arrabio bajo en fósforo	25% de arrabio bajo en fósforo
	40% de retornos del taller de fundición	35% de retornos del taller de fundición	35% de retornos del taller de fundición
	30% de chatarra de fundición comprada	20% de chatarra de fundición bajo en fósforo	15% de chatarra baja en fósforo
	5% de chatarra de acero	15% de chatarra de acero	25% de chatarra de acero

Fuente: Brown, 2000.

Los elementos más comunes que se utilizan como materia prima metálicas son: elementos de mecánica general (maquinaria agrícola, maquinaria textil gruesa), automotores (culatas, cilindros, camisas de motores marinos), cojinetes, zapatas de frenos, lingoteras, tubos, etc. El criterio de selección de la carga que se pone en el cubilote se relaciona con la composición química de cada pieza.

El combustible usado en el cubilote, debe cumplir con las siguientes características:

- No aumentar el contenido de azufre de la fundición.
- Carburar el metal (según las necesidades de la carga del cubilote).
- Permitir colar una fundición caliente.

Para la producción de fundición gris común se puede emplear coque, el cual tiene las siguientes propiedades: 5% máx. de humedad, 10% máx. de cenizas, 1% máx. de materia volátil, 1% máx. de azufre y debe tener un tamaño medio de 100 mm. (Brown J. R., 2000)

Antes del vaciado, el caldo de metal fundido debe cumplir con ciertos requisitos relacionados con la composición química y la temperatura de vaciado.

La composición química del metal fundido queda determinada por la carga metálica y el combustible empleado. La fuente de impurezas más común es el combustible, puesto que, en él se encuentra presente uno de los elementos más perniciosos, el azufre. Elegir un combustible adecuado es sumamente importante por su influencia en la incidencia defectos macro y microscópicos sobre las piezas que se obtienen.

Por otra parte, la obtención de la temperatura de vaciado correcta es importante. Temperaturas demasiado bajas pueden causar que el metal fundido no fluya adecuadamente y no llenar todas las regiones del molde, lo que puede resultar en un vaciado con numerosos rechupes. Temperaturas muy elevadas, pueden conducir a una fusión gaseosa y la formación de burbujas en el vaciado resultante.

En el horno de cubilote, suponiendo el uso de coque como combustible, se formará ceniza, acompañada de otras materias extrañas, tales como arena de la chatarra de fundición, óxido y escamas de otros tipos de chatarra. Por lo que, debe agregarse algún fundente que, combinado con estos materiales forme escoria fluida que pueda extraerse a intervalos convenientes⁷. La caliza es ampliamente utilizada, algunas veces, feldespató. También se agrega sosa en polvo con objeto de reducir el contenido de azufre que absorbe el hierro.

1.1.3. Etapa de colada y desmoldeo

Una vez que se obtiene el metal fundido (acompañado de otros productos originados en la fusión), se procede a colocar la cuchara al pie del cubilote. Estas

⁷ A partir del proceso de fusión en el cubilote se pueden obtener escorias de carácter ácido o de carácter básico. Las de carácter ácido son consideradas escorias no desulfurantes, por lo que, en este caso, se recomienda aumentar la adición de fundentes especiales como el carburo de calcio o el carbonato de sodio. (Baquero, 2000)

cucharas reciben el metal fundido para proceder al llenado de los moldes, por lo que deben estar revestidas para mantener la temperatura del caldo de colada.

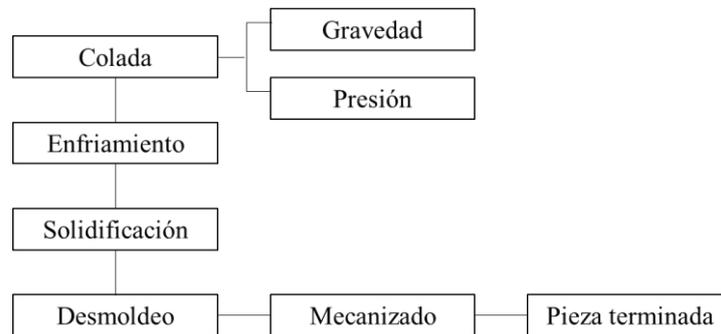


Figura 10. Diagrama de la etapa de desmoldeo.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se puede apreciar el diagrama de trabajo de esta etapa. En el diagrama, se distinguen dos tipos de coladas: colada por gravedad y colada por presión

La colada por gravedad se realiza vertiendo el metal fundido en un molde, como es el caso de los moldes de arena; mientras que, en la colada por presión, propia de los moldes permanentes, se inyecta el metal fundido, forzándolo a entrar.

Durante el enfriamiento y solidificación de la pieza, aparece una contracción volumétrica propia del material metálico. Esta reducción de tamaño puede generar defectos internos en la pieza (rechupes, poros, microsegregaciones), propulsores de fallas en servicio de la misma. Con el fin de contrarrestar este problema, se diseñan sistemas de alimentación, mazarotas⁸ o cargadores en puntos adecuados del molde⁹, de forma que se aporte suficiente metal líquido para asegurar su completo llenado. (García Chacón, 2016).

El metal fundido que ingresa se distribuye a través del sistema de colada. Este sistema es un conjunto de canales que conducen al metal líquido hasta la cavidad del molde para el llenado del mismo. Está compuesto por: el bebedero, la taza de colada, el pozo de colada, los canales de colada y el canal de ataque. Estos últimos están encargados de distribuir horizontalmente el metal fundido hasta la cavidad del molde, alimentándolo directamente.

La solidificación de la pieza depende de la aleación con la que se esté trabajando. Las aleaciones metálicas, por ejemplo, cumplen con una solidificación prolongada, dejando en las piezas un escurrimiento o rechupe al centro.

Durante el vaciado, el metal disipa calor a través de los granos de arena (mecanismo de conducción). Gases generados por el contacto del metal fundido con la arena (mecanismo de convección) emanan del molde. Por esta razón, es necesario colocar enfriadores para efectuar una solidificación direccional, que pueden ser:

⁸ La mazarota es un reservorio de metal fundido con el suficiente volumen que tiene como objetivo alimentar en todo momento al modelo para salvar las contracciones volumétricas. (García Chacón, 2016)

⁹ La localización y dimensiones de cada cargador son importantes para que su acción sea efectiva y no se formen bolsas de metal fundido, pues en caso contrario, aparecerán poros en la pieza solidificada. (Higgins, 1984)

- Internos, hechos de la misma mezcla que constituye el molde, puesto que, formará parte de él.
- Externos, como bloques de cobre, hierro o acero, de forma adecuada, que se colocan en puntos estratégicos del molde.

Una vez que el metal fundido se ha vertido en los moldes y se ha enfriado la pieza, se procede a separarlos, rompiéndolo manual (por golpeteo con un martillo o comba) o mecánicamente (red vibradora o túneles rotativos). A través de un martillo de bolas se retira el canal de colada y los cargadores, además de los excedentes de metal fundido (rebabas, aletas, etc.).

Se procede a la limpieza de la pieza, con sopleteado con arena (arenado) o con perdigón (granallado).

Posteriormente, se inspecciona visualmente, para reconocer la presencia de defectos superficiales comunes del proceso. Pueden emplearse: rayos X para revelar los defectos en cavidades internas; líquidos penetrantes, pruebas supersónicas, pruebas de presión neumáticas o hidráulicas para válvulas y cilindros estancos, entre otras técnicas.

Una vez identificado el estado de la pieza, se mecaniza para dar un mejor acabado superficial, obteniendo de esta manera, una pieza terminada.

1.2. Fundiciones grises

Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio, que contienen, en menor proporción, manganeso, fósforo y azufre. Su contenido en carbono es superior al de los aceros.

Se caracterizan porque adquieren su forma definitiva por colada. No son dúctiles, ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse, a excepción de las fundiciones maleables y las dúctiles de grafito esferoidal.

Pueden clasificarse en tres principales grupos: fundición gris, fundición blanca y fundición maleable. Los términos gris y blanca, aplicados a las fundiciones, se refieren al aspecto de la fractura de la pieza de colada; mientras que la fundición maleable, toma su nombre de la posibilidad de curvarse o sufrir una deformación permanente antes de romperse. Además, es mucho más dúctil y tenaz que los otros dos tipos. (Johnson, 1961)

En particular, se estudiarán las fundiciones grises laminares por ser el producto que se obtiene con mayor frecuencia, en los talleres del norte del Perú.

De acuerdo a la norma ASTM A247 – 17, el grafito laminar es el grafito tipo VII, sub – clasificado en 5 tipos de distribuciones (A, B, C, D y E) y 8 clases (de la clase 1 a la clase 8). En el Anexo A.1: *Distribución y tamaño del grafito laminar*, se muestra a detalle esta clasificación.

A las fundiciones grises laminares se les conoce, también, como fundiciones grises no aleadas (o de baja aleación). Son un material compuesto de grafito, y de otro material matriz,

que, a su vez, frecuentemente está compuesto por un intermetálico cerámico – la cementita, y otro material – la ferrita, que es metálico. (Pero-Sanz Elorz, 1994)

Requieren para su elaboración menos energía que los aceros, porque con similar capacidad calorífica, su temperatura de fusión es menor. Presentan, además, excelentes características de colabilidad y dan poco rechupe¹⁰, 1% de contracción lineal, aproximadamente.

Se caracterizan por presentar grafito entre sus constituyentes microestructurales, el mismo que ocupa entre 6% y 10% del volumen total. Esta forma elemental del carbono ejerce una influencia muy importante en las propiedades y características de las fundiciones grises, por ejemplo: su comportamiento mecánico, que resulta parecido al de un acero con numerosas fisuras taponadas por grafito.

La presencia de grafito equivale a microentallas, que disminuyen la tenacidad del material y reducen su alargamiento a la tracción, generalmente menor de 0.6%.

Otro factor que influye en las propiedades de las fundiciones grises se relaciona con la débil cohesión entre el grafito y la matriz metálica. Este modelo determina: el color gris que presentan las fracturas, la capacidad para amortiguar vibraciones (mayor cuanto más grafito), su maquinabilidad generalmente buena, las moderadas resistencias a tracción y bajos alargamientos, la dispersión habitual en valores de microdureza, la conductividad térmica, la capacidad para disipar calor (mayor cuanto más cantidad de grafito, y mejor si el grafito es laminar que esferoidal), etc.

Gracias a la buena colabilidad de las fundiciones grises es posible moldear piezas de paredes delgadas, tales como tubos con aletas para radiadores, rodetes para bombas, anillos para columnas, calderas, compresores, etc. Presentan buena resistencia a la corrosión; superior a los aceros, también buena estanqueidad.

Las fundiciones grises resultan fácilmente mecanizables; aunque, ocasionalmente, pueden presentar dificultades de mecanizado derivadas de defectos externos, tales como arena adherida a su superficie, o bien, por factores ligados al diseño o a la práctica del moldeo, por ejemplo, la existencia de rechupes internos en ángulos entrantes y cambios de sección. En cuanto a resistencia al desgaste, el comportamiento de las fundiciones grises es excelente.

El comportamiento mecánico de este tipo de aleación es la característica más importante, relacionada con el diseño de las piezas y los posteriores servicios que prestarán. Tal es así, que, la norma ASTM A48, las clasifica de acuerdo a su resistencia mecánica, como se muestra en la Tabla 3. Esta norma subordina la composición química de las fundiciones grises a su resistencia a la tracción.

Por otro lado, las fundiciones grises solidifican siguiendo el diagrama hierro – carbono estable, por lo que sus constituyentes son grafito y hierro. En el Anexo A.2 se muestra el diagrama de hierro carbono.

¹⁰ La pequeña contracción al solidificar se debe a que su densidad (entre 6.95 g/cm³ y 7.35 g/cm³, menor cuanto más carbono) es inferior a las de las fundiciones blancas (7.7 g/cm³) y a las de los aceros (el hierro tiene densidad 7.97 g/cm³), que se justifica por la presencia de grafito cuya densidad es 2.2 g/cm³.

Tabla 3. Clasificación de las fundiciones grises laminares a partir de su resistencia a la tracción.

Clase de fundición gris	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Resistencia a la tracción (ksi)	20	25	30	35	40	45	50	55	60

Fuente: Rakhit, 2013.

En cuanto a la influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la estructura del hierro, se puede decir que un enfriamiento rápido da como resultado la formación de poco o nada de carbono grafitico duro y frágil. Un enfriamiento muy lento permite una marcada grafitización, en cambio, da como resultado un hierro blando y débil.

Las propiedades de las fundiciones grises dependen del tamaño, la cantidad y la distribución del grafito y de la estructura de la matriz metálica. Estos, a su vez, dependen de la composición química del hierro, en particular su contenido de carbono y silicio; y también en variables de procesamiento tales como el método de fusión y la velocidad de enfriamiento de la colada.

Los principales constituyentes microscópicos que se pueden encontrar son: grafito, perlita, ferrita, cementita, esteadita y sulfuros de manganeso.

El grafito y la perlita están presentes en porcentajes variables en todas las calidades de la fundición gris. La presencia de ferrita o cementita en estado libre, depende de la cantidad de carbono combinado presente en la pieza. Si está por debajo de la relación eutéctica (perlita), se encuentra ferrita libre en la estructura y si está por encima, se encuentra cementita libre. La presencia de esteadita y sulfuro de manganeso depende de la cantidad de fósforo y azufre presente en la pieza.

Las características microestructurales de las piezas, también, establecen una clasificación, de acuerdo a las propiedades que confieren a las piezas, subdividiéndose en:

- Fundición gris perlítica. Su estructura está formada de perlita con inclusiones de grafito. La fundición gris perlítica es de gran interés industrial. Está constituida por laminillas de grafito embebidas en una masa de perlita laminar, puede considerarse como un acero eutectoide en el que se hallan incrustadas innumerables láminas de grafito. Tiene muy buenas propiedades mecánicas y se usa en piezas de motores, maquinaria, tubos, camisas de cilindros, pistones de motores de expansión, zapatas de freno, piezas delgadas de alta resistencia, lingoteras, ruedas, etc. Tiene relativamente buena tenacidad y gran resistencia al desgaste. (Universidad Tecnológica Nacional de Rosario, 2018)
- Fundición gris ferrito – perlítica. La estructura de esta fundición está formada por ferrita + perlita e inclusiones de grafito. En esta fundición la cantidad de cementita es menor que el 0.8%C.
- Fundición gris ferrítica. En esta fundición la matriz es ferrítica y todo el carbono que hay en la aleación está en forma de grafito.

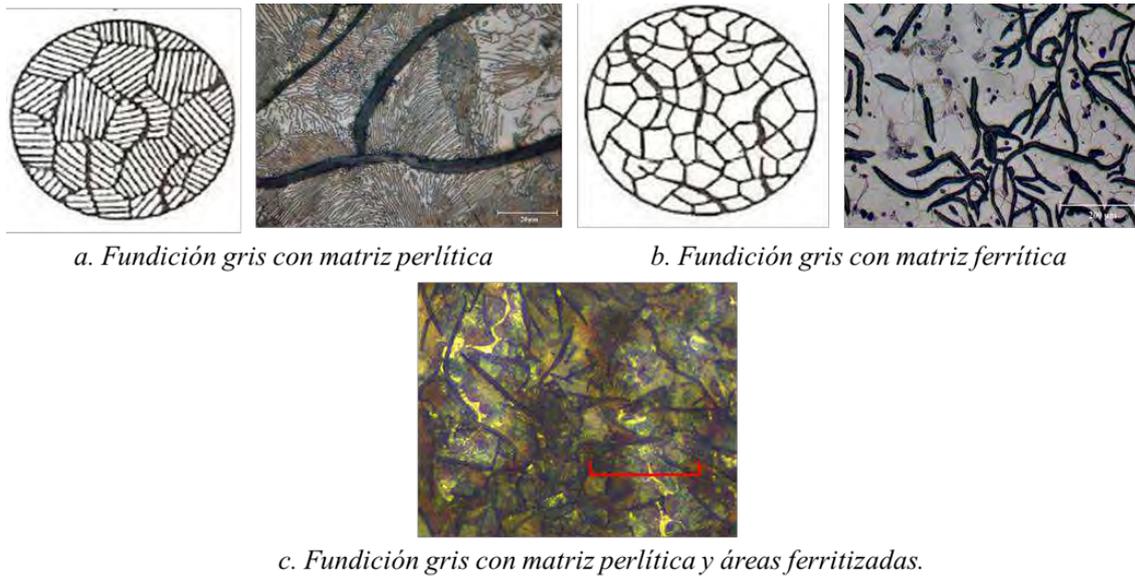


Figura 11. Microestructura de la fundición gris. a) matriz perlítica. b) matriz ferrito - perlítica. c) matriz ferrítica.
Fuente: Elaboración propia, con imágenes extraídas de: fundición

En las piezas obtenidas por colada es común encontrar defectos relacionados con fallas técnicas, tales como: mala práctica en la fusión, mala práctica en el vertido, moldeo pobre, diseño incorrecto del modelo, composición incorrecta del metal, arena de moldeo y corazones de composición incorrecta o en malas condiciones, colocación incorrecta de alimentadores y cargadores, etc.

Cada uno de los factores mencionados anteriormente, repercuten en la obtención de piezas sanas. Por ejemplo, si un vaciado tiene cargadores inadecuados, los defectos o rechupes se pueden manifestar como porosidad interna o cavidades; o bien, en la forma de depresiones en la superficie del vaciado. (Higgins, 1984).

En la Tabla 4 se presenta el grupo de imperfecciones más frecuentes en este tipo de piezas, teniendo como referencia técnica el análisis por el Comité Internacional de la Asociación Norteamericana de Fundidores (*American Foundrymen's Society*).

En el Anexo A.3: *Atlas Internacional de defectos de fundición*, se muestra a detalle la clasificación de los defectos encontrados en piezas de fundición por inspección visual.

Tabla 4. Resumen de los defectos macroscópicos encontrados en las piezas de fundición gris laminar, por inspección visual.

Defectos macroscópicos	Código	Descripción	Defecto asociado a:
Arena vitrificada	D221	Capa de arena fuertemente adherida a la superficie de fundición.	<ul style="list-style-type: none"> • Insuficiente refractariedad de la arena • Reacciones químicas del molde con el metal • Apisonado inadecuado • Baja humedad de la arena de moldeo • Excesiva temperatura de colada.
Contracción externa o abierta	B211	Cavidad en forma de embudo. Pared normalmente recubierta de dendritas.	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de material para compensar la contracción durante la solidificación.
Fundición rota	E221	Dimensiones fracturadas que corresponden a la colada, salida de aire, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Los canales de colada o salidas de aire no son entallados en el cuello. • Desmoldeo anticipado, mientras aún estaba demasiado caliente.
Picaduras en la superficie	B123	Porosidad fina (cavidades) en la superficie de la fundición que aparece en áreas extendidas.	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de oxígeno o hidrógeno excesivo en el baño metálico. • Alto contenido de elementos con fuerte afinidad por el oxígeno (gralmente. Ti y Al) • Temperatura excesiva de colada • Exceso de humedad del molde.
Inclusiones de escoria, sedimento o fundente	G121	Inclusiones no metálicas cuya apariencia o análisis muestra que contienen escoria.	<ul style="list-style-type: none"> • Durante la fusión, debido a la cantidad de cenizas del combustible, desgaste del mismo, oxidación del Si y Mn.
Hinchazón externo o interno	A211-2	Exceso de metal sobre la superficie interna o externa de la fundición.	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación del molde, rigidez insuficiente, debido a la expansión de la fundición causada por formación de grafito durante el enfriamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de los defectos macroscópicos encontrados en las piezas de fundición gris laminar, por inspección visual. (continuación)

Defectos macroscópicos	Código	Descripción	Defecto asociado a:
Darta o expansión de darta	D231	Es una proyección metálica irregular de superficie áspera, con varios milímetros de espesor	<ul style="list-style-type: none"> Corriente de metal que entra en la cavidad del molde y causa una zona de condensación húmeda de baja resistencia. Como consecuencia de la resistencia a la compresión del molde, una costra de arena seca se produce. En este caso la costra se rompe por la expansión de la sílice. Si los bordes de la costra están levantados lo suficiente permite la infiltración de metal debajo de la costra, formando darta.
Revestimiento defectivo	E112	En ciertas partes de la pieza, tales como esquinas externas o internas están redondeadas irregularmente o completamente desaparecida.	<ul style="list-style-type: none"> Reparación inapropiada o aplicación del revestimiento refractario al corazón, formando protuberancias en la cavidad del molde y dejando huellas en la superficie de la fundición.
Costura o costurón	D113	Arruga ondulada marcada sin discontinuidades. Los bordes de las arrugas están al mismo nivel y la superficie de la fundición es suave.	<ul style="list-style-type: none"> El metal superficial está demasiado viscoso o frío, y, en consecuencia, las marcas pliegue formadas por la capa de óxido no se nivelan por la presión de la fundición gris.
Sopladuras y picaduras	B111	Cavidades redondeadas, usualmente con pared suave de tamaño variado, aisladas o agrupadas irregularmente en todas las áreas de la fundición	<ul style="list-style-type: none"> Contenido de oxígeno o hidrógeno excesivo en el baño metálico, alto contenido de elementos, con fuerte afinidad por el oxígeno (gralmente. Ti y Al), temperatura excesiva de colada y exceso de humedad del molde. reacciones entre el carbono y abundante óxido de hierro presente en la escoria, formando monóxido de carbono, el cual se desarrolla como picaduras superficiales. Además, su posterior agrandamiento se debe a difusión y liberación de hidrógeno.
Salida	E123	Fundición incompleta debido a la pérdida de metal después de la colada.	<ul style="list-style-type: none"> Mal sellado del molde o pared del molde insuficientemente fuerte Las paredes se rompen bajo la alta presión metalostática. Insuficiente peso del molde o resistencia de sujeción del molde.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 2

Etapa de moldeo

El moldeo es uno de los principales elementos dentro del proceso de fabricación de piezas fundidas. Sus propiedades dependen, en gran medida, de las características de la arena utilizada para la conformación de moldes.

Este procedimiento comprende:

- La selección, dosificación y preparación de arenas.
- La conformación del molde.
- La preparación y colocación de machos.

En la actualidad, aproximadamente dos tercios de las fundiciones de aleaciones de hierro (especialmente, fundiciones grises) se producen en sistemas de arena verde, denominado así porque la arena se encuentra aglomerada con arcilla humedecida. Estas arenas principalmente están constituidas por arenas de sílice (88 – 92%) a las que se les añade bentonita (6 – 12%) y agua (3 – 6%), con el fin de que la mezcla sea lo suficiente plástica como para fluir y adaptarse rígidamente al molde y lo suficientemente resistente como para mantener su forma durante el desmoldeo y posterior colada. (Spirutová, Beno, Bednárová, Kriz, & Kandrnl, 2012)

El moldeo se realiza por compactación, que puede ser manual (apisonado) o mecánica mediante moldeadoras (por sacudidas, prensado, vibración, vacío, de aire comprimido, etc.).

El moldeo manual, pese a las herramientas tecnológicas de hoy, sigue siendo muy utilizado. En este procedimiento, el moldeador emplea herramientas para conformar el molde y su esfuerzo para darle el acabado que espera.

El moldeo mecánico, por su parte, es el procedimiento en el que se emplean máquinas especiales para preparar los moldes. La mecanización de este proceso ofrece:

- a. Reducción del tiempo empleado en el trabajo.
- b. Disminución del costo.
- c. Mejores condiciones de trabajo para los operarios.
- d. Optimización del atacado uniforme y constante de las arenas.

De los dos tipos de procedimiento comentados anteriormente, se abordará el proceso de moldeo en verde realizado manualmente. En la Figura 12 se muestra el esquema del proceso de moldeo en verde.

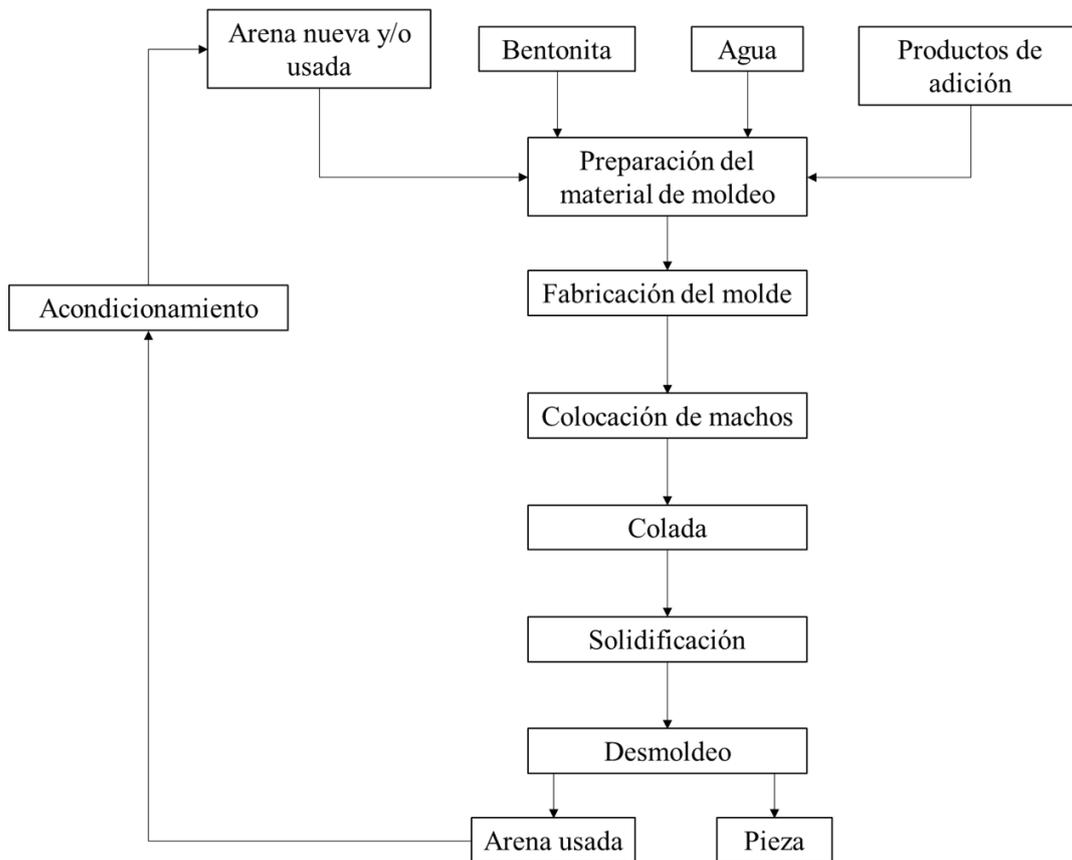


Figura 12. Representación esquemática del proceso de moldeo mediante arena verde.

Fuente: IHOBE S.A., 2011.

Después de la selección, dosificación y preparación de arenas que conformarán el molde se procede a confeccionarlo y colocar los machos. A continuación, se enlistan las actividades que se realizan después de la preparación de arenas:

- Humedecer las paredes interiores de la caja de moldeo (con una suspensión de arcilla en agua) para asegurar la adhesión de la arena de moldeo.
- Colocar el modelo sobre un tablero de moldeo, junto con la mitad inferior de la caja, de modo que permita un apisonado efectivo y quede suficiente espacio para los canales de colada.
- Cubrir el modelo con arenilla de careado, comprimiéndola alrededor de éste con la mano.¹¹
- Llenar la caja con arena ordinaria o de relleno, apisonándola suficientemente para consolidarla.¹²

¹¹ Espesor de la arenilla de careado sobre el modelo: de 5 a 10 cm.

¹² El apisonamiento no debe ser excesivo o impedirá el escape de aire y gases a través de las paredes del modelo; sino que, debe apisonarse lo suficiente o el molde no serpa lo bastante fuerte para resistir la acción erosiva del metal fundido.

- e. Cortar el exceso de arena sobre la primera parte de la caja con una rasqueta¹³.
- f. Espolvorear una pequeña cantidad de arena suelta sobre la superficie tersa de la primera parte del molde para dar una cama a la tarima.
- g. Voltar la semicaja inferior, retirando la tarima de moldeo.
- h. Espolvorear arena de separación (de sílice sin arcilla o de moldeo quemada) con el objetivo de evitar que se unan las mitades del molde al apisonar la caja superior.
- i. Colocar la caja superior, centrándola mediante pasadores de registro (pernos y agujeros en las orejas).
- j. Disponer de bebederos, cargadores, mazarotas sujetándolas con una pequeña cantidad de arena apisonada a su alrededor¹⁴.
- k. Colocar arenilla de careado y de relleno en la caja superior y en el caso de un molde de gran tamaño, se incorporan ganchos¹⁵.
- l. Aflojar el bebedero y los cargadores, y de ser necesario, hacer agujeros en la parte superior del molde con un alambre delgado para facilitar el escape de los gases¹⁶.
- m. Extraer el bebedero y el cargador. Abrir el molde, levantando con cuidado la caja superior, siguiendo las guías de los pasadores de registro.
- n. Con un pincel mojado, humedecer el contorno del modelo.
- o. Introducir tirafondos o tornillos de extracción en un agujero roscado en el modelo.
- p. Golpear ligeramente con una barra y un martillo los lados del modelo.
- q. Cortar los canales de alimentación, formando los embudos y asientos para filtros, biselando las esquinas agudas en los conos del bebedero para reducir al mínimo la erosión de la arena durante el vaciado.
- r. Retocar la mitad inferior del molde, corrigiendo las fallas menores alrededor del modelo.
- s. Redondear los salientes con los alisadores de ángulo adecuados, reforzar con varillas o clavos las paredes expuestas.
- t. Quitar los residuos de arena u otros materiales.
- u. Espolvorear grafito en el molde o si la colada es en seco, barnizar, utilizando un pincel blando.

2.1 Selección de insumos para moldeo.

En la producción de piezas fundidas, las propiedades de las arenas de fundición utilizadas para fabricar los moldes son de vital importancia ya que determinan en gran medida la aparición de defectos y por ende la calidad y propiedades de las piezas obtenidas.

Sus propiedades dependen de la distribución granulométrica de la arena y de la cantidad relativa de los componentes en la mezcla de moldeo.

A continuación, se describen las principales características de las arenas, los aglutinantes y otros aditivos que conforman las tierras de moldeo con las que se elaboran los moldes.

¹³ Herramienta formada por una plancha de hierro más o menos triangular y un mango de madera que sirve para raspar superficies.

¹⁴ Los bebederos permiten la admisión de metal fundido a la cavidad del molde, mientras que una de las funciones del cargador es suministrar una reserva para retroalimentar el metal fundido al vaciado al solidificarse y contraerse éste.

¹⁵ Alambres de forma adecuada o varillas que se introducen para darle resistencia en forma similar a como se emplea el refuerzo de acero en concreto armado.

¹⁶ Si la arena de moldeo es lo suficientemente permeable al gas, no será necesaria la ventilación.

2.1.1. Tierras de moldeo

De acuerdo a la *American Foundrymen's Society – AFS* (1967), las tierras de moldeo son una mezcla de características y propiedades necesarias para obtener una pieza de fundición solidificada de alta calidad. Por lo general, se componen amplia o totalmente de sílice (SiO_2), aglutinantes como la bentonita y un cierto porcentaje de humedad. En algunos casos, los granos de sílice están asociados con diminutas cantidades de feldespatos, mica y otros minerales comunes.

Se forman por la desintegración de rocas bajo la acción de las bajas temperaturas, el viento y la lluvia, creadas como una sucesiva separación de sustancias minerales, o también por la meteorización de los sedimentos de diversas soluciones naturales. Sus tamaños de grano generalmente varían entre 0.1 a 2 mm.

Deben cumplir ciertos requisitos, por ejemplo:

- Ser fácilmente moldeables, de manera que se adapten perfectamente a las formas del modelo y las reproduzca fielmente.
- Presentar una buena resistencia a la erosión producida por el desplazamiento e impacto del metal líquido en el interior del molde.
- Resistencia a los ataques químicos que pueden producirse entre el moldeo y el metal líquido.
- Refractariedad, es decir, ofrecer una adecuada resistencia a altas temperaturas.
- Poseer una buena permeabilidad para permitir la evacuación de los gases que se generan durante la colada del molde y del aire que ocupa inicialmente la cavidad.
- Buena capacidad para disipar la energía térmica del metal líquido y favorecer así la correcta solidificación de las piezas.
- Ser colapsable, es decir, presentar una buena capacidad de disgregación.
- Generar buenos acabados superficiales a las piezas.
- Ser reutilizable, de manera que, una vez regenerada pueda moldearse nuevamente.

a. Arenas de fundición

Comúnmente se emplean arenas minerales en la fabricación de los moldes, por su carácter refractario, siendo las más empleadas las de sílice, cromita, zirconio y olivino. En el Anexo B.1, se puede encontrar la clasificación completa de las arenas de fundición.

En el año 2005, el ingeniero Jon Sertucha publicó una investigación titulada “Materiales orgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición”. En esta, junto a su compañero Ramón Suárez, resalta las características de los insumos de moldeo y su influencia en la incidencia de defectos en las piezas fabricadas.

Sertucha y Suárez (2005) afirman que la arena de sílice es la de mayor uso en el moldeo de piezas de fundición. A pesar de que sus características no son las que mejor responden a exigencias del moldeo, su bajo costo y gran abundancia las convierten en las más utilizables.

Se caracterizan por tener un elevado poder de compactación y son de gran disponibilidad en cuanto a tamaños y/o distribuciones de grano.

La utilización de otros tipos de arena que no sea la de sílice, está normalmente asociada a la presencia de defectos en las piezas. Estas irregularidades son consecuencia, tanto de las características de la sílice, especialmente su alta expansión y baja difusividad térmica; como de la naturaleza del metal colado en los moldes.

Respecto de la naturaleza del material, se puede destacar su capacidad de contracción del material a lo largo de la solidificación (formación de rechupes) y las reacciones molde – metal. Por ejemplo, cuando se cuelean aceros de alto contenido de manganeso se prefiere utilizar moldes de arena de Olivino - $[\text{Mg}, \text{Fe}]2\text{SiO}_4$, por la fácil reacción de la sílice con este metal.

En cuanto a los defectos asociados a la expansión térmica, se conoce que los granos de sílice pueden originar roturas en los moldes y, consecuentemente, defectos en las piezas. Para evitar la utilización de arenas alternativas más caras (cromita, olivino, zirconio) y eliminar los defectos provocados por la expansión térmica, es necesario crear un “colchón” que rodee los granos utilizando los materiales necesarios para dotar a las mezclas de características aptas para el moldeo, tales como: arcilla aglutinante, agua y materiales carbonosos.

Otra de las razones principales para la utilización de arenas diferentes a la de sílice es la necesidad de disipar más rápidamente el calor del metal colado en los moldes. Las velocidades de solidificación de las piezas dependen tanto de su masa como de la conductividad térmica de la arena que constituye el molde. Una solidificación lenta aumenta el poder de contracción del metal y, en determinadas ocasiones, favorece la formación de discontinuidades conocidas como “rechupes”. Estos defectos pueden invalidar las piezas fabricadas y, entre otros problemas, incrementar los costos del proceso. Las arenas con mayor capacidad para disipar el calor generado por la colada actúan de sistemas enfriadores que ayudan a minimizar los efectos de contracción del metal y los defectos que de ello se derivan.

La arena cromita – $[\text{Fe}, \text{Mg}]\text{Cr}_2\text{O}_4$ – es la más utilizada en este sentido, tanto en la fabricación de machos como de moldes. Sin embargo, su elevada densidad y su poder contaminante desaconseja su utilización, salvo en casos muy especiales.

Independientemente de la naturaleza química de las arenas, existen otros factores morfológicos que juegan un papel crucial en las propiedades de los moldes: forma, tamaño y distribución de los granos. La caracterización de las arenas de fundición en función al tamaño y distribución de sus granos llevan a definir el denominado “índice de finura”. Además, existe una serie de parámetros de control utilizados habitualmente por los proveedores de arenas de fundición. Éstos, son imprescindibles para el fundidor y en numerosas ocasiones son útiles para detectar el origen de determinados defectos aparecidos en las piezas fabricadas. Los más importantes son: humedad, composición química (fundamentalmente los contenidos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO),

resistencia a la compresión en verde, compactabilidad, permeabilidad y forma de granos.

En la Tabla 5, se especifican algunos requerimientos establecidos en varias arenas comerciales de sílice y cromita.

Tabla 5. Características en algunos tipos de arenas comerciales.

Característica	Tipo de arena				
	L 50 – 60	C55	L 80 – 90	L 105 – 115	Cromita
Apariencia	Color amarillento y sin grumos (sílice)				Negra y brillante
Forma de los granos	Subangular	Redondeada	Subangular	Subangular	Angular
Humedad (%)	<0.05				<0.2
Índice AFS	48 – 60	51 – 61	77 – 92	95 – 115	45 – 65
Granulometría					
>0.500 mm	≤ 9	≤ 5	≤ 6	≤ 8	≤ 2
0.500 – 0.125 mm	≥ 87	≥ 90.5	≥ 84	≥ 89	≥ 92
<0.125 mm	≤ 6.5	1.5 – 4.5	≤ 2.5	≤ 5	≤ 5
<20µm	≤ 0.7	≤ 0.4	≤ 0.9	≤ 0.9	≤ 0.5
Demanda de ácido (ml/100g)	≤ 6	≤ 5	≤ 6	≤ 6	----
pH	5 – 6				7 – 9
Punto de sinterización (°C)	≤ 1500	≤ 1450	≤ 1500	≤ 1500	----
Análisis químico (%)					
SiO ₂	≥ 99	≥ 98	≥ 98.5	≥ 98.5	≤ 1.5
Cr ₂ O ₃					44 – 48
FeO					23 – 28

Fuente: Sertucha & Juárez, 2005.

b. Aglutinantes o aglomerantes en las arenas de fundición

El molde debe cumplir dos características aparentemente contrapuestas que tienen que ver con los aglomerantes de la arena. Por un lado, debe ser lo suficientemente rígido como para aguantar el flujo del metal en su interior y por otro, lo suficientemente frágil como para que se fragmente una vez cumplida su función, solidificada la pieza e iniciada la operación de desmoldeo. (IHOBE, 2011).

El aglomerante de las arenas de moldes y machos se selecciona en base a los más variados criterios, tales como: tipo y tamaño de las piezas que se va a fabricar, especificaciones y tamaño de la serie, fiabilidad del proceso, seguridad laboral y medioambiental y rentabilidad del método.

Su eficiencia influye directamente en las fuerzas de cohesión que mantienen unidos los granos tras el proceso de compactación y, por tanto, en la dureza y resistencia de los moldes fabricados.

En el moldeo en verde, la cohesión de los granos de arena se lleva a cabo con ayuda de una arcilla mineral mezclada con una determinada cantidad de agua. En este sentido, la eficacia del proceso de mezclado y la obtención de un grado de humedad adecuado al finalizar la preparación de las mezclas, son factores críticos a la hora de recubrir de manera satisfactoria los granos, desarrollar adecuadamente las propiedades de las arenas de moldeo en verde y, por tanto, las características de los moldes.

La utilización de arcillas en la fundición está basada en las propiedades aglutinantes¹⁷ que presentan estos materiales cuando se mezclan con agua. Por ejemplo:

- La cohesión o tendencia de las partículas a mantenerse unidas, está relacionada con la resistencia que generan las uniones electrostáticas cuando se produce un desplazamiento entre los cristales y/o partículas de arcilla.
- La plasticidad se obtiene al aplicar sobre la mezcla una energía de amasado suficiente para que las partículas de arcilla resbalen unas sobre otras.
- La adhesión sobre otros materiales es una propiedad fundamental de las mezclas arcilla – agua, ya que si aparece un objeto extraño (un grano de sílice, por ejemplo), éste queda envuelto y unido a las partículas de la arcilla a través de las películas acuosas.

Entre las arcillas más conocidas, se tienen: la caolinita, montmorillonita y la illita. En el Anexo B.2 se puede ver la clasificación de las arcillas de acuerdo a su naturaleza y carácter de endurecimiento.

De todas las arcillas disponibles en la naturaleza, la montmorillonítica destaca ampliamente por su capacidad para cohesionar los granos de arena, aportando la plasticidad adecuada a las mezclas en las operaciones de moldeo (incluso después de la colada). En presencia de medio acuoso, es capaz de hincharse y permitir que las moléculas de agua se introduzcan en las tricapas que forman láminas cristalinas. Esta propiedad permite rentabilizar su utilización en las arenas en verde ya que se necesitan menores esfuerzos de mezcla.

La montmorillonita se clasifica en dos tipos: montmorillonita sódica y montmorillonita cálcica. La resistencia a la compresión en verde¹⁸ es diferente en una arena de moldeo preparada con montmorillonita sódica frente a una que contiene la variedad cálcica, debido a los distintos efectos que estos cationes tienen sobre la disposición y la rigidez de las capas de agua que se absorben en los cristales pertenecientes a la arcilla. (Sertucha & Suárez, 2005)

¹⁷ Estas vienen dadas por el tipo de constituyente predominante (montmorillonita, en el caso de las bentonitas) pero no por su capacidad para absorber agua o hinchamiento.

¹⁸ Máximo valor de esfuerzo de compresión longitudinal que puede soportar la mezcla de arena antes de romperse

La mayor aplicabilidad de las arcillas en la industria de fundición se encuentra en mezclas de arcillas montmorilloníticas (al menos del 75% de concentración), designadas habitualmente con el nombre de bentonitas, que contienen cantidades minoritarias de otros tipos de arcillas e impurezas minerales. Las mejores propiedades de aglutinación se han detectado en las llamadas bentonitas sódicas.

Por otro lado, es preciso indicar que, las arcillas aglutinantes no soportan estructuralmente las temperaturas del hierro fundido (1350 – 1450 °C), como las arenas de fundición. Este hecho supone que las bentonitas se degradan por efecto de la temperatura, perdiendo así sus propiedades. Esta es la razón por la que suelen ser necesarios pequeños aportes de bentonita cada vez que se prepara una nueva mezcla para moldeo. Por todo ello, resulta de especial interés conocer cuáles son las propiedades térmicas que muestran este tipo de arcillas. En la Tabla 6 se muestran las características térmicas de las bentonitas más comunes, empleadas en el proceso de moldeo.

Tabla 6. Características térmicas de las bentonitas.

Tipo de bentonita	Deshidratación		Estabilidad anhidra (°C)	Deshidroxilación (°C)		Pérdida de masa en el quemado (%)	Energía (J/g)
	Intervalo	T _{min}		Intervalo	T _{min}		
Sódica natural	20 – 165	105	165 – 550	550 – 750	690	4.5	288.3
Sódica activada	20 – 165	115	165 – 380	380 – 740	495 680	6.5	126.5 179.6
Cálcica	20 – 180	100	180 – 330	330 – 765	700	6.5	404.9

Fuente: Sertucha & Juárez, 2005.

Al igual que las arenas base, la realización de ensayos de control sobre los productos aglutinantes constituye un método eficaz para evitar variaciones en la calidad del suministro y, consecuentemente, problemas en el correcto funcionamiento del sistema de preparación de las arenas de moldeo.

Las características comúnmente analizadas sobre una bentonita son: el índice de hinchamiento y el ensayo del azul de metileno, los cuales son utilizados, habitualmente, para el control *in situ* en los talleres de fundición. En el Anexo B.3 se describe el ensayo de azul de metileno.

Independientemente de la calidad, la granulometría de las bentonitas en el estado de suministro es un factor crítico a la hora de evaluar su capacidad de aglutinación. La elaboración de mezclas eficaces depende en gran medida del tamaño de los granos de la arcilla. De este modo, los cristales muestran mejores propiedades de cohesión cuanto más finos se encuentran en el estado de partida.

Otro factor que influye directamente en la calidad de las mezclas de arena es el tipo de agua utilizada. Las impurezas tipo sales minerales (especialmente los carbonatos o el NaCl) u otras sustancias de naturaleza orgánica (residuos) son altamente perjudiciales puesto que se introducen en la estructura cristalina de las arcillas durante el proceso de mezclado y las desactivan.

c. Pinturas y pastas antiadherentes

Uno de los problemas típicos de las piezas de fundición puede estar directamente relacionado con lo que se denomina reacción molde-metal. Puede ser motivo suficiente para rechazar las piezas, por lo que si las condiciones del hierro o del molde favorecen esta reacción es aconsejable utilizar materiales de revestimiento.

Se trata de pinturas, plumbaginas, negro para moldes u otros materiales que se aplican sobre los moldes o machos con el fin de evitar esa reacción y consiguiendo, a la vez, un mejor acabado superficial de la pieza. (IHOBE, 2011)

Por lo general son pinturas y pastas antiadherentes. Éstos son considerados materiales auxiliares para las tierras de moldeo y tienen como finalidad mejorar sus propiedades: permeabilidad, poder refractario, compresibilidad, desmoldeo, etc.

En la Figura 13 se describen los principales tipos de materiales auxiliares para tierras de moldeo.

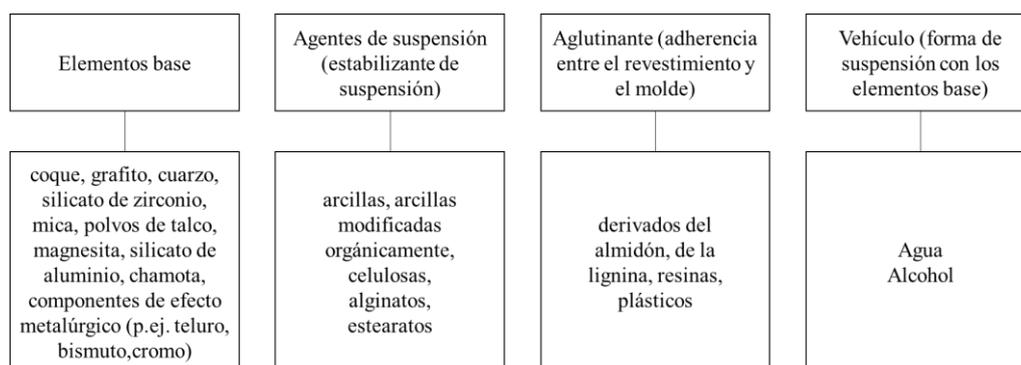


Figura 13. Materiales de revestimiento para moldes.

Fuente: IHOBE, 2011.

En el Anexo B.4: *Composición de las pinturas para fundición*, se muestra a detalle los principales componentes de las pinturas para moldes y machos.

d. Impurezas y límites de tolerancia

Las tierras de moldeo también pueden tener impurezas que serán toleradas si están en determinados límites para no perjudicar las propiedades de la tierra. Entre las impurezas se encuentran:

- El óxido de hierro, que disminuye la refractariedad. Es tolerado en un máximo del 3%, (entre 0,25 y 1% mejora la resistencia en caliente).
- El óxido de aluminio con sílice, que forma silicatos fusibles y disminuye la refractariedad. Es tolerado hasta en un 2%.
- El carbonato de calcio, que al ser sometido a la acción del calor se descompone en CO_2 y CaO . El primero causa sopladuras y el CaO se combina con la sílice formando un silicato que funde fácilmente y se introduce en el caldo. Su presencia se aprecia con la efervescencia que

produce el desprendimiento del CO₂ al tratar la arena con ácido clorhídrico diluido.

- El carbonato de magnesio, que produce los mismos inconvenientes del carbonato de calcio. Es tolerado hasta en 1%.
- Las sales de potasio, que disminuyen la cohesión en caliente y provocan el derrumbe del molde.
- La mica, que presenta los mismos inconvenientes del óxido de calcio.

La calidad de la arena verde de una fundición tiene un impacto definitivo en la calidad de los moldes. El mantenimiento y control de la arena no solamente es un trabajo importante, sino también, exigente y requiere una serie de ensayos para ejercer control sobre su consistencia.

Los ensayos se dividen en dos categorías: determinación de las características (humedad, determinación de arcilla y sílice, granulometría e índice de finura) y propiedades (deformabilidad, fluencia, permeabilidad, refractariedad, cohesión, tracción, compresión, corte, fatiga, etc.). Ensayos, tales como: humedad, permeabilidad, compresión verde y compactabilidad, se utilizan para verificar la consistencia de la arena. Dichas pruebas, junto con ensayos de propiedades físicas como: pérdida de ignición (LOI), arcilla y azul de metileno pueden explicar la calidad del vaciado.

Para obtener resultados comparables, cada ensayo se debe ejecutar de acuerdo con los métodos estándar de AFS, con equipos previamente revisados y calibrados.

2.1.2. Ensayos para determinar las características físicas de las tierras de moldeo

Para determinar las características de las tierras de moldeo se realizan cuatro ensayos fundamentales: porcentaje de humedad, proporción de sílice y arcilla, la forma y tamaño de granos.

Estos ensayos se realizan para verificar las características de las tierras o arenas; para corregir o regular el porcentaje de sus componentes (sílice, apelmazamiento, agua, etc.) y, de esa manera, reducir la aparición de defectos en las piezas.

a. Determinación del porcentaje de humedad

La cantidad de agua en la arena de moldeo activa el poder ligante de la arcilla, proporcionando plasticidad a la mezcla. Por ello, los diferentes tipos y cantidades de arcilla requieren diferentes cantidades de agua para lograr las mejores propiedades.

El contenido de agua afecta a todas las propiedades de la arena verde, con la excepción del número de finura de grano de la arena base. El exceso de agua produce una atmósfera oxidante en el molde, una evolución excesiva del gas, una menor permeabilidad, una alta resistencia al secado y al calor, una baja dureza del molde y una mala fluidez. Por lo que, el contenido de humedad de una arena verde debe mantenerse dentro de un rango controlado.

Dos factores que afectan el contenido de humedad son: el tipo y la cantidad de arcilla y aditivos en la mezcla de arena. (Granlund, 1999)

- **Procedimiento:** El porcentaje de humedad, de acuerdo al Manual de Arenas para fundición de la AFS, se determina por la pérdida de peso de una muestra húmeda después de haberla calentado a una temperatura de 110°C. Se calcula a partir de la diferencia de los dos pesos antes y después del secado, según la expresión que se muestra en la Ecuación 1¹⁹:

$$H\% = \frac{(W - W_{seca}) * 100}{W} \quad [1]$$

Donde:

- W : peso de la arena antes del secado.
- W_{seca} : peso de la arena después del secado.
- $H\%$: porcentaje de humedad

Se seca la muestra húmeda a 104 – 110 °C, hasta lograr un peso constante en una estufa o un horno, calentada uniformemente²⁰, enfriándola a la temperatura ambiente en un secador y volviendo a pesarla en una balanza con una sensibilidad de ±20 mg.

El tiempo de secado dependerá del tipo de muestra (básicamente de su peso y humedad), y normalmente, no suele pasarse de los 15 minutos para muestras de 150 gr.

El porcentaje de humedad en la arena de moldeo también se puede determinar mediante un instrumento conocido como *analizador rápido de humedad*. Este instrumento se basa en el principio de reacción con el carburo de calcio y la formación de gas de acetileno que se puede medir. Dicho valor será directamente proporcional al contenido de humedad. Este instrumento está provisto de un manómetro calibrado para leer directamente el porcentaje de humedad presente en la arena de moldeo. Algunos instrumentos de prueba de humedad se basan en el principio de la conductividad eléctrica de la arena, que varía con el contenido de humedad que contiene.

b. Determinación del porcentaje de arcilla y sílice

- **Procedimiento:** Para determinar el porcentaje de arcilla, se colocan 50g de la muestra en un levitador o agitador y se le agrega hidróxido de sodio (NaOH) diluido en agua destilada. Se agita la tierra y se dejan sedimentar los granos. Luego, se separa el agua turbia con un sifón y se repite la operación hasta que el residuo obtenido quede limpio (después de que

¹⁹ Es importante indicar que el contenido de humedad debe expresarse en el porcentaje de la muestra húmeda original.

²⁰ Es importante que la temperatura en el horno se mantenga lo más constante posible. Se recomienda una variación de temperatura de un ±5%.

repose 10 minutos, aproximadamente), es decir, libre de arcilla. A continuación, se procede a secarla en una placa caliente, entre 105 – 110 °C. La diferencia de pesos (el inicial y el final) dará el contenido de arcilla y, por consiguiente, el de sílice, como se muestra en la Ecuación 2:

$$A\% = 100 * \frac{(m - m_1)}{m} \quad [2]$$

Donde:

- A% : Porcentaje de arcilla en la muestra
 m : masa en gramos de la muestra original (50g).
 m₁ : masa en gramos de la muestra después de secarse, sin arcilla.

La importancia de la determinación de arcilla y sílice radica en que la refractariedad de la arena es función del contenido de sílice y resulta siempre modificada por la presencia de otros elementos.

c. Granulometría (forma y tamaño de los granos)

La granulometría de una tierra o arena de fundición expresa la distribución porcentual de los granos de diferentes tamaños.

Para determinar la forma y tamaño de los granos, se procede, previamente, a la separación de los materiales arcillosos de la sílice de una muestra de arena, como se describió en el procedimiento para determinar el porcentaje de arcilla y sílice.

Las formas de los granos de sílice limpios pueden observarse cómodamente con un microscopio de pocos aumentos. De acuerdo al Manual de arenas de fundición, estos granos pueden ser: angulares, sub – angulares, redondos o compuestos, como se observa en la Figura 14.

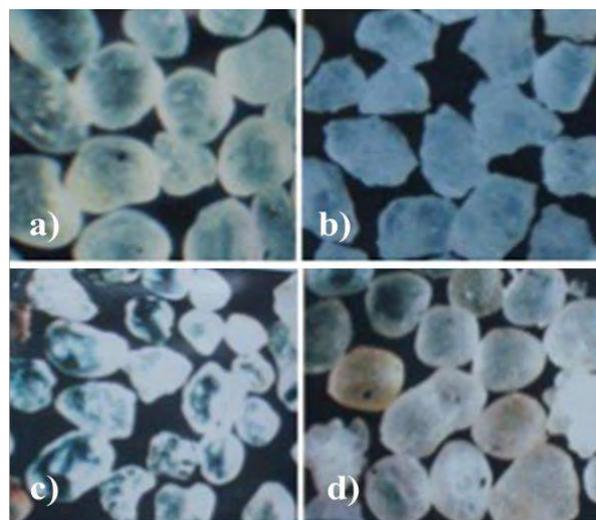


Figura 14. Clasificación de los granos de arena según la AFS.
 a) Redondeados. b) Angulares. c) Sub-angulares. d) Compuestos.
Fuente: AFS, 1967.

Por otro lado, el Manual del fundidor de metales ferrosos – FOSECO (2000), hace una clasificación de los granos de arena a partir de su angulosidad y esfericidad. En la Figura 15 se puede ver esta clasificación.

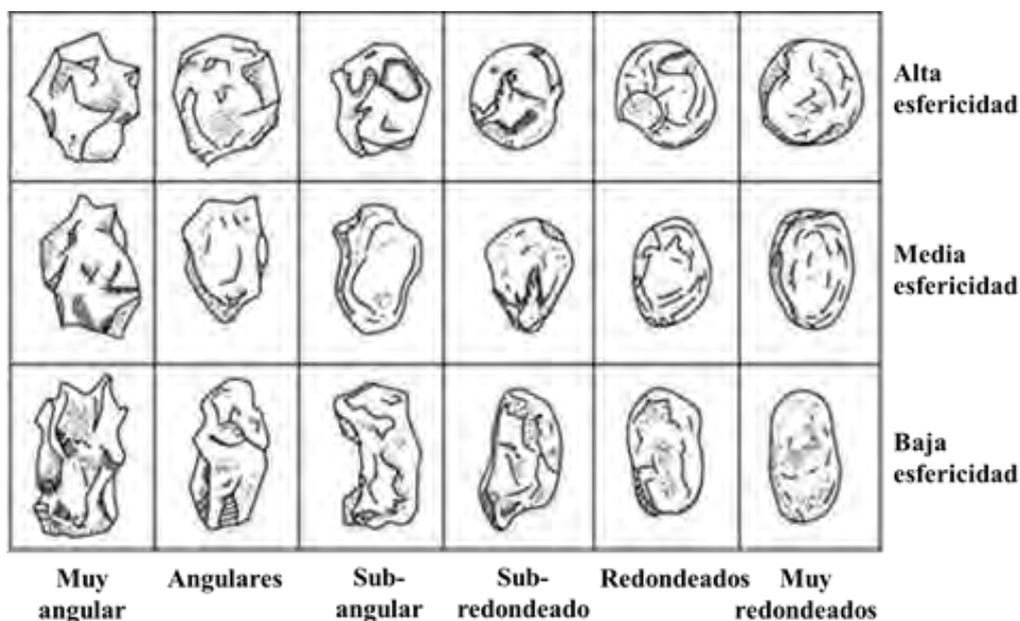


Figura 15. Clasificación de los granos de arena según su angulosidad y esfericidad.
Fuente: Brown, 2000.

Las mejores arenas de fundición tienen granos redondeados de esfericidad moderada (entre alta y media), lo que confiere buena fluidez y permeabilidad con alta resistencia a la mezcla con bajas adiciones de aglutinantes. Granos más angulares con baja esfericidad requieren de una mayor adición de aglutinante. Además, tienen una menor densidad de empaquetamiento y una fluidez más baja. (Brown J. R., 2000)

Los tamaños de los granos se determinan a partir del índice de finura, un número convencional que indica el tamaño promedio de los granos de la arena con un diámetro menor que 0.02 mm.

d. Índice de finura

El índice de finura es, aproximadamente, el número de mallas por pulgada del tamiz que justamente dejaría pasar la muestra si sus granos fuesen de tamaño uniforme.

Representa el tamaño medio de una partícula de arena silícea. Este tamaño influye en la permeabilidad de una tierra de moldeo. En efecto, cuanto mayor es el tamaño de grano, mayor es la permeabilidad que se espera obtener, manteniendo constante las otras propiedades.

La finura de la arena influye en las propiedades físicas de los moldes, así como, en la unión requerida y el acabado superficial de las piezas fundidas.

- **Procedimiento:** Para llevar a cabo la prueba de finura de grano, se coloca una muestra de arena de sílice seca de 50 gramos sin arcilla en un tamiz superior (que lleva el número equivalente de la serie americana, 6). Se monta un juego de 11 tamices estándar: 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 y 270, sobre un agitador mecánico, en el que se agita la muestra durante 15 minutos, aproximadamente. Posteriormente, se pesa el contenido de arena retenido en cada uno de los tamices. A este valor se le multiplica por 2, obteniéndose el *porcentaje de arena retenido por cada tamiz*. Este nuevo valor se multiplica por un factor K, cuyo valor está definido por la abertura de malla del tamiz de retención. Al producto total del factor K y el porcentaje de arena retenido se le divide por el total de arena retenida en los diferentes tamices, dando como resultado, el índice de finura.

En la Tabla 7 se muestra la clasificación de los tamices según el sistema del AFS.

Tabla 7. Clasificación de los granos de tierra según el sistema A.F.S.

Tamiz N°	Abertura de la malla (mm.)	Factor K
6	3.360	3
12	1.680	5
20	0.840	10
30	0.590	20
40	0.420	30
50	0.297	40
70	0.210	50
100	0.149	70
140	0.105	100
200	0.074	140
270	0.053	200
Polvos	-	300

Fuente: AFS, 1967

El índice de finura de la arena se puede obtener de la Ecuación 3:

$$IF = \frac{\sum(p_i * K_i)}{\sum(p_i)} \quad [3]$$

Donde:

IF : Índice de finura

p_i : porcentajes sobre el total de los tamices individuales

K_i : Factor K

En el “Manual de arenas de fundición” se muestra un ejemplo de cálculo del índice de finura, que se muestra en la Tabla 8.

$$IF = \frac{\text{Producto total}}{\% \text{ total de grano retenido}} = \frac{15243}{88.2} = 173$$

Tabla 8. Cálculos típicos del número de finura de grano AFS.

Tamaño de la muestra: 50 g Contenido de arcilla AFS: 5.9 gr o 11.8% Granos de arena: 44.1 o 88.2%				
Núm. equiv. de la serie E.U.A.	Cantidad de la muestra de 50 gr retenida en el tamiz		Multiplicador	Producto
	Gramos	Por ciento		
6	Ninguno	0.0	3	0
12	Ninguno	0.0	5	0
20	Ninguno	0.0	10	0
30	Ninguno	0.0	20	0
40	0.20	0.4	30	12
50	0.65	1.3	40	52
70	1.20	2.4	50	120
100	2.25	4.5	70	315
140	8.55	17.1	100	1710
200	11.05	22.1	140	3094
270	10.90	21.8	200	4360
Polvos	9.30	18.6	300	5580
Total	44.10	88.2		15243

Fuente: AFS, 1967.

Con estos datos se puede completar la clasificación de las arenas, según el tamaño de sus granos, del modo siguiente:

- a) Arena gruesa muy : índice AFS inferior a 18
(granos comprendidos entre 1 y 2 mm)
- b) Arena gruesa : índice AFS comprendido entre 18 y 35
(granos comprendidos entre 0.5 y 1mm)
- c) Arena media : índice AFS comprendido entre 35 y 60
(granos comprendidos entre 0.25 y 0.5 mm)
- d) Arena fina : índice AFS comprendido entre 60 y 150
(granos comprendidos entre 0.10 y 0.25 mm)
- e) Arena finísima : índice AFS mayor a 150
(granos inferiores a 0.10 mm).

2.1.3. Ensayos para determinar las propiedades de las tierras de moldeo

Las propiedades con las que debe contar una tierra de moldeo dependen, esencialmente, del tipo de aleación que se va a fundir, del tamaño de la pieza, del tipo de moldeo, etc.

Para determinarlas, hace falta fabricar una probeta de moldeo estándar. El “Manual de arenas de fundición” del AFS, sugiere emplear probetas cilíndricas y de exactamente 50.8 ± 0.025 mm de diámetro, $50.8 \text{ mm} \pm 0.793$ de altura, preparadas en el pisón de arena. En la Figura 16 se muestra un pisón de arena para fabricar probetas estándar. Estas probetas se utilizan para ensayos de permeabilidad, resistencia a la compresión, resistencia al corte y a la deformación en verde.



Figura 16. Pisón de arena.
Fuente: AFS, 1967.

a. Ensayo de deformabilidad

La deformabilidad mide la disminución expresada en tanto por ciento de la longitud de una probeta de tierra sometida a un ensayo de compresión hasta su ruptura. Depende del contenido de arcilla, de la humedad y la forma de los granos. Tal es así que, la más alta deformabilidad está asociada con las arenas de granos angulares de mayor contenido de arcilla.

El ensayo se realiza con una prensa hidráulica operada a mano. Se comprime una probeta para proceder a romperla y medir su nueva longitud y determinar así el factor de deformabilidad (de la longitud inicial de la probeta es de $50.8 \pm 0,8$ mm).

b. Ensayo de fluencia

La fluencia se determina apisonando el extremo de una probeta estándar, sobre la que se deja caer tres veces un pistón de 6.66 kg desde una altura de 50 mm. Después, se mide la dureza superficial de la arena en cada extremo de la probeta con un

durómetro y se toma como cifra de fluencia la relación entre la dureza del extremo superior y la dureza del extremo inferior expresándola en tanto por ciento.

La dureza superficial se define por la resistencia a la penetración de una esfera de acero impartido por un durómetro. La escala de valores más usual varía de 0 a 100 HB, siendo la dureza 30, en los moldes muy blandos y 80, en los moldes muy duros. Esta propiedad depende de todas las propiedades de la tierra (composición, humedad, finura) y el grado de compactación.

c. Ensayo de permeabilidad

La permeabilidad se define como la propiedad física de la masa moldeada de una mezcla de arena que permite el paso de gas a través de la misma. Es función de varios parámetros, tales como:

- Granulometría. Cuanto más finos los granos, menor permeabilidad.
- Forma de los granos. Granos redondeados dan mejor permeabilidad que los granos angulosos.
- Contenido de arcilla. A mayor contenido de arcilla, más acoplados y soldados quedarán unos granos con otros y, por tanto, la permeabilidad será menor.
- Intensidad del apisonado, a mayor intensidad del apisonado disminuye la permeabilidad.

Un aumento en la permeabilidad, generalmente, indica una estructura más abierta en la arena apisonada, y si el aumento continúa, conducirá a defectos del tipo de penetración y piezas de fundición en bruto. Una disminución de la permeabilidad indica un empaquetado más ajustado y podría provocar sopladuras y poros.

- *Procedimiento*: Se determina por la cantidad de aire que puede pasar a través de la muestra cilíndrica de norma AFS bajo una presión normalizada. (American Foundrymen's Society, 1967).

De acuerdo al Manual de arenas de fundición del AFS, se expresa como el volumen de aire, en cm^3 , que pasa por minuto, bajo una presión de un gramo/ cm^2 , a través de una probeta de 1cm^2 de superficie trasversal y 1 cm de altura. Numéricamente, la permeabilidad está definida por la Ecuación 4:

$$P = \frac{v * h}{p * a * t} \quad [4]$$

Donde:

- P : número de permeabilidad
- v : volumen de aire que pasa a través de la probeta en cc.
- h : altura de la probeta en cm.
- p : presión del aire en gramos/ cm^2
- a : superficie trasversal de la probeta en cm^2
- t : tiempo en minutos.

En la Figura 17 se muestra el equipo con el que se realizan estos ensayos.



Figura 17. Permeámetro digital.

Fuente: Tecnofound. Visto en:

<http://www.tecnofund.com.br/esp/control-macharia/>

d. Ensayo de refractariedad.

La refractariedad de una arena se determina por la temperatura a la que puede someterse sin presentar signos de fusión. Está relacionada con la sílice y su punto de vitrificación. La forma y el tamaño de los granos tienen una notable influencia sobre la refractariedad: los granos angulosos sinterizan más fácilmente que los esféricos, y los finos más que los gruesos.

La refractariedad de la arena de moldeo se evalúa calentando la muestra de arena estándar de la American Foundry Society (A.F.S) a rangos de temperaturas muy altas dependiendo del tipo de arena, por ejemplo, debe poder resistir temperaturas de 1350° a 1400°C; las arenas para aleaciones de metales no ferrosos, por su parte, de 850 a 1400 °C.

- *Procedimiento:* El procedimiento consiste en colocar la muestra de arena en un recipiente de porcelana para ponerlo en el horno eléctrico. Por lo general, se da inicio a la prueba con una temperatura de 1000 ° C y se eleva la temperatura gradualmente, de 100 ° C en 100°C, hasta llegar a los 1300 ° C y de 50 ° en 50°, por encima de 1300 ° C hasta que tiene lugar la sinterización de los granos de arena de sílice. Cada nivel de temperatura, se mantiene durante al menos tres minutos y luego se saca del horno para su examen bajo un microscopio para evaluar las características de la superficie.

e. Ensayo de cohesión

La cohesión de una arena es consecuencia directa de la acción del aglutinante y depende de la naturaleza y contenido de este último, así como, del porcentaje de humedad. Se puede establecer por medio de cuatro pruebas que determinan las cargas

de rotura por compresión, por tracción, por flexión y por corte. La más importante es la primera, porque indica si la arena, al moldearse, será capaz de soportar las fuerzas a que será sometido el molde durante las diversas operaciones.

f. Ensayos de esfuerzos de tracción

La resistencia a la tracción de una mezcla de arena de moldeo es la resistencia máxima que es capaz de soportar cuando se le prepara, comprime y ensaya de acuerdo, con los procedimientos establecidos por la norma. Este método se emplea normalmente para mezclas de arena con valores bajos de resistencia a la tracción, ensayando las probetas cilíndricas estándar descritas inicialmente, a las que se les aplica una carga de tracción uniforme a lo largo del eje de la probeta de ensayo.

Para ensayos de mezclas de arena con características elevadas de resistencia a la tracción, se emplean probetas estándar en forma de 8. (Ver Figura 18). Sobre esta probeta se ejerce una fuerza constante de tracción en un intervalo de tiempo predeterminado hasta que se produzca la rotura. La muestra fallará en la menor sección, determinando así el máximo esfuerzo de tracción.

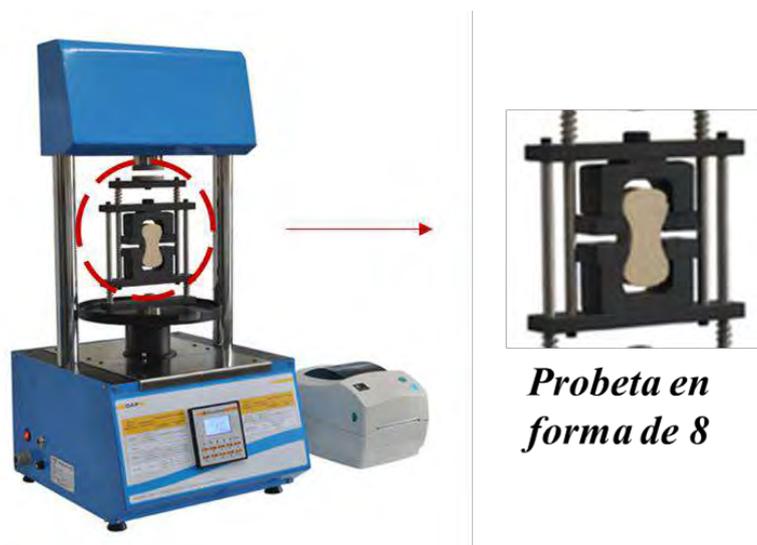


Figura 18. Máquina con mordazas para realizar ensayos de resistencia a la tracción de mezclas de arenas para machos.

Fuente: Tecnofound. Visto en: <http://www.tecnofund.com.br/esp/control-macharia/>

g. Ensayo de esfuerzos de compresión

La resistencia en verde y en seco mide la capacidad de retención de los diversos materiales de unión. En general, la prueba de resistencia a la compresión se realiza en la muestra de arena verde. Éste, se coloca en asas y la fuerza de compresión se aplica lentamente con una rueda manual hasta que la muestra se rompe. La lectura de la aguja del manómetro de alta presión y baja presión indica la resistencia a la compresión de la muestra en kgf/cm^2 .

La prueba es realizada en un probador universal de resistencia a la compresión, como se muestra en la Figura 19. Se emplea una probeta cilíndrica estándar y se ensaya, de tal manera que, el equipo empleado registre una carga creciente en forma continua

hasta que se produzca la rotura. Por ejemplo, para arenas de baja resistencia se utiliza un instrumento de compresión de tipo resorte, cuya carga máxima es de 1.06 kg/cm^2 .

Tener un equipo con una capacidad de medida alta es útil cuando se analizan probetas estándar endurecidas por algún método (por ejemplo, las tierras para machos), pero normalmente se analizan probetas estándares con arenas en verde, por lo que se recomienda el uso de una máquina de compresión universal con rango de medida no muy alto.



Figura 19. Probador universal de resistencia a la compresión en arenas.

Fuente: Tecnofund. Visto en: <http://www.tecnofund.com.br/esp/controle-macharia/>

h. Ensayo de esfuerzos de corte

La resistencia al corte en verde es la resistencia máxima al corte que puede desarrollar una mezcla de arena.

Se emplea una probeta cilíndrica estándar a la que se le aplica uniformemente una carga en las dos mitades diametralmente opuestas de las dos superficies planas de la probeta a razón de $1.69 \pm 0.35 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$, aplicándose la carga a lo largo del eje de la probeta.

i. Ensayo de fatiga

Este ensayo consiste en someter una probeta a una vibración constante. Se apoya la probeta sobre una punta en la parte superior y en la parte inferior sobre una base plana. Cuando el equipo es encendido, la base plana comienza a vibrar ejerciéndose presión sobre la probeta. Esta presión se convierte en una fuerza puntual ejercida en la punta que toca la base superior de la probeta. El ensayo termina cuando la probeta se rompe. Se cuenta el número de golpes que soporta la probeta (este valor se lee directamente en un marcador) y con un cronómetro se determina el tiempo que estuvo la probeta sometida a vibración.

2.2. Preparación de las tierras de moldeo

En el moldeo en arena se requieren operaciones de preparación, clasificación y acondicionamiento. El control de estas operaciones y de las propiedades de los insumos empleados permite determinar las características apropiadas de la mezcla. Por ello, es necesario seleccionar los materiales adecuados en función del tipo de aleación que se desee colar. Seguidamente, los materiales se deben mezclar de manera adecuada, obteniéndose un producto apto para el moldeo (compactación de la arena) y la posterior fabricación de las piezas.

Para obtener una arena de fundición hay que someter a sus constituyentes a un tratamiento que consiste, esencialmente, en mezclarlos con cierta cantidad de agua²¹. El porcentaje de humedad, confiere al componente arcilloso su característico poder ligante.

Una adecuada preparación de las arenas logra una distribución uniforme del aglutinante alrededor de los granos de arena, controla el contenido de humedad, elimina partículas extrañas y airea las arenas. (Singh, 2006)

La preparación de tierras de moldeo comprende dos fases: la depuración y la mezcla.

La depuración, incluye los procesos de recuperación y regeneración de arenas, la separación magnética de los trozos de hierro, el tamizado y el rompimiento de los bloques de arena de los moldes de coladas anteriores.

Inicialmente, se eliminan los materiales extraños (clavos, grumos de arena y metales de la arena usada) con un separador magnético. Después, se reducen los terrones de arena (moldes) y se tamiza. Una vez eliminadas todas las partículas extrañas, cuando la arena esté libre de grumos y polvos (arena extremadamente fina), se agrega la cantidad adecuada de arena pura, arcilla y aditivos necesarios para conformar la mezcla de moldeo.

Durante el mezclado, los componentes de arena se incorporan en una proporción adecuada y se mezclan completamente. Esta operación tiene como objetivo fundamental distribuir los aglutinantes, los aditivos y el contenido de humedad de manera uniforme alrededor de cada grano de arena, confirmando a la mezcla las propiedades físicas óptimas.

Hay dos métodos para agregar arcilla y agua a la arena. En el primer método, se agrega primero agua a la arena, seguida de arcilla; mientras que, en el otro método, la adición de arcilla se sigue con agua. Se ha sugerido que el mejor orden es agregar arena con agua, seguida de los aglutinantes. De esta manera, la arcilla se extiende más rápida y uniformemente a todos los granos de arena. Además, se produce menos polvo durante el apisonado.

Un mezclado inadecuado resulta en una mezcla débil que solo se puede compensar agregando más aglutinante, encareciendo el proceso.

Se puede preparar arenas manual o mecánicamente. La diferencia entre uno y otro procedimiento, es el tiempo necesario para homogeneizar la mezcla de moldeo.

Manualmente, el moldeador emplea tamices, para conseguir la finura requerida; un martillo, para desterronar los bloques de arena reutilizada; una pala, para ir incorporando los insumos de moldeo. Todo esto, se lleva a cabo en un área destinada a este propósito. En la Figura 20 se muestra la zona de moldeo de un taller de fundición. Se pueden apreciar moldes listos para el vaciado de metal fundido.

²¹ El grado de humedad debe ser lo más bajo posible, para así disminuir la producción de vapores de agua, donde estos últimos afectan directamente las piezas coladas pudiéndose originar en estas deformaciones y otros defectos



Figura 20. Área de moldeo en una fundición.
Fuente: Ecoeficiente, 2007.

Mecánicamente, el proceso de desterronado se hace con desterronadora, como se muestra en la Figura 21. Los tamices se emplean manualmente. La AFS recomienda ciertas aberturas de malla para cada tamiz. Luego de preparar los insumos, se procede a agregar todo a una mezcladora automática.



Figura 21. Desterronadora de arena.
Fuente: Metalcomer, 2016.

Las mezcladoras o molinos de arena, reducen el tiempo de mezclado de los insumos de moldeo, obteniendo mezclas homogéneas en un intervalo de 3 a 5 minutos. Sin embargo, después del mezclado, debe dejarse enfriar un tiempo para no dificultar el procedimiento de conformación del molde. En la Figura 22 se muestra un molino de 7 kg de capacidad.



Figura 22. Molino de arena.
Fuente: Tecnofund, 2018.

Evidentemente, no todos los tipos de arena son aptos para fundición gris. Deben cumplir con ciertas propiedades, necesarias para obtener piezas de fundición sanas, con la mínima incidencia de defectos sobre ellas. Para colar fundición gris, por ejemplo, cuando el molde se ha preparado con tierra en verde se recomienda que estas contengan arcillas de elevado poder aglutinante como las montmorilloníticas (bentonita); y para el moldeo con tierra seca se usan las arcillas con propiedades aglutinantes medias.

Es necesario, entonces, conocer la importancia de la dosificación de los insumos de moldeo y la repercusión que estos tienen sobre la mezcla de moldeo.

En septiembre del 2014, la revista Fundipress publicó un artículo denominado “Arena de moldeo en verde: Fuerzas de cohesión, propiedades estructurales y propiedades derivadas de las mismas partes, sus efectos sobre el moldeo y calidad de las piezas”, cuyo autor es el Ing. José Expósito. En este artículo se describen las recomendaciones a tener en cuenta para la preparación de las muestras de arenas de moldeo en verde y los principales factores que influyen en la eficiencia o rendimiento del procesado de dichas arenas.

En cuanto al contenido de arcilla AFS, Expósito indica que cuando los valores exceden el rango establecido, la mezcla presenta mayor tendencia a los siguientes defectos:

- Deficiente compactación. Menor capacidad de fluencia.
- Rotura de moldes al desmoldeado. Plasticidad reducida.
- Menor permeabilidad. Sopladuras.
- Mayor necesidad de agua a igual compactabilidad. Sopladuras.
- Posibilidad de penetración metálicas por reacción química y “cementado” de los granos de arena. Excesiva contracción y posible formación de pliegues.

Por otro lado, cuando el contenido de arcilla es menor que el recomendado, la mezcla presenta mayor tendencia a formar:

- Defectos de la expansión de sílice. Dartas, bucles y colas de rata.

- Alta permeabilidad. Mal acabado superficial de las piezas e incluso penetraciones metálicas.
- Necesidad de poca agua en la arena. Menor enfriamiento de la arena de moldeo. Poco poder de retención de la humedad. Mayor friabilidad.

Cuando se emplean arenas recicladas, es importante introducir el concepto de bentonita activa, es decir, la parte de la arcilla que tiene capacidad de dar aglutinación activa, es decir, que puede dar una buena relación fisuración/compresión en la arena de moldeo en verde.

En las arenas de moldeo en verde, típicamente, el contenido en bentonita activa varía del 7 a 8%, para el moldeo a baja o media presión. Valores por encima de estos, causan mayor tendencia a:

- Esquinas de los moldes friables (falta de fluencia de arena, superficies de moldeo abierta).
 - Grumos en el desmoldeo.
 - Sopladuras (alta humedad de la arena de moldeo).
 - Inclusiones de arena (bolas o grumos de alta humedad que puede hacer hervir el metal colado).
 - Reducción de la refractariedad de la arena de moldeo.
 - Piezas agrietadas en caliente.
 - Menor permeabilidad.
 - Pegado de arena a las cajas. Demasiada resistencia en verde de la arena de moldeo con formación de cola de rata.
 - Mal acabado superficial de las piezas.
 - Compactación deficiente. Falta de fluencia de arena de moldeo.
 - Aumento del porcentaje de la bentonita. Mayor consumo de bentonita.
- Valores por debajo de este rango, ocasionan:

- Rotura en moldes en el desmodelado y durante la manipulación de los mismos.
- Moldes blandos. Hinchamiento de piezas.
- Levantamiento de la parte superior del molde en la colada.
- Esquinas de moldes friables (rápido secado de la arena de las superficies de los moldes).
- Defectos de expansión de la sílice. Darts, bucles, colas de rata.
- Erosiones, inclusiones de arena. Darts de erosión.
- Desprendimiento de la parte superior del molde.

Respecto del contenido de agua en la mezcla, destaca que es la humedad la que afecta cada propiedad física de la arena de moldeo (a excepción de la arena base) y su contenido debe ser suficiente para trabajar y “activar” la bentonita presente en la arena de moldeo.

Cuando se emplean arenas recicladas, es importante regular la cantidad de humedad de la mezcla, pues este contenido se ve afectado por:

- La relación arena/metal.
- Temperatura de colada.
- Tiempo de permanencia del metal en el molde antes de su desmoldeo.

En el Anexo B.5, se muestran diferentes fórmulas para preparar arenas en verde propuestas por el experto colombiano en el sector fundición, Ing. Luis Fernando Rueda, en el curso: “Control de calidad en componentes fundidos” dictado en el *Servicio Nacional de Aprendizaje* – SENA – Colombia.

2.3. Conformación del molde

El diseño del molde es un aspecto vital de la operación total de la fundición. Debe prever la contracción del metal, la facilidad de extracción del modelo mediante ángulos de salida y un flujo adecuado del metal en la cavidad del molde. (Kalpakjian & Schmid, 2002). Para ello, es importante que su constitución sea la más adecuada, es decir, que, durante su manufactura, se logre crear un molde correctamente compactado, para que soporte las condiciones de trabajo a las que se someterá.

El diseño de los moldes debe considerar los siguientes elementos del moldeo: modelo, mazarotas, sistemas y entradas de alimentación, material fundido, temperatura del material, enfriadores, tipo de colada, cálculo de la velocidad de enfriamiento, escape de gases, facilidad de moldeo.

Los moldes deben ser reproducibles, rígidos, compactos, densos, deben reproducir fielmente el modelo, resistir los efectos térmicos del metal fundido y la erosión del flujo del metal líquido, conservando la forma hasta la completa solidificación de la pieza, sin crear tensiones en ella. Debe garantizar una buena precisión dimensional, un buen acabado superficial, permanecer inalterable a las contracciones y expansiones durante la solidificación.

Comúnmente, la conformación del molde se realiza manualmente, con una serie de herramientas que el moldeador maneja para conferir las propiedades requeridas. Sin embargo, en los talleres modernos de gran producción, existen nuevos equipos para la conformación de los moldes.

Las máquinas moldeadoras realizan total o parcialmente el ciclo de operaciones del moldeo. Las primeras que se construyeron sólo extraían el modelo, se llamaban máquinas de desmodelar. Con ello se evitaba la posibilidad de deterioros y posterior reparación del molde. Luego, para disminuir la fatiga de los operarios y aumentar la productividad se sustituyó el atacado manual por el mecánico y se construyeron las máquinas de moldear que, incluso, cerraban la caja. En la actualidad, las máquinas automáticas clasifican y cargan la arena, retiran el modelo y cierran las cajas dejándolas listas para la colada. En el Anexo B.6 se puede apreciar una máquina de moldeo automática MULTIFLEX, diseñada por SCOVAL, una empresa francesa especializada en el diseño y la realización de proyectos de arenería o líneas de moldeo de arena verde para fundiciones.

La introducción de la máquina de moldear en los talleres de fundición ha supuesto un gran avance, al sustituir los métodos artesanales por procesos de mecanizado.

El proceso de mezcla (tiempo y método de malaxado o mezclado) y el tipo de proceso de fabricación (relación arena – metal, tipo de aleación metálica colada en los moldes, regeneración de la arena mediante el aporte de machos y/o arena nueva, efectividad de los sistemas de reacondicionamiento de la arena usada, etc.) son aspectos importantes en el comportamiento de los moldes durante la colada.

El proceso de conformación de los moldes consiste en compactar la mezcla de moldeo en una semicaja. Durante la compactación disminuye la densidad de la mezcla, de acuerdo a la proporción de aglutinante y agua presente.

En la Figura 23.a se muestra el grado de compactación adecuada para que el molde de arena cuente con las características suficientes para obtener piezas de fundición sanas. Un insuficiente procedimiento de compactación genera zonas de separación entre los granos, causando desprendimiento al momento de la colada. El exceso de compactación, repercute sobre la permeabilidad del molde por la reducción de espacio entre los granos.

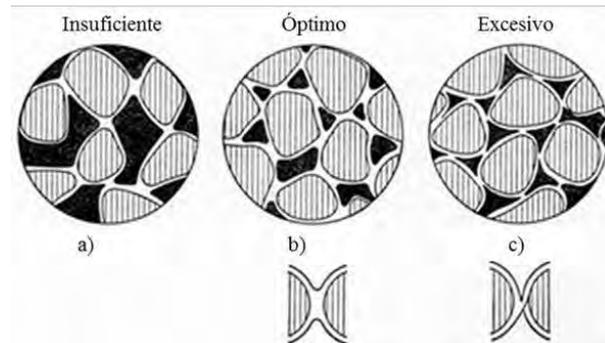


Figura 23. Ilustración de la relación entre la resistencia a la tracción R de una tierra y su compactación.

Fuente: Mazzoneli, 1971.

Para determinar algunas propiedades de los moldes, se les realizan pruebas, tales como: dureza, compactación (fuerza), permeabilidad y calidad.

a. Dureza del molde

La prueba de dureza del molde indica la resistencia del molde a medida que el metal entra en contacto con la superficie. Se emplean equipos medidores de dureza, que miden la resistencia ofrecida en la superficie del molde al ser penetrada por un émbolo cargado en escala B o C. En la Figura 24, se muestra un durómetro portátil, de escala B.

Una dureza adecuada se relaciona con un mejor acabado y dimensiones más precisas en el molde. La dureza excesiva, de otro lado, puede causar grietas, costras, golpes, poros y penetración.



Figura 24. Durómetro portátil para arenas en verde.

Fuente: TECNOFOUND

b. Fuerza del molde

Esta prueba mide la uniformidad de la compactación en la cara del molde. Consiste en introducir un émbolo cargado por un resorte en la cara del molde a una profundidad predeterminada, y medir su resistencia en psi.

c. Permeabilidad del molde

Mide la permeabilidad en función de su grado de compactación. Esta prueba muestra cambios en la capacidad de ventilación de la arena de moldeo.

d. Indicador de calidad del molde

Las lecturas del indicador de calidad del molde (MQI) son una lectura de densidad indirecta basada en la permeabilidad. Cuanto más compacta esté la arena, mayor será la lectura de MQI.

Los sistemas de ventilación de los moldes, pertenecen también al diseño de los mismos. Su objetivo principal es permitir el escape de los gases generados en la cavidad del molde cuando se vierte el metal fundido, debido a la evaporación de agua libre o formación de vapor, la evolución del agua combinada (formación de vapor), la descomposición de materiales orgánicos como aglutinantes y aditivos (generación de hidrocarburos, CO y CO₂), expansión de aire presente en los espacios de arena apisonada.

Si no se permite que los gases del molde escapen, pueden quedar atrapados en el metal y producir piezas defectuosas, aumentar la presión e impedir la entrada de metal fundido. Además, pueden reventar el molde. Por esto, es recomendable hacer muchos orificios sobre la superficie del molde con un alambre.

2.3.1. Sistemas de alimentación de un molde

Se puede definir, de manera muy simple, como los canales a través de los cuales el metal fluye desde el cucharón a la cavidad del molde. El metal fundido se comporta de acuerdo con principios hidráulicos fundamentales que pueden ser aprovechados ventajosamente en el diseño de estos sistemas.

Las funciones principales del sistema de alimentación son:

- Reducir la turbulencia en la corriente de metal fundido a medida que pasa a través del sistema y dentro de la cavidad del molde. La turbulencia puede provocar la entrada de aire y gases de moldeo en la corriente de metal, y la fundición puede ser defectuosa debido a burbujas de aire u óxidos de metal (escoria o peróxidos) atrapados en la colada.
- Eliminar el arrastre de aire o gases del molde en el metal, evitando la formación de áreas de baja presión.
- Disminuir la velocidad de la corriente de metal, minimizando la erosión del molde y permitiendo la flotación y entrada de la escoria.

- Permitir que el molde se llene lo suficientemente rápido como para evitar la solidificación prematura y los defectos de colada resultantes, como juntas y pliegues fríos.
- Promover la distribución direccional en la fundición, de manera tal que los risers puedan alimentar al molde.
- Eliminar el "arte" del vertido controlando el flujo a través del sistema. La técnica de vertido varía notablemente de acuerdo a la experiencia del fundidor.

En la Figura 25 se muestran los sistemas de alimentación y distribución, conformados por:

- Copa de vaciado. Es el elemento hueco que ayuda a dirigir el flujo de metal fundido desde el crisol al recipiente de colada y al bebedero. Reduce la turbulencia y a separar del metal fundido la escoria y otros elementos extraños para que no ingresen al bebedero.
- Bebedero. Es de forma cónica. Su extremo más grande recibe el metal fundido y el más pequeño está conectado al sistema de distribución (alimentadores). Permite el ingreso de metal fundido sin turbulencias direccionándolo hacia el alimentador.
- Corredor. Es un canal que conecta el bebedero a la puerta para evitar turbulencias y atrapamiento de gas.
- Alimentador. Es un pequeño pasaje o canal que alimenta de metal líquido a la fundición a una velocidad coherente con la tasa de solidificación.
- Riser. Es un pasaje a través del cual el metal fundido se eleva después de llenar completamente la cavidad del molde para compensar la contracción durante la solidificación de la pieza fundida. También permite el escape de aire y gases de molde y la solidificación direccional.

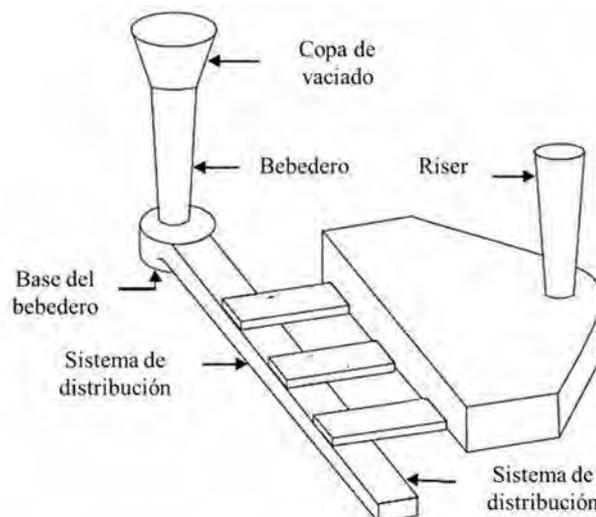


Figura 25. Esquema de un sistema de alimentación horizontal.
Fuente: Singh, 2006.

Para determinar la posición y forma del sistema de alimentación, se toman en consideración diversos criterios técnicos, así como la experiencia propia de fundición. Entre los criterios técnicos, García Chacón (2016), menciona:

- El modelo, pues se debe alimentar por la parte más gruesa para garantizar la solidificación dirigida.
- La forma de la pieza, colocando los ataques en los extremos.
- Las dimensiones, diseñando canales cortos para evitar enfriamientos prematuros. En este caso, se debe considerar una distancia mínima entre el canal de colada y ataque de 30 mm, además de una sobrelongitud del canal de colada de 50 mm para evitar turbulencias externas por el cambio de dirección entre el canal de colada y ataque.
- La ubicación, alejándolos de las zonas calientes y de las paredes de la caja de moldeo. En la ubicación de los sistemas deben tenerse en cuenta las dimensiones de la caja de moldeo y las distancias mínimas entre los sistemas y paredes de la caja, así como la facilidad del moldeo y desmoldeo.

Para el diseño de mazarotas, teóricamente, se parte del cálculo del tiempo total de solidificación de la pieza, el cual depende del tamaño y de la forma de la misma, expresada por una relación empírica conocida como *Regla de Chorinov*. (Ortiz Prado, Ruiz Cervantes, & Ortiz Valera, 2013).

La regla de Chorinov se expresa en la Ecuación 5.

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad [5]$$

Donde:

t_s	Tiempo de solidificación total [min]
V	Volumen de fundición [cm^3]
A	Área superficial de la fundición [cm^2]
n	Exponente que toma usualmente el valor de 2
C_m	Constante del molde. Esta depende de las propiedades del metal (densidad, capacidad calorífica, calor de fusión) y del molde, como: temperatura inicial, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica y grosor de pared; [min/cm^2]

Por lo tanto, el área y volumen de la mazarota vienen dados por las ecuaciones 6 y 7, respectivamente.

$$A_M = \pi \phi h + 2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 \right); [\text{cm}^2] \quad [6]$$

$$V_M = \frac{\pi}{4} * \phi^2 h; [\text{cm}^3] \quad [7]$$

Dónde: Φ es el diámetro de la mazarota y h su altura, ambos parámetros en centímetros.

La regla de Chorinov también permite conocer el tiempo de solidificación de la pieza en función de la mazarota, la cual debe solidificarse en mayor tiempo que el molde, para alimentar de material cavidades faltantes o incompletas. (Mora Pazán, 2017)

$$t_{sM} > 20\%t_{sp} \quad [8]$$

Finalmente, la relación entre el volumen y el área de la mazarota, queda definida en la Ecuación 9.

$$\frac{V_M}{A_M} = \frac{\phi h}{4h + 2\phi} \quad [9]$$

La velocidad del vertido permite determinar la altura del bebedero, y está definida por la ecuación de Bernoulli, que se muestra en la Ecuación 10.

$$v_b = \sqrt{2gh_b} \quad [10]$$

Dónde: la gravedad (g) se considera 9.81 m/s^2 y h_b , la altura del bebedero en [cm].

En el Anexo B.7 se muestra un ejemplo de cálculo del sistema de alimentación de una pieza de fundición de acero.

Además del diseño de los sistemas de alimentación, en algunos casos, es importante considerar la adición de enfriadores que permitan que determinadas zonas de la pieza fundida se enfríen con mayor velocidad. Los materiales metálicos de extracción rápida de calor, se incorporan durante el moldeo. La función principal de estos enfriadores es proporcionar una superficie dura en un área determinada en el molde por medio de una solidificación rápida. En la Figura 26 se muestran algunos enfriadores comunes.

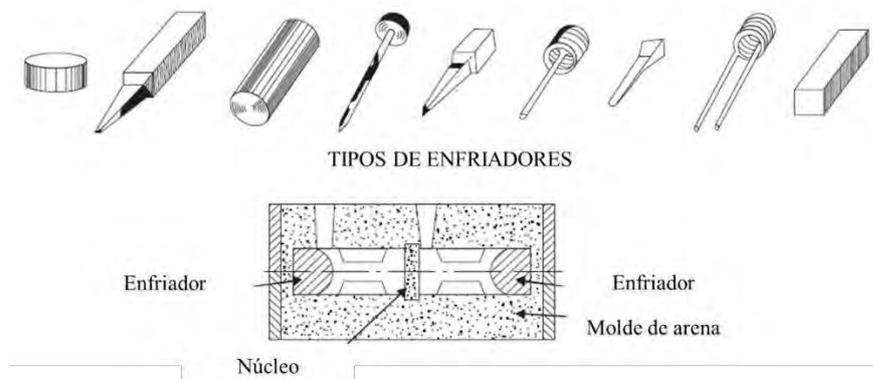


Figura 26. Tipos de enfriadores y ubicación en un molde de arena.
Fuente: Singh, 2006.

Debido a la complejidad del proceso de fundición, en el que se combinan el flujo de metal en la cavidad del molde y la transferencia de calor se han desarrollado métodos de elementos finitos para simular el procedimiento y con ello, ha sido posible la creación de modelos cada vez más exactos y cercanos a la situación real.

En el mundo, existen diversos softwares comerciales para simular la solidificación en piezas fundidas: Magmasoft, NovaFlow & Solid, ViewCast, CastCAE, MAVIS, QuickCast, Procast, etc., los cuales están muy extendidos en países desarrollados. (Rodríguez Moliner, Parada Expósito, & Ordóñez, 2006)

Las variables de entrada consideradas por los simuladores son: la geometría de la pieza, la composición química de la aleación a fundir, el tipo de mezcla de moldeo, la temperatura del metal y el molde, entre otros parámetros, que permiten obtener resultados muy cercanos a la solidificación en tiempo real.

En la Figura 27 se muestran los resultados de la simulación de una pieza. En la Figura 27.a se aprecian elementos coloreados, los que corresponden a las zonas que presentarán rechupes. En la Figura 27.b se puede ver una escala de tiempo que indica que el intervalo de solidificación de cada elemento oscila entre 0 y 43.9s.

Estos resultados permiten analizar los nudos térmicos y diseñar exitosamente, con la ayuda de software especializado un adecuado sistema de alimentación y mazarotado. El conocimiento preciso de los tiempos de solidificación de cada elemento de la malla, permite una mejor ubicación y determinación de las dimensiones de las mazarotas, evitando el usual sobredimensionamiento de las mismas. (Rodríguez Moliner, Parada Expósito, & Ordóñez, 2006).

En la Figura 27.c se muestran las zonas que presentarán rechupes, como puede apreciarse, desaparecieron las zonas coloreadas en la Figura 27.a debido al diseño del sistema de alimentación y su correcto posicionamiento.

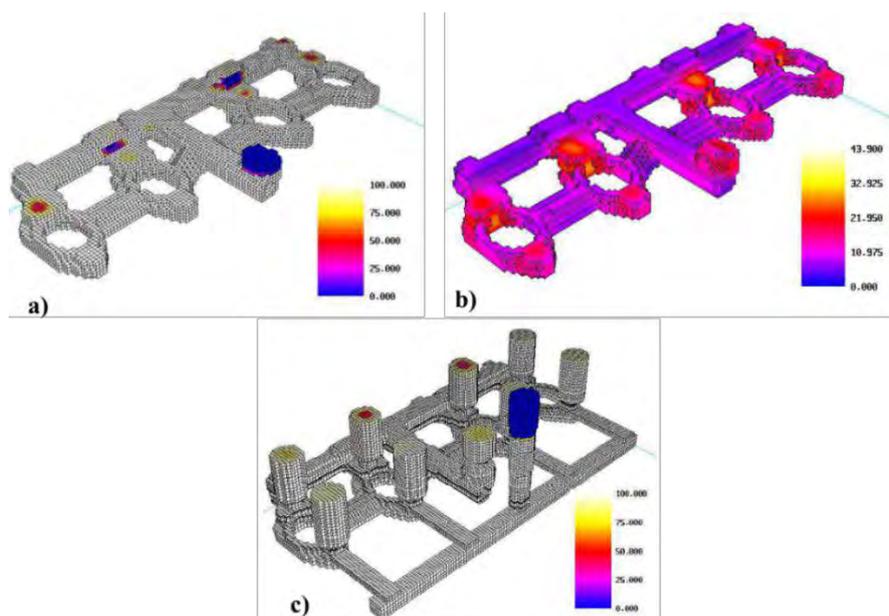


Figura 27. Simulación de aparición de rechupes en la pieza.
Fuente: ViewCast, 2004.

La simulación del llenado del molde permite también observar el régimen del flujo de metal en la cavidad del molde, la posible turbulencia que se formaría y corregir la forma del sistema de alimentación en caso de problemas. (Z.A & Mampaey, 1995)

En la Figura 28 se muestra una simulación de la velocidad de llenado. Las diferentes tonalidades temperaturas del metal a medida que se va enfriando en un intervalo de 2.15 segundos.

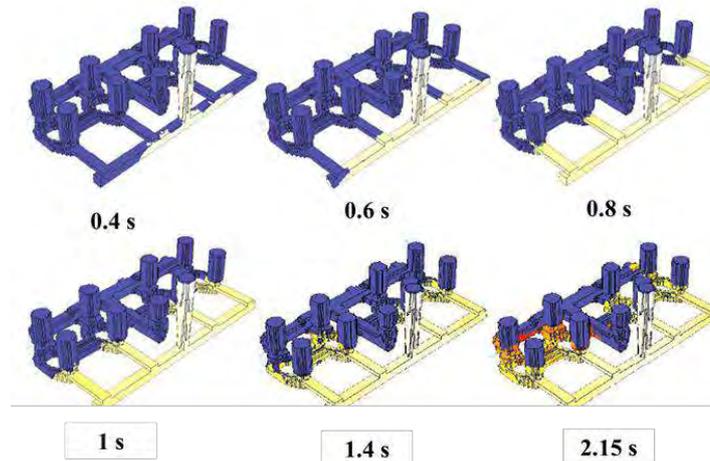


Figura 28 Secuencia del llenado del molde en un intervalo de 2.15 s.
Fuente: ViewCast, 2004.

2.3.2. Empuje metalostático

El empuje presión metalostática es la fuerza perpendicular que ejerce el metal fundido sobre las paredes del molde y su centro de gravedad. Matemáticamente, se define mediante la fórmula que se presenta en la Ecuación 11.

$$F = S * h * \rho * g_1 \quad [11]$$

Siendo:

- F : empuje metalostático en [N]
- s : área de la pared en [dm²]
- h : distancia entre el centro de gravedad de la pared y el nivel libre del líquido en el bebedero en [dm]
- ρ : densidad del metal líquido en [kg/dm³]
- g_1 : aceleración de la gravedad local en [m/s²].

En cuanto a su influencia en el moldeo, la presión metalostática influye en la deformación de los moldes, causando que sus paredes ceden y la pieza experimente un hinchamiento, debido al aumento de volumen tras la colada y los sistemas de alimentación de poca capacidad para llenar el molde, dando lugar a discontinuidades internas, llamadas falsos rechupes.

Para equilibrar el empuje metalostático, se colocan sobre los moldes masas estimadas, en el caso de moldes de piezas pequeñas; mientras que, en moldes de mayores dimensiones es recomendable realizar un cálculo preciso para minimizar el

riesgo de deformaciones en las piezas y la formación de porosidades por efecto de la contracción del metal durante la solidificación. (Sertucha J. , Suárez, Legazpi, & Gacetabeitia, 2007)

2.4. Normativa y referencias

Los ensayos de las arenas de fundición se basan en la norma de la American Foundrymen's Society – AFS, cuyo procedimiento se describe en el Manual de arenas para fundición. Es preciso indicar que se conocen datos referenciales de rangos de arenas aptas para el moldeo, como las que se encuentran en el Manual de arenas de Foseco Ferrous Foundrymen's Handbook, como se muestra en la Tabla 9. Sin embargo, los valores que se están tomando como referencia son de bibliografía más actualizada, cuya data surge a partir de ensayos realizados en diferentes talleres de fundición del país vasco. Estos datos se muestran en el Capítulo 4.

Tabla 9. Propiedades de las arenas en verde para fundición de hierro.

Propiedades	Moldeo manual automático	Moldeo mecanizado
Humedad (%)	3 – 4	2.5 – 3.2
Resistencia en verde	70 – 100 kPa	150 – 200 kPa
Compactabilidad (%)	45 – 52	38 – 40
Permeabilidad	80 – 110	80 – 100
Arcilla (%)	5 – 5.5	6 – 10
LOI	2.5	2
(%)	7 – 7.5	6

Fuente: Brown, 2000.

Capítulo 3

Situación actual de la etapa de moldeo en el norte del Perú

3.1. Talleres de fundición participantes

Para conocer cómo se realiza el moldeo en el norte del Perú, se visitaron 10 talleres de fundición gris de las regiones de Piura, Lambayeque y La Libertad, dedicados a la obtención de piezas de fundición gris, bronce y aluminio. En la Tabla 10 se resumen las características de dichos talleres, de acuerdo a su infraestructura y los productos que ofrecen.

Los fundidores permitieron que se realizaran múltiples visitas para caracterizar su procedimiento de trabajo y sus instalaciones. De esta manera, se conocieron a detalle cada una de las actividades que se realizan dentro de la etapa de moldeo, desde el acopio y almacenamiento de arenas e insumos, hasta la conformación del molde y desmoldeo de las piezas.

Uno de los instrumentos que permitió obtener información discriminada de la actividad que realizan los talleres fue la encuesta de 38 preguntas que fue respondida por los 10 talleres que colaboran en el proyecto. Este documento, diseñado por profesionales de la Universidad Nacional de Colombia plantea preguntas cuantitativas y cualitativas y está dividida en 4 secciones principales: Caracterización general (11 preguntas), materias primas, insumos y calidad (1 pregunta), moldeo y control de arenas (10 preguntas), fusión y vaciado (16 preguntas).

Respecto a la sección de moldeo y control de arenas, esta contiene 10 preguntas relacionadas con: los criterios de selección de arenas respecto a su granulometría, uso de aglutinantes en el moldeo, controles de calidad rutinarios, proceso de moldeo realizado en el taller, equipos y herramientas empleadas, procedimiento para preparar arenas nuevas y reutilizadas y fabricación de machos. A partir de ellas se pudo conocer, en términos generales, el moldeo de los talleres del norte. Esta información fue la base para que, en cada una de las entrevistas, se pudieran hacer preguntas respecto al procedimiento y describirlo paso a paso. En el Anexo C.1 se muestra la encuesta aplicada a los talleres de fundición del norte.

Uno de los aspectos más importantes de las visitas realizadas a los talleres fue la identificación de problemas que podían ser resueltos con algunas sugerencias hechas a los fundidores para minimizar defectos en sus moldes. En la Tabla 11 se muestra la relación de talleres visitados y la frecuencia de las visitas realizadas a sus instalaciones

Tabla 10. Caracterización de los talleres participantes de la región norte del Perú.

Talleres	Infraestructura	Productos
PIURA	Taller 1 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área pequeña). • Área de hornos (1 cubilote y 1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (gris, bronce, aluminio). • Pluma para cargar vía tecle moldes grandes. 	Fabricación y comercialización de piezas en bronce y fundición gris. Los productos que generalmente fabrica son: hélices para embarcaciones, bocinas, ejes, buzones, poleas, entre otros.
	Taller 2 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área grande). • Área de hornos (2 cubilotes y 1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (bronce, aluminio). • Pluma para cargar vía tecle moldes grandes. 	Fabricación de piezas diversas, tales como: impulsores, tapas de buzones, etc. en aleaciones de bronce y fundición gris para la industria pesquera, petrolera y del agua.
	Taller 3 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área pequeña). • Área de hornos (1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (bronce, aluminio). 	Fabricación y comercialización de piezas en hierro fundido.
LAMBAYEQUE	Taller 4 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área pequeña). • Área de hornos: 2 hornos de cubilote y 1 de crisol. • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (hierro gris, aluminio, bronce). • Tecele para montar moldes grandes. • Área de mecanizado. 	Fabricación de bombas de alta y baja presión, trapiches, entre otros y fundición de piezas de hasta 500 kg. de cobre, bronce, aluminio, hierro, oro y plata.
	Taller 5 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área muy pequeña). • Área de hornos (1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (aluminio, bronce). 	Fabricación de bastos, placas, letras, campanas, insignias, para colegios, escudos, letras para frontis y logotipos en bronce.
LA LIBERTAD	Taller 7 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área grande). • Área de hornos (1 cubilote y 1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (gris, bronce, aluminio). • Tecele para moldes grandes. 	Fabricación de piezas industriales y ornamentales según muestra o diseño en bronce, aluminio y fundición gris.
	Taller 8 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área grande). • Área de hornos (1 cubilote y 1 crisol). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (gris, aluminio, bronce). 	Fabricación de piezas industriales y ornamentales según muestra o diseño en bronce y fundición gris.
	Taller 9 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área pequeña). • Área de hornos (1 cubilote). • Área de arenas de moldeo. • Área de chatarra (aluminio, bronce). 	Fabricación de carcasas para bombas, “manguitos”, sistemas de engranajes, bridas, entre otros.
	Taller 10 <ul style="list-style-type: none"> • Local propio (área grande). • Área de hornos (1 cubilote y 1 crisol). • Área de arenas de molde. • Área de chatarra (gris, bronce, aluminio). 	Fabricación de planchas de hierro fundido y reducciones para cocinas mejoradas de diversos tamaños.

Fuente: Diagnóstico del sector fundición del norte del Perú, 2018.

Los talleres colaboradores de la presente investigación entregaron muestras de fundición gris laminar para su caracterización completa. En esta tesis se pone énfasis en la caracterización macroscópica que permite evaluar la presencia de defectos superficiales y

los que aparece al mecanizar la pieza. El análisis de la calidad de las piezas se muestra a detalle en el Capítulo 4, mientras que, la relación de defectos encontrados por inspección visual de las muestras se detalla en este capítulo.

En la Tabla 12 se muestran las piezas entregadas por los talleres para su análisis.

Tabla 11. Cronograma de visitas a los talleres de fundición del norte del Perú.

PIURA			LAMBAYEQUE			LA LIBERTAD	
Taller 1	Se realizado visitas	han 6	Taller 4	Se realizado visitas.	han 4	Taller 7	Se han realizado 6 visitas.
Taller 2	Se realizado visitas.	han 8	Taller 5	Se realizado visitas.	han 4	Taller 8	Se han realizado 2 visitas.
Taller 3	Se realizado visitas.	han 2	Taller 6	No se realizaron visitas.		Taller 9	Se han realizado 2 visitas.
						Taller 10	Se han realizado 5 visitas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Muestras analizadas macroscópicamente.

Dpto.	Taller	Entrega	Muestra		Descripción
Piura	Taller 1	1 ^a	Barra	M1	Ø55mm x 250 mm de largo
		2 ^a	Barra	M2	Ø55mm x 300mm de largo
		3 ^a	Barra	M3	Ø55mm x 300mm de largo
			Barra	M4	Ø55mm x 300mm de largo
			Barra	M5	Ø60 mm x 230 mm de largo
	Taller 2	1 ^a	Barra	M6	Ø60 mm x 230 mm de largo. Molde en coquilla
			Barra	M7	Ø55 mm x 230 mm de largo
		2 ^a	Barra	M8	Mazarota en forma de barra
			Barra	M9	Ø50 mm x 230 mm de largo
		3 ^a	Barra	M10	Ø52 mm x 230 mm de largo
			Barra	M11	Ø54 mm x 230 mm de largo
	Taller 3	Única	Barra	M12	Ø32 mm x 300 mm de largo
Lambayeque	Taller 4	1 ^a	Barra	M13	Ø55mm x 220 mm de largo
		2 ^a	Barra	M14	Ø55 mm x 300 mm de largo
	Taller 5		Trozo	M15	Trozo pequeño irregular
		Única	Pieza	M16	Ø30mm x 130mm de largo
			Pieza	M17	Ø80mm x 100mm de largo
	Taller 6	Única	Barra	M18	Ø55mm x 300mm de largo
La Libertad	Taller 7	1 ^a	Barra	M19	Ø66mm x 400mm de largo
			Barra	M20	Ø66mm x 150mm de largo
	2 ^a	Barra	M21	Ø55mm x 300mm de largo	
	Taller 8	Única	Barra	M22	Ø60mm x 230mm de largo
	Taller 9	Única	Mango	M23	Pieza fundida denominada "manguito"
	Taller 10	1 ^a	Aro base	M24	Trozo de cocina mejorada
			Trozo	M25	Trozo de aro base
2 ^a		Barra	M26	Ø55mm x 300mm de largo	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Resultados de la encuesta realizada a 08 talleres de fundición.

Actividad	Tarea				LAMBAYEQUE		LA LIBERTAD			Resultados	
		Taller 1	Taller 2	Taller 3	Taller 4	Taller 5	Taller 7	Taller 9	Taller 10		
Tierras de moldeo	¿Utiliza las arenas en estado natural?	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	¿Utiliza tierras sintéticas?	0	1	0	0	0	0	1	0	25%	
Materias primas o insumos para tierra sintética	Arena	Silíceo	0	0	0	0	0	0	1	0	13%
		Cromita	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
		Olivina	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
	¿Utiliza algún aglutinante?	Bentonita	0	0	0	0	0	0	1	0	13%
		Silicato de sodio	0	0	0	0	0	0	1	0	13%
		Resinas de moldeo	0	1	0	0	0	0	0	0	13%
		Dextrina	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
	¿Emplea recubrimientos?	Carbonilla	1	1	1	1	1	1	1	1	100%
Pinturas refractarias		0	0	0	0	0	0	0	0	0%	
Control de materia prima para moldeo con tierra sintética	¿Caracteriza sus arenas?	Granulometría	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
		Forma de grano	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
		Impurezas	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
	¿Se analiza el aglutinante?	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	
	¿Dosifica los insumos?	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	
Procesos de moldeo	Manual	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Mecanizado	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	
Herramientas utilizadas en el moldeo	Pisones	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Tamiz	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Terrajas	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Espátulas	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Brochas	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
Material del que están hechos los modelos	Madera	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Aluminio	1	1	1	1	1	1	1	1	100%	
	Cera	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	
	Espuma	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	

Fuente: Elaboración propia



Figura 29. Esquema del proceso de moldeo del norte del Perú.
Fuente: Elaboración propia con imágenes del proceso de moldeo de los talleres participantes

3.2. Descripción del proceso de moldeo

Las fundiciones establecidas en la zona norte del país, en general, desarrollan sus procesos manteniendo los conocimientos empíricos y las prácticas adquiridas por sus predecesores (padres y/o abuelos) con algunas pequeñas mejoras, suficientes como para subsistir.

En esta sección se abordará a detalle cómo se desarrolla el proceso de moldeo en los talleres de fundición de Piura, Sullana, Chiclayo y Trujillo, empleando datos recogidos en la encuesta descrita en la sección anterior y en las visitas y conversaciones con los dueños de los talleres y moldeadores de las fundidoras del norte. En la Tabla 13 se muestran los resultados de las preguntas cuantitativas, indicando con 1 si la empresa cumple con la característica y con 0, si no la cumple. A partir de estos datos se pueden establecer rasgos comunes de cómo se desarrolla el moldeo en el norte.

Con la información recabada de las encuestas y las visitas a los talleres, se elaboró el esquema que se muestra en la Figura 29. En este se pueden ver cada una de las actividades desarrolladas durante la etapa de moldeo, las mismas que se explican a continuación:

a. Confección o acondicionamiento del modelo

El modelo es la preforma de la pieza que se va a obtener por fundición. Por ello, debe acondicionarse previamente, recubriéndolo con una capa de barniz. En caso no se cuente con el modelo, se manda a fabricar.

Por lo general, son de madera o de metal (aluminio, principalmente), de acuerdo a la cantidad total de piezas a fabricar. Por ejemplo, uno de los talleres que fabrica, principalmente, un único producto, utiliza modelos de fundición gris. (ver Figura 30)

Los modelos de madera son los más utilizados debido a su costo de fabricación. Además, las empresas se caracterizan por tener un volumen de producción medio, por lo que este tipo de modelos son ideales para ellos.

Emplean modelos divididos para piezas medianas y grandes; y de una sola pieza para producir elementos pequeños. En la Figura 31 se aprecia un modelo dividido²² en dos partes.



Figura 30. Modelo de hierro fundido, de una sola pieza.
Fuente: Elaboración propia



Figura 31. Modelos de madera compuestos por dos piezas.
Fuente: Elaboración propia.

²² El término “modelo dividido” ha sido definidos en el Capítulo 1.

b. Acopio de insumos para moldeo

Una vez definida el tipo de pieza a fundir, los fundidores verifican si tienen los insumos suficientes para confeccionar el molde y para ello, compran arenas naturales, que, en la mayoría de casos, son traídas por proveedores locales a sus talleres. Los fundidores que conocen las canteras, toman la cantidad que necesiten de un punto aleatorio de la cantera y la transportan hacia sus instalaciones.

Las arenas nuevas se disponen en el patio de moldeo, una zona a la que solo pueden acceder el moldeador y sus ayudantes. En el patio de moldeo, también se colocan las arenas reutilizadas de coladas anteriores. Estas forman parte de la mezcla de moldeo.

No se conoce un criterio de selección, a excepción hecha de la experiencia del moldeador, quien toma un puñado de arena y lo presiona en su mano, para verificar su cohesión. Si el puñado no se desmorona, se considera que la arena es apta para moldeo.

En algunas ocasiones, cuando las piezas son de responsabilidad, emplean arcilla. Por lo general, la compran a proveedores que la extraen de las orillas de los ríos.

c. Preparación de arenas

La arena de moldeo es una mezcla de arena nueva (extraída de las canteras), arena reutilizada de coladas anteriores y agua. Las proporciones en las que se agregan son empíricas, según la experiencia de los moldeadores. Por lo general, incorporan arena virgen con arena reutilizada y agua hasta obtener una mezcla homogénea, de una tonalidad similar a la de las arenas naturales. Además, esparcen un puñado de la mezcla sobre las paredes del molde, si no se desprende, se considera que la mezcla está lista para conformar el molde.

d. Colocar el modelo en la caja de moldeo

Las cajas de moldeo se fabrican en madera o metal con manijas en sus extremos para poder manipularlas. Sus dimensiones varían dependiendo del tamaño de la pieza que se fundirá.

La altura de estas cajas de moldeo suele oscilar entre 10 y 20 cm. También utilizan cajas fabricadas con material metálico (planchas de 3mm de espesor); en este caso, pueden ser cuadradas, rectangulares o circulares. Las que tienen forma circular son fabricadas a partir de tubos de acero de 8, 10 o 12 pulgadas de diámetro y de 6mm de espesor, aproximadamente, como se puede ver en la Figura 32.

Las cajas de moldeo se fabrican para soportar severas condiciones de trabajo. Son fabricadas en el mismo taller de fundición sin seguir ningún estándar.

Generalmente, un molde consta de dos semicajas: superior e inferior. Para garantizar su correcto posicionamiento, las cajas cuentan con dos embones (macho – hembra y hembra – macho) uno al frente del otro para cerrar las cajas.



CAJAS DE MOLDEO METÁLICAS

Figura 32. Cajas de moldeo metálicas circulares y cuadradas.
Fuente: Elaboración propia.

e. Llenar las cajas de moldeo con arena preparada

A continuación, se coloca la mitad del modelo en la semicaja inferior, sobre una placa de moldeo de madera o tarima.

Cuando la mezcla de arena está lista para conformar el molde, se agrega en las cajas de moldeo, donde se ha colocado previamente el modelo. En la Figura 33 se puede apreciar el llenado de una caja de moldeo circular.



Figura 33. Llenado de caja de moldeo circular para hacer un impulsor de bomba centrífuga.
Fuente: Elaboración propia.

f. Compactación de arena preparada

La compactación se realiza con ayuda de apisonadores. En la Figura 34 se muestra el apisonamiento de una caja de moldeo circular.

Inicialmente, se colocan capas de arena (en promedio son tres capas, hasta rellenar toda la caja). Cada vez que se pone una capa de arena se apisona para conseguir que la compactación sea uniforme. Al finalizar con la adición de arena y compactación, se hace un enrasado para dejar prolija la superficie de la caja de moldeo.

Para el moldeo utilizan una serie de herramientas preparadas por los mismos moldeadores, tales como: pisonos, badilejos, palas, agujas, reglillas, etc.

Cuando la pieza a moldear es de tamaño significativo se procede a reforzar con alambre a modo de concreto armado, con el fin de que el molde sostenga su propio peso al vaciar el metal fundido. En la Figura 35 se puede apreciar el moldeo de una hélice de dimensiones considerables, cuyo molde es reforzado con varillas para evitar su desmoronamiento.



Figura 34.Herramientas para compactación del molde.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 35.Colocación de refuerzos para el moldeo de una pieza grande.

Fuente: Elaboración propia.

g. Extracción del modelo

Para extraer el modelo se humedecen los bordes del modelo, luego, se le aplican ligeros golpes para facilitar su remoción. Posteriormente, se retoca el molde para cubrir los desprendimientos de arena. Por lo general, los moldes están compuestos por dos partes, montadas una en cada semicaja. Para lograr que encajen correctamente, en las cajas de moldeo se sueldan ángulos en los vértices de la semicaja inferior para guiar el montaje de la caja de moldeo, tal como se aprecia en la Figura 36.



Figura 36. Extracción del modelo de la semicaja de moldeo.

Fuente: Elaboración propia.

h. Revestimiento con plombagina

Todos los fundidores usan un revestimiento para las caras interiores del molde. Este revestimiento es grafito pulverizado o plombagina, utilizado como pintura para mejorar el acabado superficial de la pieza obtenida.

Se sabe que los fundidores del norte utilizan plombagina por ser el revestimiento para moldes más económico que ofrece el mercado. Según datos de los fundidores, adquieren la plombagina a S/10/kg.



Figura 37. Revestimiento de los moldes con plombagina.

Fuente: Elaboración propia

i. Curado del molde

Como se comentó en el Capítulo 2, para retocar el molde y remover el modelo se humedecen sus contornos, por lo que, es necesario eliminar esta humedad superficial con un soplete. A este procedimiento se le conoce como curado.

j. Sistema de alimentación

Los sistemas de alimentación se incorporan en el molde de acuerdo a la experiencia del moldeador a través de tubos de PVC. La posición de las mazarotas no se calcula. Este punto se describirá con más detalle en la sección: “*Diseño del molde*”.

Cuando se han incorporado los sistemas de alimentación, la caja de moldeo se cierra y queda lista para el vaciado del metal líquido. Previamente, se colocan lastres (pesos) para contrarrestar la presión metalostática. Los pesos no son calculados, los fundidores los colocan por su experiencia, y, por lo general, es excesivo. Lo hacen para garantizar que el metal no salga por las entrecaras del molde.

A continuación, se describirán a detalle las tres actividades principales que se llevan a cabo durante la etapa de moldeo con mayor repercusión sobre la calidad de las piezas obtenidas:

3.2.1. Arenas de fundición

Tal como se indicó en el Capítulo 2, las arenas de fundición deben cumplir un mínimo de propiedades que garanticen su aptitud para el moldeo. Estas son: refractariedad, plasticidad, cohesión, etc.

En el norte del Perú, los fundidores desconocen las características de sus arenas, insumo principal para la conformación de los moldes.

Su criterio empírico y la vasta experiencia en el sector, les permite determinar *a priori* cuando una arena es adecuada para el moldeo. Sin embargo, no conocen criterios técnicos para seleccionarlas. Cuando las adquieren o las extraen de las canteras, solo se fijan en su capacidad de cohesión (comprobada al aplastar un puñado).

- Adquisición de arenas nuevas

Las arenas vírgenes o arenas nuevas se extraen de canteras locales. En la Tabla 14, se muestra la relación de canteras ubicadas en Piura, Sullana, Chiclayo y Trujillo, de estas se obtienen las arenas de los talleres de fundición que participan en este estudio. Cabe resaltar que estas canteras no están localizadas geográficamente con precisión, a excepción de la cantera Nariz del Diablo²³, ubicada en el distrito de Marcavelica de la provincia de Sullana; Costado del Cementerio, denominada así porque se extraen arenas de zonas aledañas al cementerio San José, en Sullana y Reque, en Lambayeque. De las demás canteras se conocen puntos referenciales que los proveedores dan a los fundidores, por ejemplo: Castilla, Moche, Chepén, La Esperanza, etc.

Tabla 14. Canteras de arena para fundición del norte del Perú.

Departamento	Provincia	Cantera
Piura	Sullana	Cerro Nariz del Diablo
		Costado del cementerio
Lambayeque	Piura	Castilla
	Reque	Zona 1
		Zona 2
La Libertad	Trujillo	Moche
		Chepén
		La Esperanza

Fuente: Elaboración propia.

Los fundidores que tienen la posibilidad de acceder a las canteras (taller 2, taller 3), extraen las arenas de un punto aleatorio. Para hacerlo, utilizan una pala con la que depositan las arenas en baldes de plástico con tapa para llevarlas hasta el taller. En cambio, los talleres que no conocen las canteras, esperan que su proveedor se las lleve. En ambos casos, el precio de las arenas es el transporte de la cantera hasta el taller. Por ejemplo, los talleres que extraen arenas de la cantera Nariz del Diablo pagan entre 10 y 12 soles en una mototaxi para llevarlas hasta su taller. De la misma manera, los proveedores que llevan arenas a los talleres, emplean triciclos para repartirlas.

Ellos, las adquieren de volquetes que venden las arenas por metro cúbico²⁴ y las reparten a los fundidores de la localidad.

²³ Llamada así por el cerro Nariz del Diablo.

²⁴ Un metro cúbico de arena puede costar entre 25 y 30 soles, siempre y cuando se les compre a partir de 5 metros cúbicos de arena.

- Almacenamiento

Una vez adquiridas, las arenas nuevas se disponen en un montículo (ver Figura 38), separadas de las arenas reutilizadas, como se muestra en la Figura 39. A esta zona se le conoce como patio de moldeo y solo pueden acceder el moldeador y sus ayudantes.

Los talleres que usan bentonita, la almacenan en envases de plástico, para conservarla.



Figura 38. Cantera de la Nariz del Diablo en Sullana, Piura.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 39. Patio de moldeo del taller 6, Lambayeque.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 40. Patio de moldeo de taller 9.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Preparación de arenas de fundición

La preparación de las arenas consiste en el acondicionamiento de las arenas recicladas y de las arenas nuevas, a través del desterronado y tamizado de las mismas y la mezcla íntima de ambos componentes con agua. Los fundidores indican que, cuando tienen una mezcla de arena muy suelta (poca aglutinación) que hace difícil la conformación del molde, se ven en la necesidad de agregar arcilla, pero esto, no pasa a menudo.

- Desterronado y tamizado

El desterronado consiste en reducir a golpe de martillo los trozos grandes de arenas nuevas y los moldes de coladas anteriores para obtener la arena reciclada. Luego de esta operación ambos tipos de arena se pasan por una serie de tamices para uniformizar su tamaño y textura.

Los tamices empleados son fabricados en el taller de fundición a partir de celosías de diferentes tamaños de malla sin una referencia específica²⁵. Según lo observado, las arenas pasan por, al menos, 6 tamices hasta lograr una textura fina. El primer tamiz retiene terrones no disgregados, ramas, piedras y demás impurezas de las arenas nuevas y alambres o partículas metálicas de las arenas recicladas; y el último, polvos (partículas muy finas). Cuando empiezan a generarse polvos, la operación de tamizado se da por concluida (para los fundidores esto es indicador de pérdida de arcilla). En la Figura 41 se puede ver el tamizado de las arenas.



Figura 41. Tamizado de la arena.
Fuente: Elaboración propia.

- Mezclado

Con frecuencia, los fundidores reutilizan las arenas, reponiendo solo las pérdidas propias del proceso anterior²⁶. Al mezclar las arenas nuevas y las recicladas, no dosifican la cantidad que se agrega de cada una. De acuerdo a su experiencia, buscan

²⁵ En el mercado se ofrecen mallas con aberturas desde 1/16" hasta 2". Estas son las medidas referenciales de los tamices fabricados por los fundidores.

²⁶ Después del desterronado de los moldes, la separación de impurezas y tamizado, los fundidores agregan arena virgen a la arena reciclada, tamizándola hasta tener una mezcla uniforme, de una coloración beige natural para que conformen los moldes.

una mezcla de textura suave (de finura media) y color claro (parecida a la de las arenas vírgenes), pues el color oscuro de las arenas es signo de pérdida de aglutinación y permeabilidad. Es por eso, que cuando las arenas tienen una coloración muy oscura (arenas quemadas), dejan de usarlas, reponiéndolas en su totalidad.

De los 10 talleres encuestados, solo uno cambia sus arenas después de cada colada pues consideran que pierden propiedades en el proceso. Los demás talleres, renuevan las pérdidas de arena propias del proceso. Comentan que cada 3 o 4 meses, renuevan por completo sus arenas de fundición.

Durante el mezclado, tanto de arenas nuevas como recicladas, estas se esparcen en el piso del patio de fundición y se incorporan con una pala hasta que quede una mezcla homogénea. De vez en cuando, el moldeador agrega agua con cautela. Los fundidores comentan que su mayor temor durante la preparación de las arenas es agregar mucha agua, pues el exceso de agua daña el acabado de las piezas.

Se considera que la mezcla está lista cuando la muestra tiene consistencia. Esto se verifica tomando un puñado, cohesionándolo. Si la muestra mantiene su forma, se puede empezar a conformar el molde.

Después de comprobar que la mezcla sea adecuada, se separan las arenas de relleno y las de revestimiento (que están en contacto con el modelo). Las arenas de revestimiento son tamizadas para conseguir mayor homogeneidad (pasa el último tamiz del proceso de tamizado inicial); mientras que las de relleno se agregan tal y como se obtuvieron del mezclado.

Al término de esta tarea se le puede empezar a colocar en el molde.

3.2.3. Diseño del molde

Para conformar el molde, se utilizan herramientas como: pisones, varillas, martillos, paletas, espátulas, alisadores, cepillos, clavos, sopladores (fuelles), soportes para almas, etc.

Primero, el modelo se coloca en la mitad de la caja de moldeo y debajo de esta se coloca una tabla como base. Se adiciona arena en capas, cubriendo el modelo y sus alrededores. Se pone una capa de arena de revestimiento y se compacta con un pisón. Luego se agregan dos capas de arena de relleno hasta completar el molde (cada vez que se agrega una capa de arena, el moldeador debe compactarla).

Cuando se han agregado las tres capas de arena, se compacta con el pisón, se nivela con una regleta y se alisa con una espátula.

Después, se voltea la caja de moldeo con la tabla en la base y se alisa el contorno con una espátula. El moldeador agrega arena seca (muy fina) para evitar que se adhiera la arena de la caja de moldeo superior.

Para asegurar las cajas de moldeo se utilizan alambres que sirven como registro para el montaje final.

El procedimiento se repite para la caja de moldeo superior. Cuando se ha terminado de apisonar, se separan ambas cajas y se colocan los sistemas de alimentación (bebedero). Además, con un alambre, se hacen respiraderos para la expulsión de los gases generados durante la colada.

Se tallan los canales de colada, se alisan y se procede a cerrar las cajas.

Durante el diseño del molde, también se realizan las siguientes actividades:

- Ubicación de los sistemas de alimentación y distribución

Este procedimiento en los talleres es totalmente empírico. De sus experiencias anteriores, van incorporando nuevas técnicas para ubicar el sistema adecuadamente, de tal manera que, se obtengan piezas con la menor incidencia de defectos.

Los fundidores del proyecto, en su totalidad, no hacen cálculo alguno de estos componentes. Para el bebedero suelen utilizar tubos de PVC o de acero galvanizado, los cuales no tienen ninguna conicidad que impida el arrastre de aire hacia la cavidad del molde. Los canales de colada y los canales de ataque se hacen practicando surcos con una herramienta preparada por ellos mismos.

- Fabricación de las cajas de moldeo

Las cajas de moldeo, por lo general, están hechas de madera o metal. Las cajas de madera presentan varias reparaciones, además, no mantienen su forma (cuadrada o rectangular) después de múltiples usos, debido al hinchamiento de la madera por el contacto con arena húmeda.

Las cajas de metal son cuadradas o rectangulares, con asas para su manipulación. Por el ahorro del material, en algunos casos, se fabrican cajas de metal que se ajustan a la forma de las piezas a fundir. Por ejemplo, se observó en uno de los talleres visitados que para fundir hélices no se emplean cajas ni cuadradas ni rectangulares, sino una caja de 9 lados que se ajusta a las dimensiones de la pieza.

- Colocación de pesos para contrarrestar la presión metalostática

Los lastres (pesos) se colocan encima de la caja superior. Para asegurarse de que no se levante durante el vertido del metal, colocan piezas muy pesadas. Sin embargo, no se realiza un cálculo del empuje metalostático. Los fundidores saben que, si no colocan lastres sobre los moldes, éste podría levantarse causando daños al fundidor que se encuentre vertiendo el metal

- Fabricación de machos, almas o noyos

Los machos se ubican de acuerdo a la forma de la pieza que estén fabricando y lo decide el moldeador según su experiencia. Para su fabricación, se utiliza harina de trigo y para compensar la presión metalostática refuerzan el interior del macho con alambres de construcción a modo de una viga de concreto armado, tal y como se hace en la industria de fundición de todo el mundo.



Figura 42. Sistemas de alimentación.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Características macroscópicas de las piezas de fundición gris

Al culminar la etapa de moldeo, el molde conformado está listo para recibir el metal fundido. Después del vertido y llenado de los moldes se espera un tiempo determinado por la experiencia del fundidor para que la pieza solidifique. Un indicador de que la pieza ha solidificado es el brillo del metal en el bebedero (un aspecto muy brillante se relaciona con el estado líquido del metal; mientras que, un aspecto menos brillante indica que ha solidificado).

El proceso de fundición termina con el desmoldeo manual. Los moldeadores separan las cajas de moldeo, manipulándolas con trapos o guantes y con ayuda de un martillo, desintegran el molde. Luego, se dejan enfriar las piezas. La mayoría de los talleres que participa no hace mecanizados posteriores a las piezas. Se entregan tal y como se obtuvieron del proceso.

Para conocer el estado en el que obtienen sus piezas de fundición, los talleres brindaron muestras de sus piezas. Estas piezas fueron analizadas por inspección visual y con ayuda del Manual de Defectos de Fundición de la AFS, se identificaron los defectos macroscópicos que aparecen en ellas.

En total, se han caracterizado macroscópicamente 24 muestras de fundición gris laminar. A continuación, se detallan los defectos macroscópicos encontrados en las piezas por taller.

a. Taller 1

• **Muestra M1**- *Arena vitrificada* (D221)

La barra de la Figura 43 muestra una capa de arena fuertemente adherida, que forma parte de la pieza. Presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro.



Figura 43 Barra de hierro gris en estado de colada.

Fuente: Elaboración propia.

- *Sopladuras o picaduras* (B111)

La Figura 44, muestra el corte transversal de la sección de la barra. Se observan cavidades esféricas con pared suave, que no están conectadas a la superficie externa (sopladuras). Las pequeñas cavidades (picaduras), que se muestran en la Figura 44.b, son de dimensiones diferentes. En este caso, la sección de la fundición está esparcida con sopladuras y picaduras. Además, las paredes interiores de ambos defectos son brillantes, más o menos, oxidadas y pueden estar cubiertas con una capa delgada de grafito.



Figura 44. Corte transversal de la barra. a) Cavidades esféricas a una distancia de la superficie de la barra. b) Cavidades esféricas sub-superficiales.

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M2**

- *Arena vitrificada* (D221)

La barra de la Figura 45, presenta una superficie muy rugosa, áspera e irregular a lo largo de toda la pieza. Esta superficie es una capa de arena adherida a la barra.



Figura 45.Superficie exterior de la barra irregular.
Fuente: Elaboración propia.

- *Inclusiones de escoria, sedimento o fundente* (G121)

En la Figura 46, se muestran cavidades rellenas sobre la superficie externa de la barra fabricada por el taller 1.



Figura 46.Cavidades irregulares rellanadas en la superficie externa de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M3**

- *Arena vitrificada* (D221)

La Figura 47 presenta una capa de arena fuertemente adherida a la barra.



Figura 47. Superficie externa de la barra
Fuente: Elaboración propia.

- *Salida* (E123)

En la Figura 48, se muestra una proyección de la pared que se extiende hasta arriba como aletas, siguiendo los bordes del molde.



Figura 48. Aletas que siguen los bordes del molde de arena
Fuente: Elaboración propia

- **Muestra M4**

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 49 se muestran cavidades que han sido rellenadas, en la superficie de la barra proporcionada por el taller 1.



Figura 49. Cavidades sobre la superficie de la barra rellenas.
Fuente: Elaboración propia.

- Picaduras en superficie (B123)

En la Figura 50 se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por maquinado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición.



Figura 50. Cavidades huecas en el extremo superior de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- Arena vitrificada (D221)

La barra de la Figura 51 muestra una capa de arena fuertemente adherida al punto de formar parte de la pieza. Presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro. Esta superficie irregular dificulta los procesos de mecanizado por su alta dureza.



Figura 51.Superficie irregular de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

b. Taller 2

• **Muestra M5**

- Contracción abierta o externa (B211)

La Figura 52 muestra un extremo de la barra. Se evidencia un hundimiento de la superficie de la pieza, que converge hacia un punto central. Debido a la apariencia irregular de la cavidad, este defecto se clasifica rechupe primario.



Figura 52.Extremo de la barra de hierro gris. Se señala la profundidad del rechupe primario en uno de los extremos de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- Sopladuras de escorias (B113)

En la Figura 53, se muestran defectos de la pieza después de ser mecanizada (antes del mecanizado, tenía buena apariencia). Las cavidades que se observan contienen granos sin color de sílice puro.



Figura 53. Sección transversal de la barra de hierro gris. Se muestra cavidades de forma irregular.
Fuente: Elaboración propia.

- Contracción interna (B221)

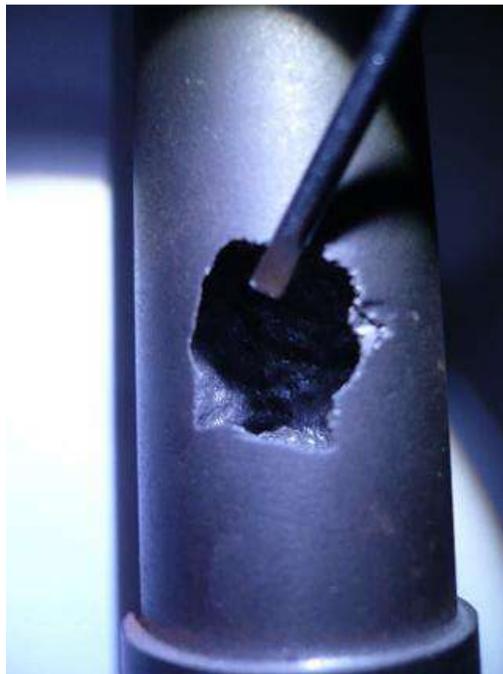


Figura 54. Sección transversal de la barra de hierro gris. Cavity interna tapada.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M6**

- Arena vitrificada (D221)

La Figura 55, muestra la superficie de la barra que ha sido fundida en molde de arena. La superficie es rugosa debido a la capa de arena que está adherida a la misma.

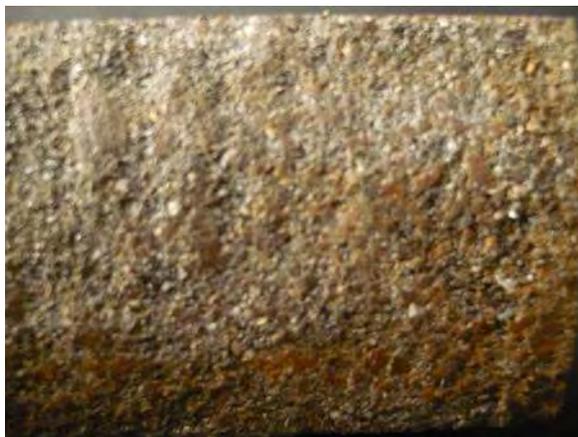


Figura 55. Superficie externa de la barra, fundida en molde de arena.

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M7**

La muestra fue colada en molde de arena y ha pertenecido al sistema de alimentación de una pieza, específicamente, una mazarota.

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 56, se presentan cavidades irregulares en la superficie de la pieza de hierro gris. Este tipo de defecto son parcialmente removidos durante la limpieza, quedando este tipo de cavidades irregulares.



Figura 56. Superficie de la mazarota. Se muestran cavidades de forma irregular.

Fuente: Elaboración propia.

- Sopladuras y picaduras (B111)

En la Figura 57, se muestran cavidades esféricas, que no están en contacto con la superficie externa de la fundición. Se pueden observar después del mecanizado.



Figura 57. Se muestra una cavidad esférica en la superficie.
Fuente: Elaboración propia.

• **Muestra M8**

El molde de la barra se dispuso de manera horizontal y se colocó una mazarota según la relación área/volumen.

- Arena vitrificada (D221)

En la Figura 58 se muestra una capa de arena fuertemente adherida, que dificulta los procesos de mecanizado por su alta dureza. La capa de arena es irregular.



Figura 58. Barra de hierro gris en estado de colada. Se observa una superficie irregular de aspecto granular.
Fuente: Elaboración propia.

- Exudación interna, exudación fosforosa (G113)

En la Figura 59, se presenta una inclusión metálica de forma esférica, con una superficie lisa y brillante. Además, se puede observar que esta inclusión está dentro de la sopladura de superficie brillante.

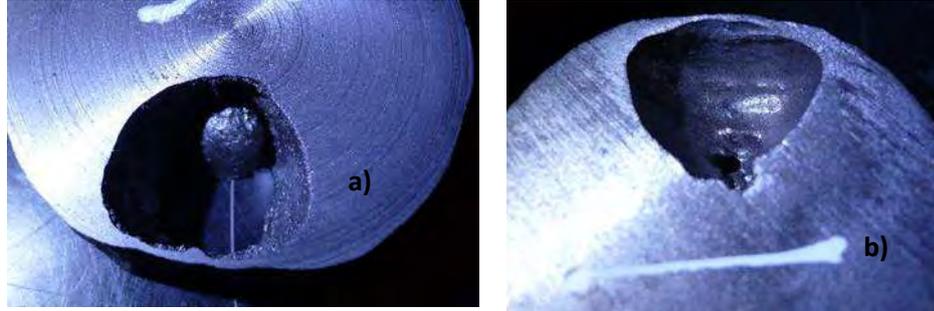


Figura 59. Corte transversal de la pieza. a) Inclusión metálica esférica. b) Sopladura donde se encontró la inclusión metálica
Fuente: Elaboración propia.

• **Muestra M9**

El molde de la barra se dispuso de manera horizontal y se colocó una mazarota según la relación área/volumen.

- Arena vitrificada (D221)

La Figura 60, muestra una capa de arena fuertemente adherida, al punto de formar parte de la pieza.



Figura 60. Barra de hierro gris en estado de colada. Se observa una superficie irregular de aspecto granular.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M10**

El molde de la barra se dispuso de manera horizontal y se colocó una mazarota según la relación área/volumen.

- *Arena vitrificada* (D221)

La barra de la Figura 61 muestra una capa de arena fuertemente adherida, al punto de formar parte de la pieza.



Figura 61. Barra de hierro gris en estado de colada. Se observa una superficie irregular de aspecto granular.

Fuente: Elaboración propia.

- *Inclusiones de escoria, sedimento o fundente* (G121)

En la Figura 62, se presentan cavidades irregulares en la superficie de la pieza de hierro gris.

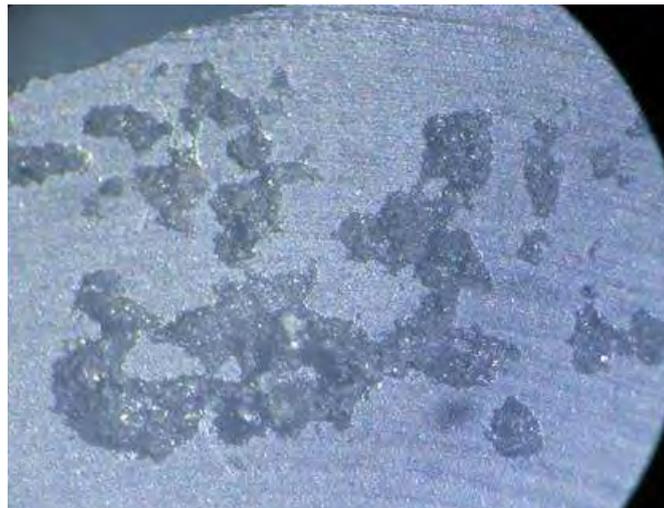


Figura 62. Sección transversal de la barra, se aprecian cavidades de forma irregular.

Fuente: Elaboración propia.

c. Taller 3

• **Muestra M11**

- Arena vitrificada (D221)

La barra (Figura 63) muestra una capa de arena fuertemente adherida, de color rojizo oscuro.



Figura 63. Barra de hierro gris en estado de colada. Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.

Fuente: Elaboración propia.

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 64, se presentan cavidades irregulares en la sección transversal de la pieza.



Figura 64. Sección transversal de la barra de hierro gris. Se muestra cavidades de forma irregular.

Fuente: Elaboración propia.

- Contracción interna o tapada (B221)

En la Figura 65, se muestra una cavidad irregular en la zona central de la barra, que sólo ha podido ser observada después del corte de la barra.

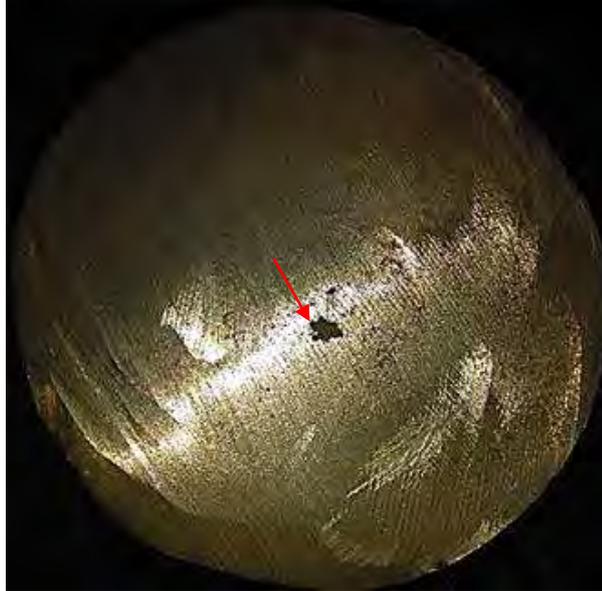


Figura 65. Sección transversal de la barra de hierro gris. Cavidad interna tapada.
Fuente: Elaboración propia.

d. Taller 4

• **Muestra M12**

- Sopladuras y picaduras (B111)

En la Figura 66 se puede ver la muestra M12, presenta pequeñas cavidades esféricas.



Figura 66. Acercamiento de una sección de la pieza. a) Se muestran cavidades. b) Corte transversal de la barra, se observan picaduras en superficie.
Fuente: Elaboración propia.

- Contracción abierta o externa (B211)

La Figura 67, muestra un extremo de la pieza que evidencia un hundimiento de la superficie original, que converge hacia un punto central.



Figura 67. Extremo de la pieza. Se señala la profundidad del rechupe primario.

Fuente: Elaboración propia.

- Arena vitrificada (D221)

La barra (Figura 68), muestra una capa de arena fuertemente adherida a la pieza. Es de color rojizo oscuro.



Figura 68. Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista panorámica de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M13**

- *Arena vitrificada* (D221)

La Figura 69, presenta una capa de arena fuertemente adherida a la barra, de aspecto arenoso e irregular.



Figura 69.Superficie irregular de la barra.

Fuente: Elaboración propia.

- *Contracción abierta o externa* (B211)

La Figura 70 muestra un extremo de la barra que evidencia un hundimiento de 15 mm de profundidad, que converge hacia un punto central.



Figura 70.Cavidad en forma de cono truncado.

Fuente: Elaboración propia.

- Picaduras en superficie (B123)

En la Figura 71, se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por maquinado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición.

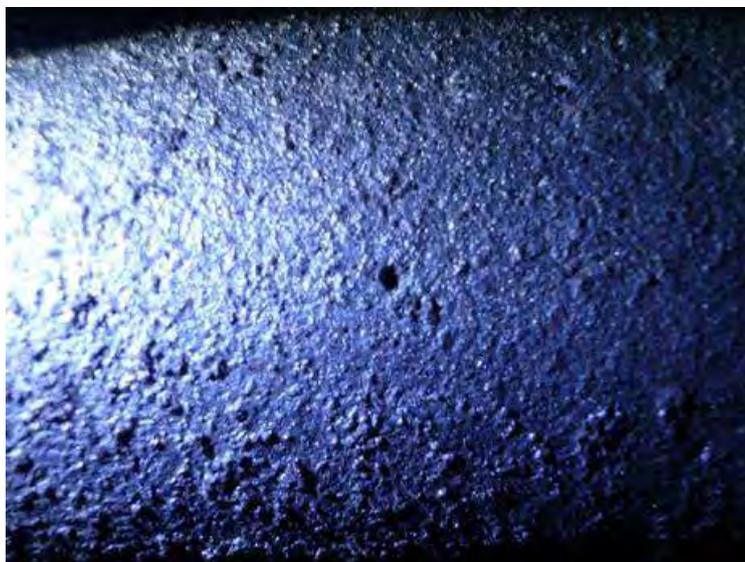


Figura 71. Cavity esférica en la superficie de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

e. Taller 5

• **Muestra M14**

- Sopladuras y picaduras (B111)

La Figura 72 muestra cavidades de forma irregular, que no están en contacto con la superficie externa.

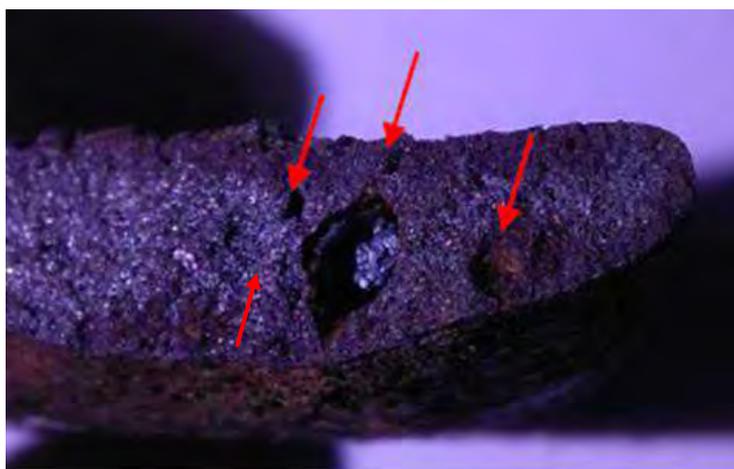


Figura 72. Poros en la sección transversal del trozo de fundición fabricado por el taller 5.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M15**

- Contracción interna o tapada (B221)

En la Figura 73, se muestran defectos de la barra que sólo han podido ser observados después del mecanizado, es decir, no se extienden hasta la superficie de la barra. Como consecuencia de estos defectos, no se ha podido fabricar la probeta de tracción según la norma ASTM.

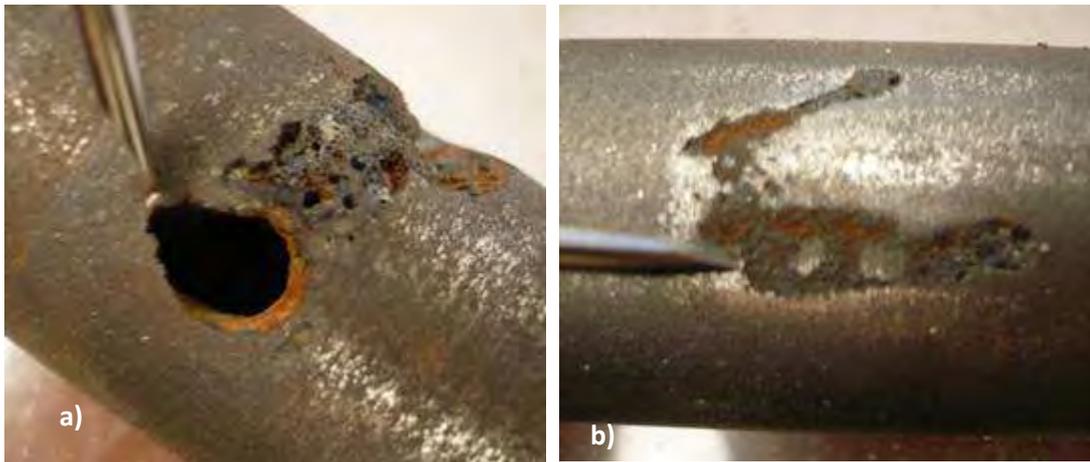


Figura 73. Barra de hierro gris. a) Contracción interna. b) Cavidad interna tapada.
Fuente: Elaboración propia.

- Sopladuras y picaduras (B111)

En la Figura 74, se muestra una cavidad esférica, que no está en contacto con la superficie externa de la fundición. Este defecto se observó después del mecanizado.



Figura 74. Barra mecanizada. Se muestra una cavidad esférica en la superficie.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M16**

- Contracción abierta o externa (B211)

La Figura 75, muestra un extremo de la pieza que evidencia un hundimiento que converge hacia un punto central.



Figura 75.Extremo de la pieza. Se señala la profundidad del rechupe primario en uno de los extremos.

Fuente: Elaboración propia.

- Inclusiones intermetálicas (G111)

En la Figura 76, se muestra una cavidad que puede ser originada por una inclusión intermetálica, puesto que es diferente en estructura, color y propiedades del material base. Ha aparecido después del proceso de mecanizado.



Figura 76.Pieza de Fundición Rivera, que muestra una cavidad.

Fuente: Elaboración propia.

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 77, se presenta cavidades irregulares en la superficie de la pieza de hierro gris. Este tipo de defecto aparece en la superficie de la fundición donde es parcialmente removido durante la limpieza, dejando este tipo de cavidades irregulares.



Figura 77.Superficie de la barra de hierro gris. Se muestra cavidades de forma irregular.
Fuente: Elaboración propia.

f. Taller 6

• **Muestra M17**

- Arena vitrificada (D221)

La Figura 78 presenta una capa de arena fuertemente adherida a la barra, de aspecto arenoso e irregular.



Figura 78.Superficie irregular de la barra, proporcionada por el taller 6.
Fuente: Elaboración propia.

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 79, se presenta cavidades irregulares en la superficie de la pieza de hierro gris.



Figura 79. Cavidades irregulares conectadas a la superficie exterior de la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

- Contracción interna o tapada (B221)

En la Figura 80, se muestran defectos de la barra que sólo han podido ser observados después de cortar la pieza transversalmente, es decir, no se extienden hasta la superficie de la barra.



Figura 80. Pequeña cavidad irregular en el centro de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

g. Taller 7

• **Muestra M18**- *Arena vitrificada* (D221)

La barra de la Figura 81 muestra una capa de arena fuertemente adherida a la pieza; presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro.



Figura 81. Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista panorámica de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se observa una superficie irregular con aspecto granular.
Fuente: Elaboración propia.

- *Contracción abierta o externa* (B211)

La Figura 82, muestra un extremo de la barra que evidencia un hundimiento de 17 mm de profundidad, que converge hacia un punto central.



Figura 82. Extremo de la barra de hierro gris. Se señala la profundidad del rechupe primario en uno de los extremos de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- Fundición rota (E221)

La Figura 83, muestra el extremo opuesto de la barra, donde se puede apreciar la apariencia de una fractura con un alto grado de oxidación.

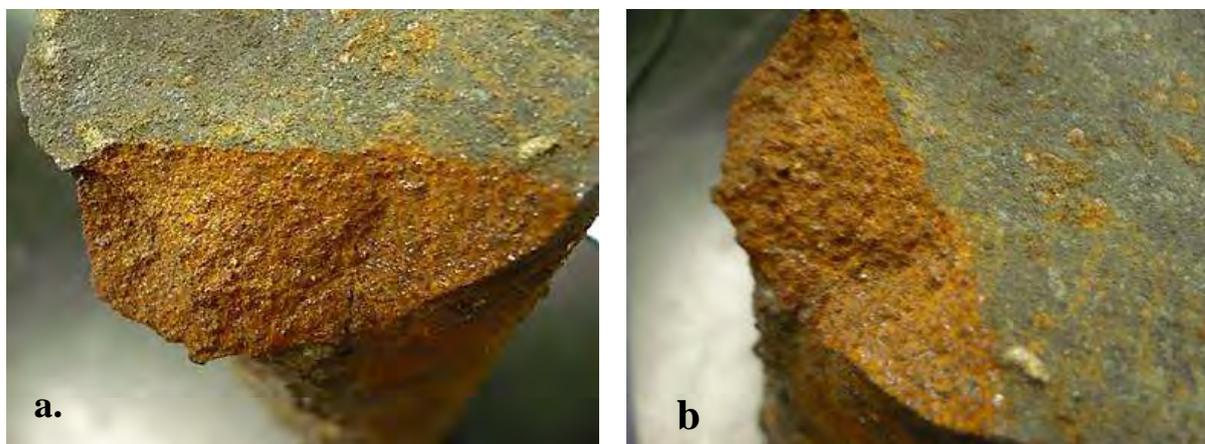


Figura 83.Extremo de la barra de fundición gris. Fractura oxidada
Fuente: Elaboración propia.

- Picaduras en superficie (B123)

En la Figura 84, se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por un mecanizado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición.



Figura 84.Picaduras superficiales en sección lateral de la barra de hierro colado.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M19**

- Contracción abierta o externa (B211)

La Figura 85, muestra un extremo de la barra que evidencia una cavidad de contracción que se extiende a la superficie exterior en forma de embudo de unos 15 mm de profundidad.



Figura 85. Extremo de la barra de hierro gris. Se señala la profundidad del rechupe primario (15 mm).

Fuente: Elaboración propia.

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

En la Figura 86, se presenta cavidades irregulares en la superficie de la barra de hierro gris.



Figura 86. Superficie de la barra de hierro gris. Se muestra cavidades de forma irregular.

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M20**

- Arena vitrificada (D221)

La Figura 87, presenta una capa de arena fuertemente adherida a la barra, de aspecto arenoso e irregular.



Figura 87. Superficie exterior de la barra fabricada por el taller 7.

Fuente: Elaboración propia.

- Picaduras en superficie (B123)

En la Figura 88, se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por un mecanizado de 1 a 2 mm desde la superficie de la pieza.



Figura 88. Cavidad esférica conectada a la superficie externa de la barra.

Fuente: Elaboración propia.

h. Taller 8

• **Muestra M21**

- *Arena vitrificada (D221)*

La Figura 89 muestra una capa de arena fuertemente adherida a la pieza. Presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro.

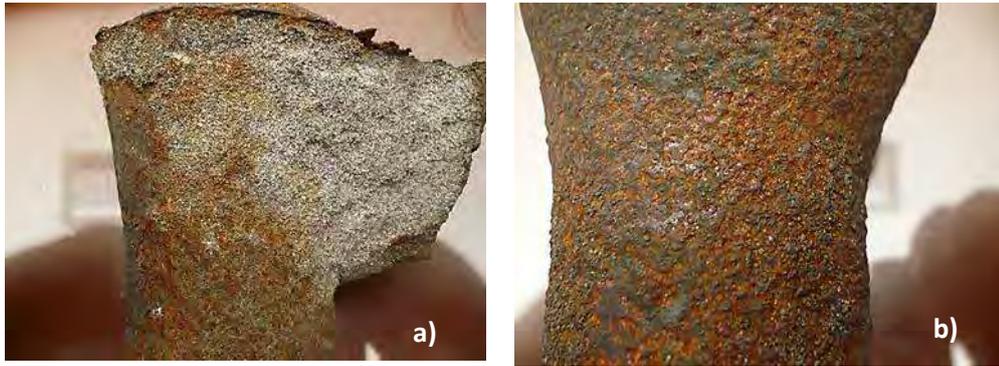


Figura 89. Barra de hierro gris en estado de colada. a) Vista de la parte superior de la barra. b) Acercamiento de la superficie, se muestra una superficie irregular con aspecto granular.

Fuente: Elaboración propia.

- *Hinchazón externo o interno (A211-2)*

En la Figura 90, se muestra el extremo de la barra, donde se observa metal saliente de forma irregular, con aspecto áspero y extendido.

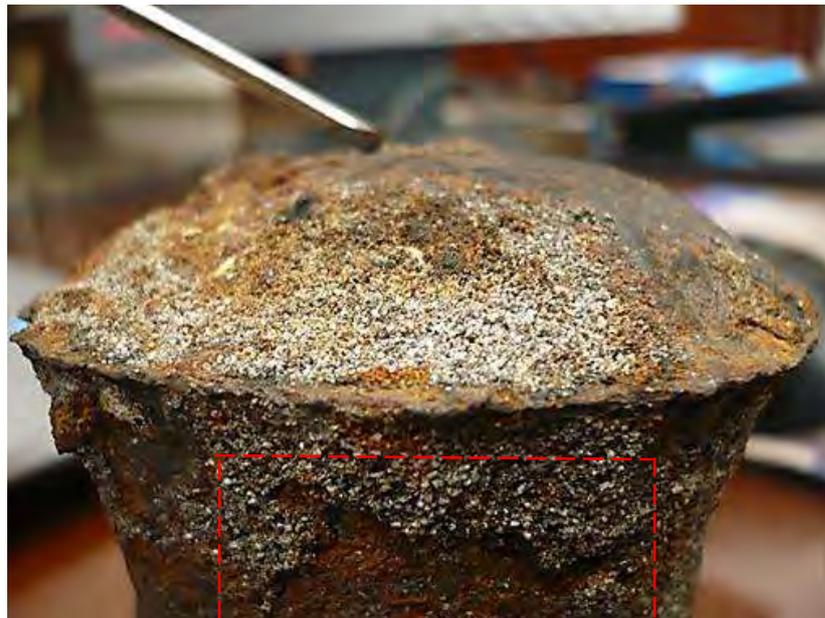


Figura 90. Extremo superior de la barra de hierro colado. Se observa hinchazón en esta zona.

Fuente: Elaboración propia.

- Darta, expansión de darta (D231)

En la Figura 91, se muestra una proyección metálica irregular de 1 mm de espesor, con bordes agudos y superficies ásperas, paralela a la superficie de la barra. Esta capa de metal está adherida a la fundición en pocos puntos. Además, la superficie de la fundición por debajo de esta capa muestra una depresión.



Figura 91. Parte inferior de la barra de hierro colado.
Fuente: Elaboración propia.

i. Taller 9

• **Muestra M22**

- Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G121)

Como se puede apreciar en la Figura 92, se observan cavidades irregulares en el borde inferior de la pieza.



Figura 92. Borde inferior de la pieza "manguito". Se muestra cavidades de forma irregular.
Fuente: Elaboración propia.

- Picaduras en superficie (B123)

La Figura 93 muestra pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por maquinado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición.



Figura 93. Picaduras en toda la superficie de la pieza de hierro colado.

Fuente: Elaboración propia.

- Revestimiento defectivo o mala reparación del molde (E112)

En la Figura 94, se observan la vista superior e inferior de la cavidad del macho del molde. Algunas de las esquinas son redondeadas y los bordes son irregulares. Además, el borde externo, que está en contacto con el molde, es irregular.

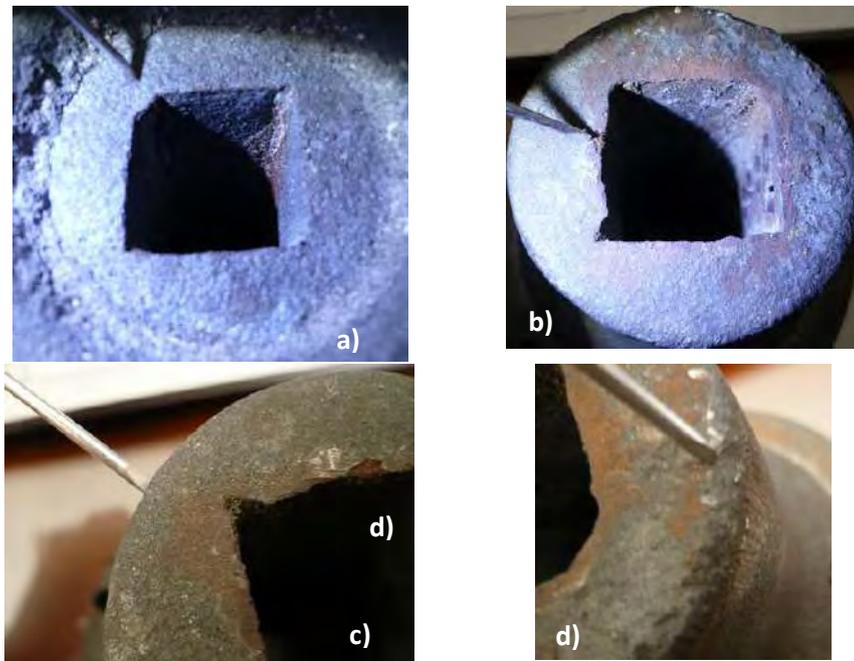


Figura 94. Bordes adyacentes al macho o corazón del molde. a) Borde inferior redondeado. b) Borde superior irregular. c) Borde superior de la fundición correcto. d) Borde de la fundición irregular.

Fuente: Elaboración propia.

j. Taller 10

• **Muestra M23**- Costura o costurón (D113)

En la Figura 95, se muestran ranuras que tienen apariencia de pliegues sobre la superficie de la fundición, extendidas en una serie de líneas hendidas, pero no a gran profundidad. Este defecto está ubicado en la superficie horizontal de esta pieza delgada.



Figura 95. Sección de cocina mejorada mostrando una irregularidad en la superficie.
Fuente: Elaboración propia.

- Sopladuras y picaduras (B111)

En la Figura 96, se muestran agrupamientos de cavidades (picaduras) de dimensiones variadas.



Figura 96. Acercamiento de una sección de la pieza, se muestran cavidades.
Fuente: Elaboración propia.

- Arena vitrificada (D221)

En la Figura 97, se muestra una capa de arena fuertemente adherida. Presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro.



Figura 97. Trozo de cocina mejorada en estado de colada. Acercamiento de la superficie, se muestra una superficie irregular de aspecto granular.
Fuente: Elaboración propia.

- Salida (E123)

En la Figura 98, se muestran dos aros base de cocinas mejoradas que, no pertenecen a la muestra estudiada anteriormente. Sin embargo, este tipo de defecto identificado como salida (E123), es muy frecuente en la empresa; generando rechazos y pérdidas.



Figura 98. Cocinas mejoradas fabricadas por Fundición Salinas. a) Aro base con evidente discontinuidad. b) Aro base sano.
Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra M24**

- *Arena vitrificada* (D221)

La barra (Figura 99) muestra una capa de arena fuertemente adherida a la pieza. Presenta un aspecto arenoso y color rojizo oscuro.



Figura 99. Superficie externa de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- *Sopladuras y picaduras* (B111)

En la Figura 100, se muestran agrupamientos de cavidades (picaduras) de dimensiones variadas.



Figura 100. Acercamiento de una sección de la pieza, se muestran cavidades.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Costos de la producción de fundiciones grises en el norte

Uno de los principales problemas de las pequeñas empresas del sector fundición del norte del Perú, es el manejo empírico de sus negocios. Por lo general, el organigrama de la empresa está encabezado por el gerente o dueño de la empresa, quien es un fundidor de vasta experiencia, que supervisa las tareas. (Ver Figura 101).

De los 10 talleres que se han visitado, solo 2 cuentan con un supervisor capacitado, el taller 4 y el taller 10, cuyo supervisor es un ingeniero mecánico. En los demás, el dueño de la empresa cumple con esta función, valiéndose de su experiencia.

En el área contable, todos los talleres cuentan con un contador que llega a sus empresas esporádicamente para tratar temas de impuestos y cuentas.

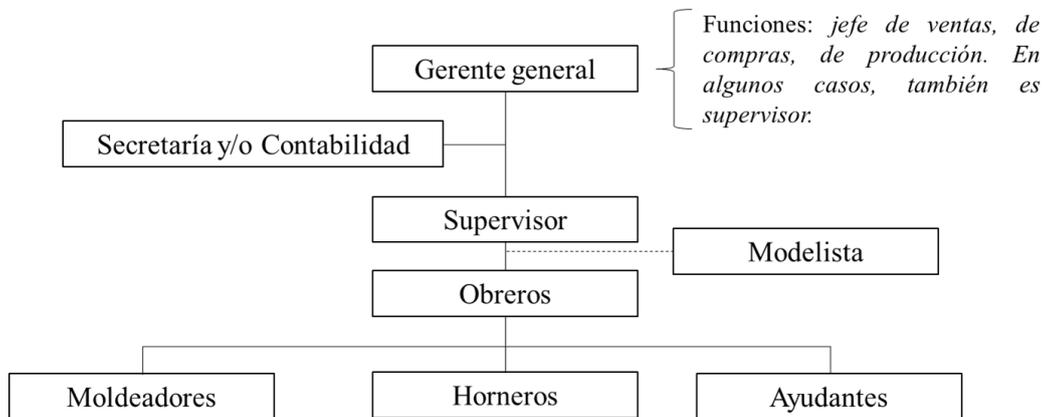


Figura 101. Organigrama funcional común de los talleres del norte del Perú.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la información brindada por el Taller 2 se han podido analizar los costos de las empresas tomando como referencia la producción de un piñón de 25 kg, cuyo precio es de 100 soles.

El objeto de costo de la producción de cada taller es el kg de hierro fundido/pico de colada. En este caso se va a costear en base a la producción de una pieza de 25 kg de hierro fundido, como se muestra en la Figura 102.



Figura 102. Piñón dentado de fundición gris laminar.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Mezcla de arena

Inicialmente, se deben adquirir los insumos para preparar las arenas de moldeo o fundición. Dado que la pieza que se va a producir tiene un peso bruto de 25 kg, se ha diseñado en Solidworks el modelo y el molde para aproximar cuántos kilos de arena hacen falta para producirla.

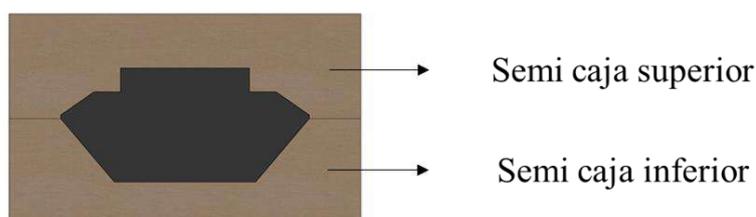


Figura 103. Molde y modelo diseñado en Solidworks.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de una caja de moldeo de dimensiones 40x40x120 cm, se han calculado cuántos kilos de cada insumo hacen falta para producir el piñón. En este caso, se va a considerar la formulación de arenas propuesta en el Anexo B.5, formulación b, que se muestra en la Tabla 15.

Considerando que las arenas empleadas tienen una densidad de 1500 kg/m^3 , aproximadamente, se procede a diseñar las cajas de moldeo y calcular la cantidad de arena. Se van a necesitar 25.83 kg de arena para la caja de moldeo superior y 24.48 kg para la caja de moldeo inferior. En total, se propone que se preparen 60 kg de arena de moldeo para conformar el molde de esta pieza.

Tabla 15. Fórmula referencial de mezcla de arenas de moldeo.

Preparación de arenas		
Insumos	Para 100 kg	Para 60 kg
Arena reciclada	80 kg	48 kg
Arena nueva	20 kg	12 kg
Bentonita	14 kg	8.4 kg
Agua	3.5 l	2.1 l

Fuente: Rueda, Luis Fernando, 2011.

Para preparar la mezcla hace falta el trabajo de un obrero, cuyo tiempo de preparación estimado es de 2.5 horas por cada 25 kg de arena. Esta labor se realiza manualmente.

Los costos de producción asociados a la preparación de arenas, se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Costos de insumos de la preparación de arenas de moldeo.

Descripción	Cantidad	Precio/ ton o precio/kg	Total (S/.)
Arena reciclada ²⁷	48 kg	0.064 soles/kg	3.072
Arena nueva ²⁸	12 kg	0.2/kg(*)	2.400
Bentonita	8.4 kg	646.00 soles/ton(**)	5.4264
Agua	2.1. 1	0.00017 soles/l (***)	0.000357
TOTAL			S/ 10.898

(*) Precio del flete de 60 kg de arena en una mototaxi.

(**) Precio referencial de COMACSA, Lima.

(***) Precio referencial de EPS GRAU, Piura (S/.1.70 soles/m³)

Fuente: Elaboración propia.

La mano de obra directa de este procedimiento se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Mano de obra directa para preparar arenas.

Descripción	Valor hora	Valor diario	Sueldo mensual
Moldeador	1.59	38.45	1153.5 (*)
Total	1.59	38.45	1153.5 (*)

(*) El moldeador es considerado un obrero contratado, por lo que su costo se obtiene sumando las 12 remuneraciones mínimas vitales (S/.850) más 15 días de vacaciones más media remuneración por gratificaciones en julio y en diciembre más CTS de 15 remuneraciones diarias por año y salud.

Fuente: Elaboración propia.

Para la preparación de arenas se estima un tiempo de 2.5 horas, por lo que, el precio de la mano de obra para un molde de una pieza de 25 kg es de 3.98 soles. Es preciso comentar que, para el proceso de moldeo en sí mismo, solo hace falta agregar la depreciación de las herramientas de moldeo empleadas por los talleres.

Ahora, para el revestimiento de los moldes, una vez que ya están conformados, se emplea plombagina, cuyo costo por kg es de 10 soles. Para aplicarla sobre el molde, se le agrega agua, empleando unos pocos gramos para el revestimiento de este molde. Para revestir un molde para fundir una pieza de 25 kg se necesitan 2.5 soles de insumos.

Entonces, para preparar 60 kilogramos de arena para conformar el molde a partir del que se obtendrá una pieza de 25 kg, se invertirá:

$$\begin{aligned}
 CU_{\text{etapa de moldeo}} &= \frac{13.47 + 3.08 + 2.5}{25 \text{ kg de hierro fundido}} = \frac{S/19.05}{25 \text{ kg de hierro fundido}} \\
 &= \frac{S/7.062}{\text{kg de hierro fundido}}
 \end{aligned}$$

²⁷ El precio de las arenas recicladas se calcula a partir del salario del obrero por hora (S/.1.60) y la depreciación del martillo desterrador de moldes de coladas anteriores (S/.0.000254051).

²⁸ El precio de las arenas nuevas se calcula partir del costo del transporte de arenas en la provincia de Sullana. Por cada viaje, en una mototaxi los fundidores trasladadas 60 kg de arena. El costo ida y vuelta es de 12 soles.

Tabla 18. Insumos para revestimiento de moldes.

Descripción	Cantidad	Costo por kilogramo o por litro	Costo por und.	Total
Plombagina	250 g	10 soles/kg (*)	0.001	2.5 soles
Agua	1l	0.00017 soles/l	0.00017 soles	0.00017 soles
TOTAL				2.50017 soles

(*) Precio referencial e la empresa COMACSA.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Fusión y colada

En el taller 2 se cuenta con dos hornos de cubilote los cuales tienen regímenes de fusión de 2000 kg/h y 3000 kg/h.

En promedio, se realizan 8 coladas al día durante el proceso de fusión de las piezas. Para poder obtener un régimen por colada, se divide cada uno de los regímenes, anteriormente mencionados, por la cantidad de coladas al día. De esta manera, se tiene que, el horno pequeño trabaja con 250 kg/colada y el horno grande con 375 kg/colada.

Sin embargo, este taller presenta un 15% de piezas defectuosas al finalizar el proceso. Con este porcentaje se puede obtener la cantidad neta de kg de hierro fundido/colada. En la Tabla 19 se muestran estos datos.

Tabla 19. Datos considerados en la estructura de costos.

Hornos de cubilote	Capacidad (kg/colada)	Piezas de 25 kg/colada
Horno pequeño	212.5 kg/colada	8 piñones
Horno grande	318.75kg/colada	12 piñones

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar esta operación, la empresa cuenta con un obrero contratado y dos obreros adicionales.

El detalle de la estructura de costos de esta empresa, respecto a su etapa de fusión y colada se detalla en el Anexo C.2. Esta estructura ha sido tomada del Informe de Diagnóstico del proceso de fundición del norte del Perú.

En resumen, los costos fijos y variables unitarios, así como, de los costos directos e indirectos unitarios se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Resumen de los costos unitarios del taller 2.

COSTOS UNITARIOS (S/)	HORNOS DE CUBILOTE	
	Horno pequeño	Horno grande
CU kg de hierro fundido – ETAPA DE FUSIÓN Y COLADA	2.8	2.6

Fuente: Elaboración propia.

A estos valores, se les agrega el costo unitario de la etapa de moldeo:

$$\begin{aligned}
 &= 2.8 \frac{CU_{kg \text{ de hierro fundido-horno pequeño}}}{S/} \frac{S/}{kg \text{ hierro fundido}} * 212.5 \frac{kg \text{ hierro fundido}}{pico \text{ de colada}} + 19.05 \frac{S/}{piñon} \\
 &* 8 \text{ piñones} = \mathbf{747.4} \frac{S/}{colada}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2.6 \frac{CU_{kg \text{ de hierro fundido-horno grande}}}{S/} \frac{S/}{kg \text{ hierro fundido}} * 318.75 \frac{kg \text{ hierro fundido}}{pico \text{ de colada}} + 19.05 \frac{S/}{piñon} \\
 &* 12 \text{ piñones} = \mathbf{1057.35} \frac{S/}{colada}
 \end{aligned}$$

Inicialmente se había dicho que por cada piñón se cobra 100 soles:

- En el horno pequeño se obtienen 8 piñones, por lo que se cobraría 800 soles.
- En el horno grande se obtienen 12 piñones, por lo que se cobraría 1200 soles.

El margen de ganancia por cada horno de cubilote se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Margen de ganancia del taller 2.

Horno de cubilote	Margen de ganancia (S/ por colada) ²⁹
Horno pequeño	52.6
Horno grande	142.65

Fuente: Elaboración propia.

Esto quiere decir que, por cada colada, el taller 2 tiene un margen de ganancia de 52.6 soles, en el horno pequeño y 142.6 soles, en el grande.

Es preciso comentar que, hay algunas variables que no se han considerado en la estructura de costos de la etapa de fusión y colada que se muestra en el Anexo C.2; por lo que, se puede inferir que el margen de ganancia es menor que el calculado.

²⁹ Se obtiene de la diferencia entre lo que se cobra por el lote de piezas y los gastos, en total, que implica la fabricación del lote.

Capítulo 4

Diagnóstico de la situación actual del proceso de moldeo de las industrias manufactureras de fundición en el Norte del País.

Para elaborar el diagnóstico de la etapa de moldeo se han considerado cuatro aspectos importantes: los insumos empleados en el moldeo, el modo en el que realizan sus actividades, el tipo de herramientas empleadas y el acabado superficial de las piezas de fundición que obtienen, es decir, su calidad macroscópica.

En este capítulo se relaciona la calidad macroestructural con el modo de realización del proceso, insumos empleados y herramientas, descritos en el capítulo 3.

Además, a partir de un análisis FODA se resumen los puntos críticos del proceso, así como los problemas prioritarios y sus causas principales. Finalmente, se presentan algunas sugerencias que los fundidores podrían tomar en cuenta para mejorar la calidad de sus piezas y de esa manera, impulsar su pequeña industria.

4.1. Influencia del moldeo en la calidad macroscópica de las piezas de fundición gris laminar

En la fundición y vaciado de metales, deben considerarse muchos factores variables, para reducir la incidencia de los defectos. (Higgins, 1984). Estos factores pueden clasificarse como:

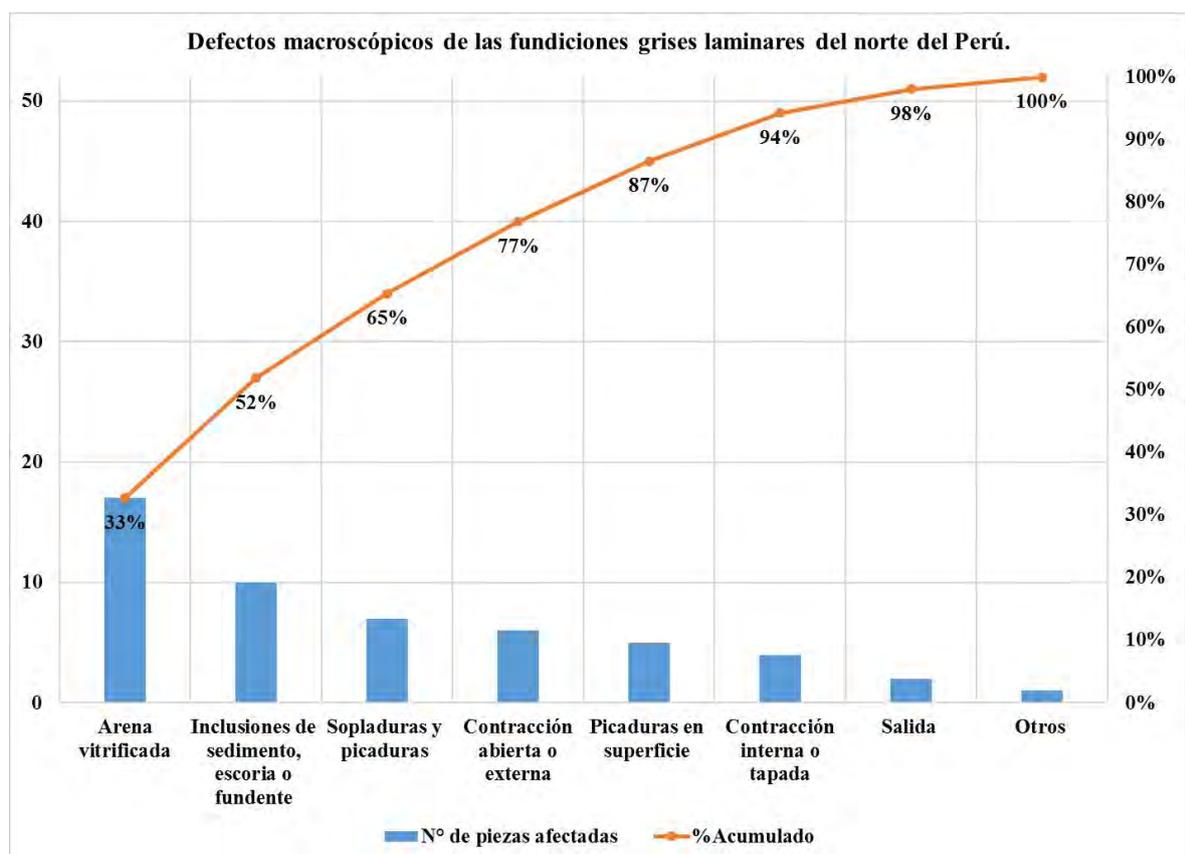
- Mala práctica en la fusión.
- Mala práctica en el vertido.
- Moldeo pobre.
- Diseño pobre del modelo.
- Composición incorrecta del metal.
- Arena de moldeo corazonada, de composición incorrecta o en malas condiciones.
- Colocación incorrecta de colados y cargadores.

En la Tabla 22 se muestra la frecuencia de aparición de defectos macroscópicos en las piezas.

Tabla 22. Frecuencia de incidencia de defectos en las piezas.

Defectos macroscópicos más comunes	Frecuencia
Arena vitrificada	17
Inclusiones de sedimento, escoria o fundente	10
Sopladuras y picaduras	7
Contracción abierta o externa	6
Picaduras en superficie	5
Contracción interna o tapada	4
Salida	2
Exudación interna o fosforosa	1
Sopladuras de escoria	1
Inclusiones intermetálicas	1
Costura o costurón	1
Revestimiento defectivo o mala reparación del molde	1
Darta, expansión de darta	1
Hinchazón interna o externa	1
Fundición rota	1

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 104** Diagrama de Pareto en el que se resumen los defectos macroscópicos encontrados en el norte del Perú.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 104 se muestra un diagrama de Pareto que indica el número de veces que se ha encontrado cierto macrodefecto en un total de 24 muestras analizadas. Sobre la base del análisis de Pareto, se identifica que más del 50% de todos los defectos observados dependen solo de 2 problemas: arena vitrificada (35%) e inclusiones de escoria, sedimento, escoria o fundente (15%), los cuales tienen su génesis en las malas prácticas de moldeo.

A continuación, se analizarán las causas asociadas a los defectos macroscópicos encontrados en las piezas de fundición. Para ello, se empleará el Diagrama de Ishikawa o de espina de pescado, en el que se consideran 4 categorías a partir de los cuales se identifica su origen.

La primera categoría es el *material*, desde el cual se analizan las causas relacionadas a la arena de moldeo. La segunda categoría, es el *método*, es decir, el proceso de moldeo manual, que comprende desde la preparación de las arenas hasta el revestimiento del molde. La tercera es la *manufactura*, referida a la conformación del molde y la última se refiere a las *cajas de moldeo*, utilizadas para dar forma del molde.

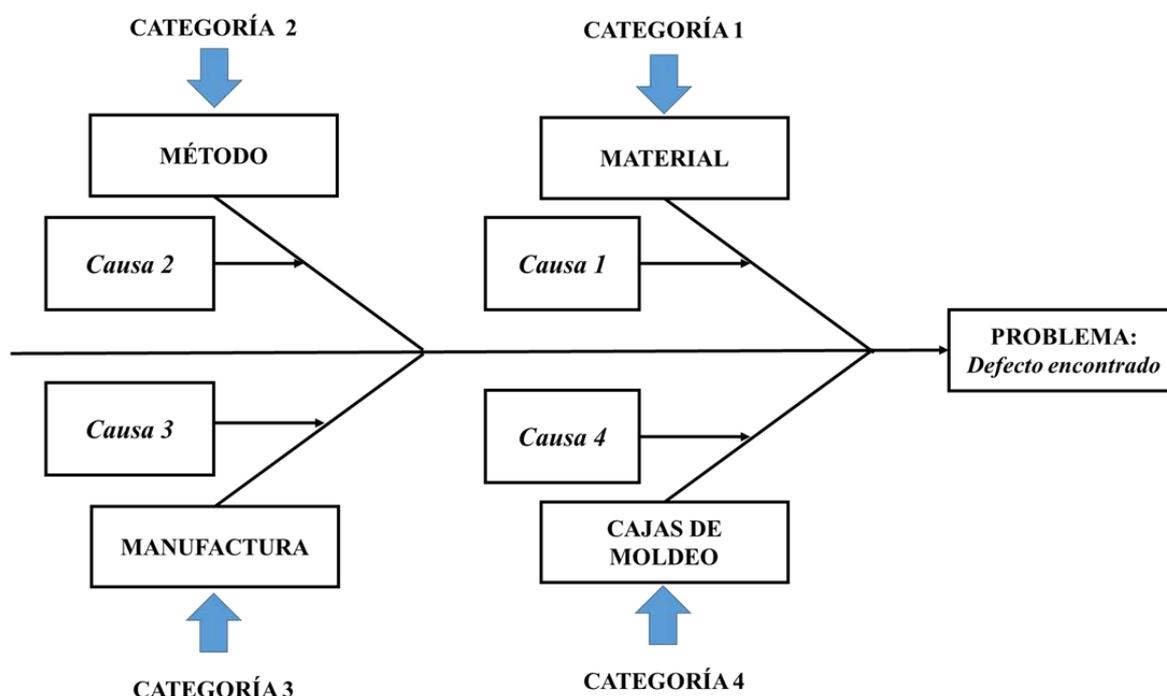


Figura 105. Modelo de Diagrama de Ishikawa.

Fuente: Elaboración propia.

a. Arena vitrificada

Al analizar las 24 muestras de fundición se encontró que el macrodefecto que más aparece en las piezas es la arena vitrificada, exactamente, en 17 de las 24 muestras (70%). Las causas asociadas a este defecto se muestran en el Diagrama de Ishikawa de la Figura 106.

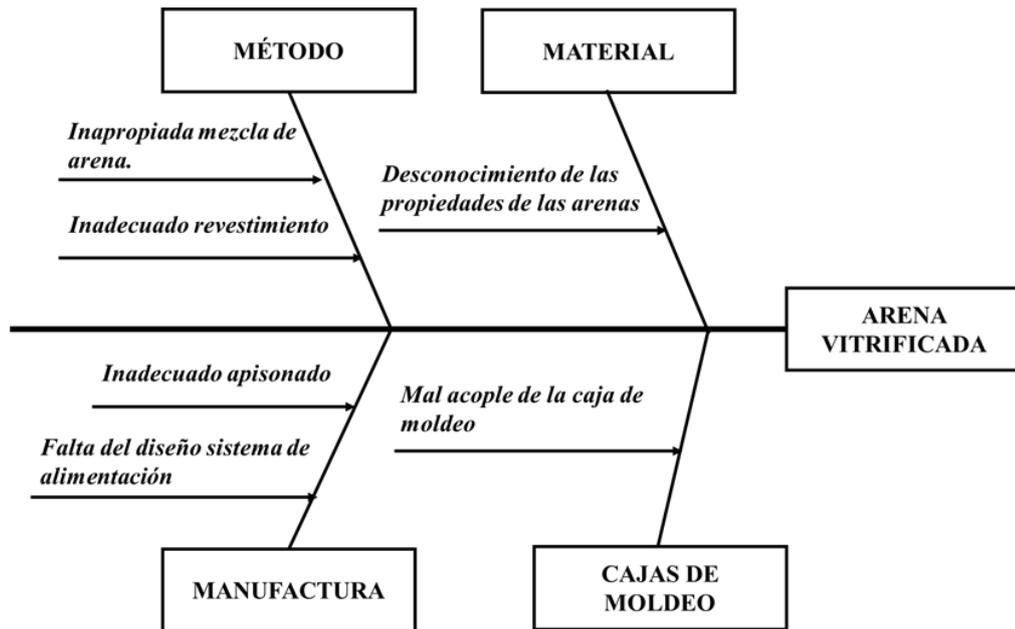


Figura 106. Diagrama Ishikawa del defecto: Arena vitrificada.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto del material, este macrodefecto se origina por el desconocimiento de las propiedades de las arenas, entre ellas:

- *Insuficiente refractariedad de la arena*
En cada colada que se realiza, las arenas reutilizadas pierden su refractariedad, es decir, su capacidad de resistir altas temperaturas. Esto, las debilita y las vuelve erosionables. Un metal con excesiva temperatura arrastra estas arenas, adhiriéndolas a la pieza.
- *Baja humedad de la arena de moldeo*
Durante la preparación de la mezcla de moldeo, se necesita adicionar un porcentaje de agua suficiente, de manera que la arcilla, al humectarse, proporcione a la mezcla su carácter plástico y aumente su resistencia a la compresión. Cuando se conforman moldes con arenas de moldeo muy secas, porciones de estas se desprenden y son arrastradas durante la colada debido a la falta de cohesión y débil comportamiento del molde conformado.
Otro factor relacionado con este problema es el tiempo de mezclado. Si se hace un mezclado durante un tiempo muy corto, aparecerán terrones con mucha humedad, y otros son muy secos; unos con exceso y el resto con escaso aglutinante.
- *Arena demasiado gruesa*
Es una causa relacionada con el apisonado inadecuado, los granos de arena gruesos son más complicados de apisonar.

En cuanto al método, este macrodefecto se origina, principalmente por:

- Mezcla no homogénea de componentes
El incorrecto mezclado de las arenas origina adherencia de arena en las piezas cuando el aglutinante queda acumulado, produciendo herviduras en el momento de la colada y erosionándola.
Del mismo modo, si la humedad no queda bien distribuida, se producirá arrastre de arena durante el vertido del caldo y posteriormente, arena adherida en la pieza. Las arenas con escaso contenido de agua y arcilla son las más problemáticas por su baja resistencia. El metal la arrastra fácilmente y quedan se produce la vitrificación de porciones de arena sobre las piezas.
- Revestimiento inadecuado
La arena vitrificada en las piezas fundidas puede deberse a que el recubrimiento o pintura no es suficientemente fuerte y su debilidad origina que la arena sea arrastrada y se adhiera a la pieza como una costra difícil de remover.

Respecto de la manufactura, a partir del diagrama de Ishikawa se determinaron dos causas principales, como se describe a continuación:

- Apisonado inadecuado
El apisonado es una acción importante en el molde, puesto que, si es muy débil, puede generar vitrificación de arena. La falta de arena de contacto sobre los modelos causa que el metal líquido arrastre con facilidad la arena suelta, quedando adherida a la pieza. Lo mismo sucede con la falta de homogenización en el apisonado, unas partes quedarán firmes, otras débiles, produciéndose el desprendimiento.
- Falta de diseño de sistema de alimentación
Cuando se colocan de manera inadecuada las entradas de colada, canales y bebederos, donde el metal líquido ataca superficies, ocasionando las erosiones que producen arena vitrificada sobre las piezas.

En cuanto a las cajas de moldeo, este macrodefecto se origina por:

- Mal acople de las cajas de moldeo
Las cajas de moldeo de madera, se hinchan, deformándose en el momento de la conformación del molde, por lo que, al cerrarlas, se obtienen piezas descentradas, como se muestra en la Figura 107. Cuando estas piezas se extraen, en las caras sobrantes se pega una capa de arena muy dura.

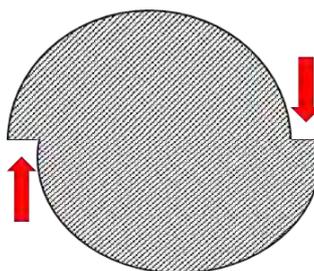


Figura 107. Esquema de una pieza descentrada.
Fuente: Elaboración propia.

b. Sopladuras y picaduras

En 10 de las 24 muestras se han encontrado sopladuras y picaduras. Este macrodefecto se debe a la presencia de gas en el metal fundido original. Al solidificarse éste, rechaza el gas en solución formando cavidades llenas de gas en el vaciado.

Estas cavidades subcutáneas se forman por gases que emanan del molde mismo y que no han podido escapar debido a la falta de permeabilidad de la arena de moldeo o a una pobre ventilación.

El gas aparece dentro de los moldes después de su llenado y pudiendo provenir del moldeo, de los machos, de reacciones químicas entre la aleación y algunos soportes, etc.

En la Figura 108 se muestra el Diagrama de Ishikawa a partir del cual se determinaron las causas asociadas a este defecto.

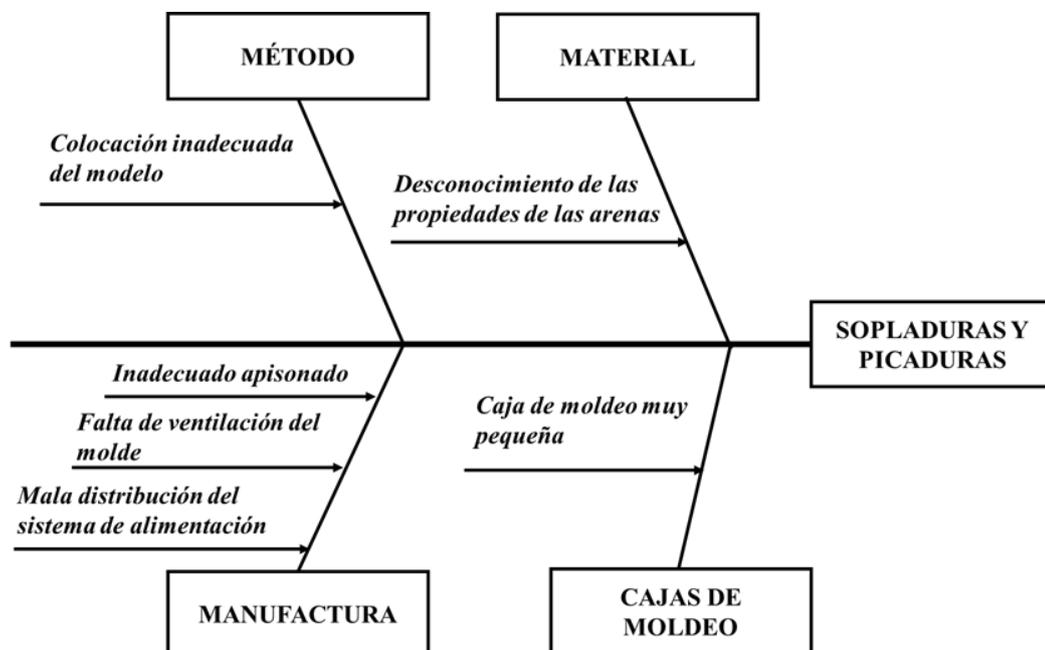


Figura 108. Diagrama de Ishikawa del defecto identificado como: Sopladuras y picaduras.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto del material, las causas se relacionan con:

- *Exceso de humedad del molde*
Durante la conformación del molde, la arena, el molde y los machos son humedecidos. Al calentarse, la arena por el contacto con el metal colado transforma en vapor el exceso de humedad. Cuando el agua ebulle, lo hace con un incremento de volumen del orden de 1600 veces. Esta gran cantidad de gas generado tiene que encontrar una salida adecuada a través de los granos de arena. Sin embargo, conforme va atravesando la arena, el agua se va enfriando y condensándose, repercutiendo en la permeabilidad pues puede bloquear la salida de otros tipos de gas que se generan por la calcinación de materiales orgánicos añadidos al molde.

En relación al método, las sopladuras y picaduras tienen su génesis en:

- *Mala colocación del modelo*
Cuando un modelo queda con superficies rugosas, poca salida o contrasalida, puede causar fracturas en el molde y desprendimientos de arena, que, al ser removidas, constituirán poros o picaduras en la superficie.
- *Falta de homogeneidad en el mezclado*
Cuando no se logra mezclar todos los componentes que constituyen una mezcla de moldeo, el aglutinante queda acumulado en ciertas partes, produciendo sopladuras en el momento de la colada.

Respecto de la manufactura, las causas asociadas son:

- *Apisonado excesivo*
Cuando se le aplica una fuerza mayor a la requerida durante el apisonado, se endurece el molde, disminuyendo su permeabilidad, generando este tipo de defectos.
- *Falta de ventilación en el molde*
Al terminar de conformar los moldes, se les deben practicar respiraderos, con la finalidad de expulsar los gases producidos durante la colada, pues, de lo contrario, se quedan atrapados en el molde generando sopladuras y picaduras.
- *Mala distribución del sistema de alimentación*
La ubicación de un canal de ataque directo hacia la pieza es desventajosa pues, el metal fluye directamente dentro del molde sin haber controlado su velocidad y presión, ocasionando turbulencia. De este vertido se desprenden gases que terminan en sopladuras y picaduras superficiales en las piezas.

Respecto de las cajas de moldeo, las causas asociadas son:

- *Cajas de moldeo muy pequeñas*
Cuando la caja de moldeo es muy pequeña en relación con el sistema de alimentación de la pieza, el metal vaciado burbujea, causando picaduras en las piezas.

c. Inclusiones de escoria, sedimento o fundente

En 7 de 24 muestras se evidenció la presencia de inclusiones, las cuales pueden deberse a la presencia de partículas de escoria u óxido en el metal fundido, así como, al pobre apisonado durante la conformación del molde, causando el arrastre de los sedimentos cuando se efectúa la colada.

En la discusión que se muestra a continuación, se muestra a detalle las causas relacionadas con el sedimento. No se discuten las inclusiones de escoria y fundente debido a que estos defectos se originan en las malas prácticas del proceso de fusión y colada, que escapan de los objetivos de esta investigación.

En la Figura 109 se muestran las causas asociadas a este defecto.

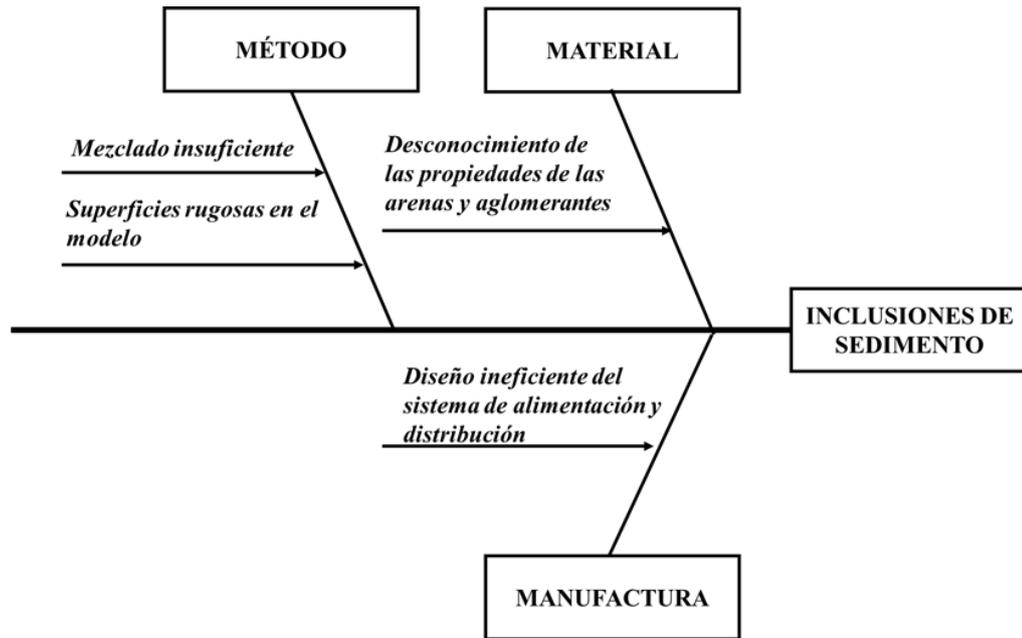


Figura 109. Diagrama de Ishikawa del defecto macroscópico conocido como: inclusiones de escoria, sedimento o fundente.

Fuente: Elaboración propia.

Las inclusiones de sedimentos consisten en partículas de arena que se han desprendido de la superficie de un molde que ha sido mal diseñado o en el cual se ha utilizado arena de calidad inferior.

Algunas causas relacionadas con el material, son:

- Control de humedad de la mezcla de moldeo
Es importante saber que la humedad en exceso o por debajo del porcentaje recomendado trae problemas de inclusión. Baja humedad garantiza desprendimiento e inclusiones de sedimentos, mientras que el exceso de humedad en el molde, genera que la efervescencia de los vapores y gases durante la colada, arrastren el sedimento, adhiriéndolo a la pieza solidificada.
- Uso inadecuado de aglomerantes
Los aglomerantes inorgánicos o arcillosos (bentonita) forman una masa muy plástica que copia excelentemente el modelo. El apisonado hace que el molde quede muy duro y sin permeabilidad causando erosiones y posteriormente, inclusiones. De la misma manera, si la cantidad de aglomerantes es muy poca, es posible que haya desprendimientos por la poca adhesión de las arenas.
- Reutilización de arenas
El aglutinante se oxida y la arena pierde plasticidad, así como, su facilidad para el apisonado. Como resultado, se obtienen arenas débiles que se dejan arrastrar por el metal, quedando incluidas en las piezas.

Respecto del método, se tiene:

- Superficies rugosas en el modelo
Cuando el modelo tiene superficies rugosas, o en su diseño no se ha considerado el ángulo de salida, puede causar fracturas en el molde y desprendimientos de arena, que se depositan en el fondo del molde, generando inclusiones de arena.
- Mezclado insuficiente
El mezclado durante un tiempo muy corto generará la aparición de terrones con mucha humedad y otros muy secos, unos con aglutinantes y otros, sin este. Las arenas que quedan faltas de agua y aglutinante son las más problemáticas por su baja resistencia. El metal la arrastra fácilmente y quedan como inclusiones en la pieza fundida

Respecto de manufactura, las causas se relacionan con:

- Diseño ineficiente de entradas, canales y bebederos
El diseño del modelo debe hacerse teniendo en cuenta su funcionalidad, facilidad para el trabajo de moldeo y desplazamiento del metal líquido. Un diseño ineficiente causa inclusiones de arena, cuando se colocan bebederos y canales en sitios donde el metal ataca superficies, ocasiona erosión en las paredes del molde y, por consiguiente, inclusiones.
- Aristas entre los canales de ataque y las piezas
Relacionado con la conicidad de los canales de ataque al molde. Si tienen filos o aristas, el fluido desmoronará la arena, dando lugar a las inclusiones.
- Altura de la mazarota
Colocar una mazarota de gran altura respecto de las dimensiones de la pieza que se va a fundir genera erosión en el molde, creando inclusiones.

Una fusión limpia puede obtenerse eligiendo correctamente los fundentes procurando la limpieza de escoria antes del vaciado; los moldes defectuosos, por otra parte, pueden evitarse con una mejor inspección y un buen control de la arena.

d. Contracción abierta o externa

En 6 de las 24 muestras aparece el defecto identificado como *contracción abierta o externa*. También conocida como *rechupe*, es una cavidad ocasionada por la contracción líquida. Generalmente muy irregular y de paredes rugosas tipo dendritas. Por lo general se halla interiormente, en los cambios de espesor de la pieza, o en el interior de las zonas masivas y a veces, forma depresión superficial de tamaño variable.

Su principal causa es el incorrecto dimensionamiento de los sistemas de alimentación del molde. Cuando la mazarota no tiene las dimensiones adecuadas (diámetro, altura), el rechupe se genera en la pieza y no en la mazarota.

A este defecto se asocian otras causas relacionadas con la fusión del metal, tales como:

- Contracción del metal fundido
Es una propiedad intrínseca del material. Cuanto menor sea la propia tendencia del metal a la contracción habrá menor riesgo de la formación de este defecto. La falta de material para compensar la contracción durante la solidificación es una causa asociada a la aparición de este defecto.
- Altas o muy bajas temperaturas de colada
La utilización de temperaturas elevadas de colada (aumenta la inestabilidad del molde por el intenso calor presente y se retarda el periodo de solidificación) o excesivamente bajas (rápida solidificación de entradas o cuellos, incluso en las mazarotas).

e. Picaduras en la superficie

En 5 de las 24 muestras, se han encontrado picaduras en la superficie. Las picaduras o poros en la superficie se generan por la falta de permeabilidad del molde, cuando el molde se ha compactado en exceso, los gases producidos durante la colada no pueden escapar, por lo que se producen picaduras o poros en la superficie de las piezas.

El Diagrama de Ishikawa o de Análisis de causa – efecto se muestra en la Figura 110.

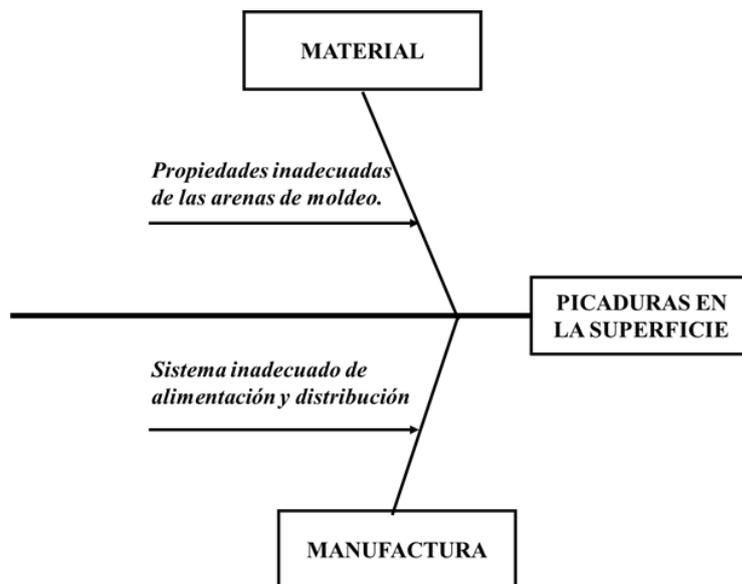


Figura 110. Diagrama de Ishikawa del defecto macroscópico conocido como: picaduras en la superficie.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto del material, el macrodefecto se origina por:

- Excesivo contenido de arcilla
El excesivo contenido de arcilla reduce la permeabilidad del molde, atrapando los gases que se producen durante la colada.
- Uso de finos
Cuando se necesitan piezas de acabados superficiales buenos es común utilizar finos en las arenas de moldeo usarlos en exceso hace al molde impermeable, debido

a la reducción de espacios entre granos de sílice. Los vapores y gases desprendidos en el momento de la colada, tienen gran dificultad de evacuación, lo que provoca ebullición del metal líquido y poros.

- Exceso de humedad
El metal fundido que se desplaza en el molde genera que el agua ebulle, generando poros en las piezas.

Respecto de la manufactura, el defecto tiene su génesis en:

- Sistema inadecuado de alimentación del molde
Los canales de ataque y su disposición en los moldes, así como, su dimensionamiento, influyen en la disminución de la permeabilidad de los mismos, debido a la turbulencia generada al vaciar el metal y los gases que se producen durante la colada, que inciden en la aparición de poros superficiales.

Otras posibles causas de asociadas a este defecto son: el contenido de oxígeno o hidrógeno excesivo en el baño metálico, alto contenido de elementos con fuerte afinidad por el oxígeno (generalmente Ti y Al) y temperatura excesiva de colada.

f. Contracción interna o tapada

En 4 de las 24 muestras se identifica el defecto: contracción interna o tapada.

Las contracciones internas o tapadas, se generan por la expulsión de los gases, como consecuencia de la mala desgasificación del metal. Otra causa relacionada es la entrada de aire en la colada y las reacciones gaseosas producto del metal que se está colando. Además, la expansión neta debido a la formación de grafito eutéctico. Esta expansión ocurre dentro de las capas de fundición solidificada que causa remoción del líquido desde la región central, creando un vacío. Este vacío no se llena cuando el líquido residual solidifica.

g. Salida

En 2 de las 24 muestras se identificó este defecto.

Los moldes mal sellados se separan durante el vaciado del metal por acción de la presión metalostática, la cual, comúnmente es contrarrestada con pesos colocados sobre el molde. Si no se hace el cálculo correspondiente y se coloca menos peso del necesario, el metal sale por la entrecara del molde, produciéndose este defecto.

En 1 de las 24 muestras se han identificado:

- Exudación interna o fosforosa
Aparece en las piezas como pequeñas cavidades de forma esférica cuya composición es similar a la del metal. En el caso del hierro, estas son más ricas en fósforo. Se originan por la elevada cantidad de elementos que forman escorias, las cuales pueden sufrir combustiones provocadas por las elevadas temperaturas del metal, originar gases durante el proceso de colada y dar lugar a sopladuras en las piezas ya sólidas. Las superficies interiores de este defecto son lisas, aunque en

ocasiones puede aparecer una formación redondeada en su interior originada como consecuencia de la excesiva concentración en el metal líquido.

- *Sopladuras de escoria*
Las causas más probables son: la reacción de oxidación dentro del líquido que crea óxidos en el líquido o sólido y forma gases (sopladuras) y la reacción del metal fundido y óxidos con el horno refractario, revestimiento de callanas o el molde.
- *Inclusiones intermetálicas*
Las posibles causas son: combinaciones intermetálicas formadas entre el hierro fundido, impurezas o material de carga que no se han disuelto completamente en la fusión; y durante la solidificación, se forman compuestos intermetálicos que segregan concentrando el líquido residual.
- *Costuras o costurón*
Este defecto se debe, principalmente, a la baja temperatura del metal fundido que se vierte en el molde, pues al estar demasiado viscoso o frío, una capa de óxido forma marcas o pliegues sobre la pieza.
Otra causa asociada es la excesiva adherencia de la pieza solidificada a las paredes del molde, relacionada con los moldes poco reforzados. Pequeñas porciones de arena se desprenden del molde adhiriéndose a las piezas.
- *Dartas*
Se generan por el alto contenido de finos (polvo), el ineficiente diseño de canales de alimentación y el exceso de humedad, así como, el uso de arenas magras (<8% de arcilla), apisonado muy débil, calidad ineficiente de arcilla y poca cantidad de plumbagina.
- *Revestimiento defectivo o mala reparación del molde*
También llamado remoldeo. Cuando se extrae el modelo, las paredes del molde pueden sufrir pequeños desperfectos. En algunos casos, se humedece un pincel para retocarlo pero no todas las zonas quedan en buenas condiciones produciéndose el desprendimiento de las paredes.
- *Hinchazón interna o externa*
La posible causa de este tipo de defecto es: la deformación del molde, rigidez insuficiente debido a la expansión de la fundición causada por formación del grafito durante el enfriamiento.
- *Fundición rota.*
La posible causa de este tipo de defecto es que los canales de colada o salidas de aire no son entallados en el cuello. Además, puede ser consecuencia del desmoldeo anticipado, mientras aún estaba demasiado caliente.

4.2. Fortalezas y debilidades de la práctica de moldeo en el norte del Perú

En base a la descripción realizada en el Capítulo 3 sobre moldeo, insumos y herramientas utilizadas por los talleres de fundición del norte del Perú, se ha preparado un análisis F.O.D.A., que se muestra en la Tabla 23.

A partir de éste, se analizan las fortalezas del sector en cuanto al proceso que se está analizando; remarcando la amplia experiencia con la que cuentan los fundidores del norte, quienes conocen la actividad y a los clientes que requieren de sus servicios, así como, a los proveedores que proporcionan sus materias primas e insumos.

Además, el bajo costo asociado a las arenas que emplean es una ventaja, pues aún con las limitaciones de su procedimiento, logran fundir piezas medianamente aceptables por los clientes.

La apertura de los talleres para mejorar la calidad de sus piezas, es también una fortaleza, pues permitirá que pongan de su parte para incorporar mejoras en el proceso.

Entre las debilidades, se encontró que, la industria carece de capacitación técnica sobre las características de las arenas y el diseño de los sistemas de alimentación de los moldes. Además, de la necesidad de capacitación sobre estándares de calidad con los que sus piezas deberían cumplir. Al analizar sus piezas, se encontró una alta incidencia de defectos relacionados con las malas prácticas durante el moldeo, por lo que es importante que mejoren sus técnicas.

En cuanto a las oportunidades, se consideran los recursos que tienen a la mano para mejorar sus procedimientos, como la literatura disponible (fórmulas de dosificación, manuales de la AFS), los softwares de diseño y los aditivos de mejores propiedades para dosificarlos y obtener una mezcla de moldeo apta para conformar el molde.

Entre las amenazas, por su parte, se contemplan la repercusión de la baja calidad de sus piezas en la continuidad de su empresa.

Las pérdidas de la empresa asociadas a la escasa calidad de las piezas que se obtienen ponen en riesgo la supervivencia de la empresa. Además, a estos factores se les suman otros relacionados con el manejo de la empresa, la gestión y la inversión en aditivos y equipos.

Tabla 23.Matriz F.O.D.A de la etapa de moldeo en el norte del Perú.

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Gran experiencia del personal que labora en los talleres de fundición • Conocimiento del mercado local. • Contacto con sus clientes • Bajo costo de las arenas de moldeo. • Predisposición para mejorar la calidad de sus piezas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Escasa aplicación de los conocimientos sobre preparación de arenas. • Desconocimiento de las características de las arenas de moldeo. • Demasiada reutilización de arenas en el proceso. • El proceso de moldeo, en general es manual al no contar con maquinaria ni dispositivos propios para la molienda-mezclado-prensado. • No existe diseño técnico de las cajas de moldeo. • Escasa capacitación en cuanto al diseño de sistema de alimentación, de distribución y efectos de la presión metalostática. • Mala distribución de las áreas del taller. Desorden de las áreas de trabajo.
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Existe literatura que indica cómo preparar y dosificar sus arenas de moldeo. • Existen softwares de modelamiento y simulación de los sistemas de alimentación y distribución. • Existen aditivos que permitan mejorar las propiedades de las arenas. 	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de macrodefectos en las piezas genera que el cliente devuelva las piezas y pérdida de clientes. • Pérdidas económicas para la empresa al fundir nuevamente la pieza devuelta por el cliente. • Importación de piezas a más bajo costo.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Problemas específicos encontrados

A partir de las debilidades y amenazas del sector se determinaron los problemas específicos de esta etapa, los cuales se relacionan con las malas prácticas que inciden en los defectos de las piezas de fundición gris obtenidas.

Los problemas encontrados se centran en la calidad de las arenas de moldeo y el diseño de los moldes donde se vierte el caldo, destacándose:

- Reutilización de arenas.
- Uso de arenas vírgenes, escogidas empíricamente.
- Proceso de moldeo manual.
- Preparación empírica de los sistemas de alimentación y distribución.
- Uso de cajas de moldeo de características no adecuadas (mal fabricadas).

4.3.1. En cuanto a la selección de arenas e insumos

En los talleres del norte del Perú, las arenas de moldeo que constituyen los moldes son vírgenes. Solo un taller de los diez, emplea bentonita como aglutinante para enriquecer las propiedades de la mezcla.

A partir de la inspección visual de las piezas, se puede determinar que los puntos críticos asociados con las arenas vírgenes, son:

- *Desconocimiento de las propiedades de las arenas empleadas*
Los fundidores desconocen con qué tipo de propiedades deben contar las arenas de moldeo, por lo que no las exigen a sus proveedores, lo que dificulta que se puede establecer una formulación con la que se obtengan piezas con la menor incidencia de defectos superficiales.
- *Falta de aditivos que beneficien las arenas vírgenes*
Los altos índices de defectos encontrados en las piezas del norte dejan entrever la necesidad de emplear aditivos o aglomerantes que mejoren las propiedades de la mezcla de moldeo para una mejor performance del molde.
- *Mapeo de canteras de arenas en el norte del Perú*
Hace falta un mapa de canteras de arenas de fundición en el que se resalten las propiedades de las arenas que pueden encontrarse en el norte del Perú. De esta manera el fundidor tendrá una guía para poder controlar las cantidades de insumos de moldeo que deben adicionarse.
- *Falta de registro de los insumos de moldeo*
Es sabido que no cuentan con un registro en el que se indique hace cuánto tiempo cambiaron las arenas, cuántas coladas se han hecho a partir del cambio, cuántas piezas fueron rechazadas por el cliente, qué tipo de arena presentó mejores características para conformar el molde, etc.

4.3.2. En cuanto a la preparación de arenas

Se encuentran dos puntos críticos: la dosificación de arenas y la excesiva reutilización de estas.

En el Capítulo 2 se discutió la importancia de la dosificación de insumos para tener una mezcla de moldeo óptima. A esto, se le suma la mezcla homogénea de cada uno de los componentes, necesaria para la posterior conformación de los moldes. La falta de homogeneidad en la mezcla genera inclusiones de sedimentos en las piezas, así como, desprendimientos del molde.

Por su parte, debido a la reutilización de arenas, es importante que el moldeador separe cuerpos de gran tamaño que puedan quedarse en las arenas (clavos, alambres, pequeñas partes de piezas fundidas anteriormente). De esta manera se evitan inclusiones de partes metálicas y otros cuerpos extraños en las piezas.

- Dosificación de las arenas

La dosificación de arenas hace referencia a la proporción de arena, sílice y agua que constituyen una mezcla de moldeo. En el norte, se desconoce cómo dosificar los insumos pues no cuentan con una referencia para hacerlo. El único insumo que controlan es el agua, pues por su experiencia saben que el exceso de agua en la mezcla genera poros en las piezas. En cambio, las cantidades de arena y arcilla no se calculan, se agregan de acuerdo a la experiencia del moldeador, sin contar con alguna referencia.

La falta de dosificación de insumos de moldeo repercute en la calidad superficial de las piezas, por ejemplo:

- Exceso de humedad. Emplear arenas con un porcentaje mayor al 8% puede causar poros y picaduras en la superficie de las piezas, pues, al momento de vaciar el metal fundido se generan gases y vapor de agua en el interior del molde, que originan tales defectos.
- Las arenas muy secas causan erosión. La arcilla, cuando no está suficientemente húmeda, constituye moldes débiles, por su falta de plasticidad, por lo que se desprende arena durante la colada.
- La baja o alta proporción de aglutinantes genera, también, defectos sobre las piezas. El exceso de aglutinante disminuye la resistencia en verde del molde, causando erosión.

Estas proporciones se establecen a partir de las características y propiedades de las arenas naturales o con el uso de arenas de sílice pura, recomendable para formulación de arenas. Si bien, la determinación de proporciones es completamente práctica, se tiene que probar y ensayar con distintas proporciones para definir la más adecuada. Estudios referentes a esta dosificación se han planteado y existen recetas base para poder establecer una dosificación adecuada, como las que se muestran en el Anexo B.5.

- Reutilización de arenas de moldeo: Se ha verificado la alta reutilización de arenas de moldeo. Esta práctica genera la pérdida paulatina de algunas propiedades de las arenas, pues, al estar en contacto directo con las altas temperaturas del metal fundido, se queman, perdiendo el carácter aglutinante de la arcilla (bentonita) que se haya puesto en la mezcla inicial, y, por ende, su plasticidad. Además, las arenas de moldeo que se reciclan, contienen una parte de plombagina que, aumenta la refractariedad y resistencia a altas temperaturas de la mezcla. En el norte, es habitual reponer las pérdidas propias de arenas durante el proceso. La falta de un registro que indique cómo han cambiado las propiedades en un período de tiempo (de acuerdo a la frecuencia de producción de su empresa) incide en la calidad de las piezas que se obtienen de moldes constituidos por estas arenas.

4.3.3. En cuanto al moldeo

El moldeo es completamente manual. Pese a la falta de conocimientos técnicos, los moldeadores saben cómo realizar su trabajo. Sin embargo, los defectos que se encuentran en las piezas tienen su origen en la falta de diseño técnico de las cajas de moldeo y el dimensionamiento incorrecto de los sistemas de alimentación y distribución incorporados en los moldes.

A continuación, se comentarán los puntos críticos que se presentan en el norte respecto al dimensionamiento de ambos parámetros:

a. Respecto de las cajas de moldeo

No hay un estándar de fabricación de cajas de moldeo de modo que se fabrican según la necesidad y de acuerdo al criterio del moldeador. Se debe procurar que su dimensionamiento y forma (cuadrada o circular) consideren que la disposición de los canales de distribución (número y ubicación de mazarotas) sea el adecuado para conseguir una correcta distribución del metal en el molde, que evite defectos en las piezas, tales como: rechupes que son oquedades dentro de la pieza fundida que disminuye su resistencia mecánica.

b. Respecto de los sistemas de alimentación y distribución

Los fundidores tienen escasos conocimientos del proceso de solidificación de los metales y menos conocimientos del cálculo de sistemas de distribución y alimentación. En estos talleres no se hacen cálculos para ubicar el sistema de alimentación y distribución, sino que se colocan de manera empírica. Este procedimiento es una desventaja para el fundidor, ya que dejar a la suerte la obtención de piezas sanas le puede costar perder al cliente. Se conocen métodos sencillos, como el propuesto por Chorinov, a partir de la relación entre el volumen y el área de la pieza, que pueden utilizar para aproximar el dimensionamiento y ubicación de mazarotas y alimentadores en los moldes, que no compliquen el proceso.

4.4. Identificación de propuestas de mejora

En base a lo discutido anteriormente y a los problemas encontrados respecto de la etapa de moldeo, se han planteado aspectos de mejora para disminuir la incidencia de defectos macroscópicos sobre las piezas. Éstos se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Puntos críticos y problemas prioritarios de la etapa de moldeo.

Problemas prioritarios	Punto crítico	Propuestas de mejora
Selección de arenas e insumos	Inadecuado manejo y control de las arenas e insumos de moldeo.	Identificar las canteras del norte del Perú para conocer las características de las arenas que de estas se extraen.
		Capacitar a los fundidores en la elaboración y uso de arenas de moldeo. Utilizar arenas beneficiadas o sintéticas (mezcla de arena silíceo y arcilla –bentonita y agua).
		Capacitar en ensayos de caracterización de arena básicos: Porcentaje de arcilla en arenas, índice de finura (IF) a la arena silíceo.
		Tener en cuenta las formulaciones propuestas para la preparación de la mezcla y cantidad de agua adecuada
Preparación de arenas de moldeo	Dosificación de insumos. Excesiva reutilización,	Contar con un registro de arenas, en el que se lleve un control de su uso.
		La arena reutilizada debe usarse sólo como relleno, previamente caracterizada y beneficiada
		Invertir en equipos para automatizar el procedimiento, como: una mezcladora automática, puentes grúa.
		Verificar las propiedades del molde de arena cuando está constituido. Por ejemplo: Medir la dureza del molde con ayuda de un durómetro superficial.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Puntos críticos y problemas prioritarios de la etapa de moldeo (continuación).

Problemas prioritarios	Punto crítico	Propuestas de mejora
Moldeo	Uso de cajas de moldeo de características no adecuadas	Emplear cajas de moldeo metálicas, cuadradas, rectangulares o circulares.
		Colocar ganchos de registro o bastidores para garantizar la sujeción del molde y el correcto posicionamiento del mismo.
	Las cajas se fabrican de acuerdo a criterio del moldeador, sin considerar los sistemas de alimentación.	Capacitación en técnicas para el diseño de sistemas de alimentación (mazarotas) y distribución (bebedero, respiradero y canales de colada, canales de ataque, etc.), así como en el uso del método de Chorinov para calcular dichos sistemas.
		Se recomienda el uso de modelos de madera para elaborar el canal de colada y mazarota, que considere un ángulo de salida para evitar arrastre de arena al retirarlo del molde.
	Emplear softwares de modelación en 3D de fundición, como: MAGMA, 3D CAST, etc.	

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las arenas de moldeo que se emplean en estos procesos, se plantea que se caractericen las arenas de las canteras de las que se extraen. A partir de ello, se pueden hacer ajustes en las proporciones de las mezclas de moldeo y, con ello, obtener menor incidencia de defectos sobre las piezas.

Se plantea, además, una capacitación sobre ensayos de caracterización de arenas. Para tener datos *in situ* de las propiedades de las arenas obtenidas de las canteras del norte se pueden desarrollar los ensayos que se mencionan a continuación:

- Ensayo de tamizado

El índice de finura indica el grosor de las partículas de arena. Los valores van de acuerdo al espaciado de las mallas en los tamices que se observan en la Tabla 25. Se pretende tener que los granos de arena tengan el tamaño necesario para el moldeo y esto no afecte a la pieza. Los índices de finura recomendados para cada aleación se pueden observar en la Tabla 26.

Tabla 25. Equivalencia entre los tamices y las aberturas de las mallas.

TAMIZ					
N°	mm	in	N°	mm	in
4	4.8	0.250	40	0.420	0.025
8	3.2	0.125	50	0.297	0.020
10	2	0.100	80	0.177	0.013
16	1.19	0.063	100	0.149	0.010
20	0.841	0.050	120	0.125	0.008
30	0.595	0.033	200	0.074	0.0

Fuente: Materiales de Construcción, Universidad José Cecilio del Valle.

Tabla 26. Índice de finura de arenas para ciertas aleaciones

Tipo de aleación	Índice de finura (IF)
Aluminio	225 – 160
Latón – Bronce	150 – 140
Cobre – Níquel	130 – 120
Fundición gris	200 – 180
Fundición gris para piezas complejas	120 – 87
Fundición gris para piezas medianas (tierra natural)	86 – 70
Fundición gris para piezas medianas (tierra sintética)	75 – 55
Fundición gris para piezas pesadas (en verde y seco)	61 – 50
Fundición maleable para piezas ligeras	120 – 92
Fundición maleable para piezas pesadas	85 – 70
Acero para piezas ligeras (tierra en verde)	56 – 45

Fuente: Secciani e Villani. 1996

- *Ensayo de hinchamiento de arcilla*

El nivel de hinchamiento de la arcilla se puede medir de manera empírica. En una probeta graduada, se colocan 100ml de agua y se coloca lo equivalente en gr lo equivalente a 2ml de arcilla. Se deja durante una hora y si la arcilla logra hinchar hasta 20 ml, se puede decir que es ideal para el moldeo.

Entre otras propuestas se puede considerar:

- Verificar que la arena provenga desde la cantera identificada.
- En caso se desee un mejor estudio sobre las arenas se puede contratar el servicio a un tercero, un laboratorio especializado en caracterización de arenas.
- Adquirir unidades con capacidad necesaria para el traslado de arenas a los talleres o almacenes.

En cuanto al registro y almacenamiento de arenas, se propone:

- Ordenar el patio del taller de fundición, delimitando espacios distintos para almacenar la tierra de moldeo, tierra usada y residuos. En el Anexo B2 se indica, a mayor detalle, cómo almacenar arenas.
- Adoptar prácticas de orden y limpieza en los lugares de almacenamiento de la tierra de moldeo.
- Registrar y controlar el uso y consumo de materias primas midiendo las cantidades de arcilla, arena, agua y otros elementos que se agregan a la tierra de moldeo.
- Para el almacenamiento de arenas debe tenerse en cuenta:
 - El almacenaje de arenas debe ser en un lugar seco y techado. Evitar el contacto con una zona húmeda ya que afecta las propiedades de las arenas. El recinto debe estar correctamente techado, comprobando que no existan filtraciones en caso de lluvias. La ventilación debe ser controlada ya que puede generar que la arena se disperse.
 - Las arenas de diferente procedencia deben almacenarse en lugares diferentes, al igual que las arenas vírgenes y las ya trabajadas. Las dosificaciones de elementos adicionales para ser trabajadas, también deben ser almacenadas de manera separada.
- Para el registro de arenas debe tenerse en cuenta el recuadro que se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27.Registro de compuestos para la mezcla de arenas.

Mezcla	Elementos de arenas (kg)				
	Arena nueva	Arena usada	Arcilla	Agua	Otros

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 28 que se muestra a continuación se debe llenar con la formulación de arena utilizada, el material que se ha fundido y el resultado de la pieza final.

Tabla 28.Registro de prueba y error para las mezclas elaboradas.

Mezcla	Elementos de arenas (kg)					Pieza	
	Arena nueva	Arena usada	Arcilla	Agua	Otros	Material	Defecto

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la preparación de las arenas, es importante que se tenga en cuenta:

- Tamizar la tierra de moldeo para separar grumos, raíces, piedras, clavos y otros elementos indeseables que afectan la calidad de la mezcla y el producto final.
- Introducir el uso de mezcladoras automáticas para mejorar el proceso de mezclado.
- Planificar el mantenimiento preventivo y oportuno a las diferentes herramientas y equipos utilizados, limpiar los residuos una vez terminada la operación de mezclado.
- Capacitar permanentemente al personal sobre las condiciones del proceso.
- Usar equipos de protección personal para la manipulación de la tierra de moldeo.

Sistemas de alimentación y distribución:

- Diseñar y fabricar cajas de moldeo de formas regulares: cuadradas, circulares o rectangulares. Las dimensiones deben ser apropiadas para el tipo de pieza a fundir.
- Revisar las cajas, limpiarlas, revisar tornillos para su ajuste y las guías de centrado.
- Limpiar totalmente las cajas retirando residuos de tierra pegada
- Elaborar un cálculo de mazarotas y bebederos para un mejor y eficiente sistema para la pieza. En el Anexo B.6 se muestra un ejemplo de cálculo de estos elementos.
- Proteger las cajas de moldeo de madera de los rayos solares y de la lluvia. Usar un revestimiento de tipo laca.
- Tratar, en lo posible, de usar cajas metálicas.

4.5. Caracterización de las canteras de arena del norte del Perú

Después de analizar cada uno de los aspectos críticos de la etapa de moldeo y su repercusión en la calidad de las piezas obtenidas, es decir, su influencia en la mayor o menor presencia de defectos; se realizó la caracterización de las muestras de arena de canteras del norte del Perú, con la finalidad de proporcionarles una referencia con la que puedan dosificar sus arenas e insumos de moldeo.

a. Muestras de arena de canteras del norte.

Para verificar la calidad de las arenas empleadas en la conformación de los moldes, se recolectaron 8 muestras de arena virgen de las principales canteras del norte, las mismas que fueron localizadas con ayuda de los fundidores, quienes tenían referencias de sus ubicaciones. En la Tabla 29 se muestra una relación de canteras y el número de muestras obtenidas de cada una de ellas.

Tabla 29. Ubicación de canteras y codificación de muestras obtenidas.

DEPARTAMENTO	PROVINCIA	UBICACIÓN	N° DE MUESTRAS
Piura	Sullana	Cerro Nariz del Diablo	1
		Costado del cementerio	1
	Castilla	Castilla	2
Lambayeque	Reque	Zona 1	1
		Zona 2	1
	Chiclayo	Identificada por el proveedor	1
La Libertad	Trujillo	Moche	1
TOTAL		7	8

Fuente: Elaboración propia.

Del departamento de Piura se obtuvieron 4 muestras: 2 muestras de canteras de Sullana y dos muestras de Castilla.

En el caso de la cantera ubicada en Castilla, no se precisa la ubicación exacta de las canteras de dónde se obtienen. En cambio, los fundidores de Sullana indicaron que obtienen sus arenas de las canteras identificadas como: Nariz del Diablo y Costado del cementerio.

De Lambayeque, se obtuvieron 3 muestras. Dos de ellas, de una cantera señalada por personal del taller 5. Las muestras se codificaron como: Reque 1N y Reque 2N. La tercera muestra se obtuvo del taller 4, quien compra la arena de un proveedor, por ello la muestra se denominó como “Identificada por el proveedor”.

En La Libertad, Trujillo, se identificó una cantera, ubicada en Moche.

Las muestras se colocaron en bolsas cerradas herméticamente para poder conservar su humedad y propiedades. El procedimiento se describe a detalle en el Apéndice D.1: *Muestras recolectadas de las canteras del norte del Perú.*

Todas las muestras que se presentan en la Tabla 29 son arenas vírgenes, provenientes de las canteras de: Piura, Lambayeque y La Libertad.

b. Metodología experimental

Para determinar las características de las muestras (humedad, porcentaje de arcilla y sílice e índice de finura) de arena se llevaron a cabo, en la Universidad de Piura, 3 ensayos que se describen en el Apéndice D.2: *Ensayos para determinar las características de las arenas naturales del norte del Perú*.

Por otro lado, para determinar las propiedades de las muestras de arena (permeabilidad, resistencia a la compresión, resistencia al corte) se fabricó un marinete (Ver Apéndice D.3: *Descripción del marinete*) y un permeámetro.

Para este tipo de ensayos se necesitan probetas estándar, es decir, de 2 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura. Después de diferentes pruebas se encontró que para conformar una probeta estándar de estas dimensiones eran necesarios 190 gr de arena y 16 gr de agua (8.42% de su peso)³⁰.

En el Apéndice D.4: *Ensayos para determinar las propiedades de las arenas naturales del norte del Perú*, se muestra la descripción a detalle de cada uno de los ensayos.

c. Resultados

Para la realización de esta tesis se han caracterizado 8 muestras de arena de 7 canteras, con el fin de conocer cuán aptas son el moldeo de aleaciones férreas.

En la Tabla 30 se muestra el resumen de las características y propiedades de las muestras de arenas de las canteras más representativas del norte. Es preciso comentar que a algunas muestras no pudieron determinárseles ciertos ensayos porque no había suficiente muestra para conformar una probeta. Por esta razón no se tienen valores de los mismos. Estos análisis fueron desarrollados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad de Piura.

Además, se muestran resaltados los valores de las propiedades de dos muestras de arenas enviadas para ser analizadas en el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Estas muestras fueron extraídas de dos canteras de Sullana: Nariz del Diablo y Costado del Cementerio. Solo se llevaron a cabo dos ensayos: permeabilidad y resistencia a la compresión en verde. En el Anexo D.5: Resultados de los análisis de muestras de canteras de Sullana obtenidos en la UNAL, se muestra la hoja de resultados proporcionada por el Laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Nacional de Colombia.

³⁰ Previamente, fue necesario tamizar la arena de moldeo empleando los tamices N°4, N°8 y N°16 con la finalidad de obtener una arena de granulometría apropiada.

Tabla 30. Resultados de los ensayos practicados a las arenas de fundición del norte del Perú.

Cantera	Humedad (%)	Arcilla (%)	Sílice (%)	IF	Resistencia a la Compresión (kPa)			Permeabilidad		
				(NTP 339-128-1999)	UDEP		UNAL	UDEP		UNAL
					verde	seco	verde	verde	seco	verde
Nariz del Diablo	6.2	42.57	57.43	53.78	75.3	52.3	100	25.86	36.11	4.35
Costado del Cementerio	0.15	30.42	69.58	77.8	72.7	58.6	80	28.09	128.37	22.78
Castilla 1	7.3	30.5	69.5	-	ND	ND	-	-	-	-
Castilla 2	6.187	11.59	88.41	80.97	75	1.4	-	-	-	-
Reque (FR1N)	0.22	2.2	97.8	84.5	70.4	2.2	-	31.02	53.33	-
Reque (FR2N)	0.16	3.07	96.93	80.1	123	15.7	-	22.73	23.276	-
Taller (Proveedor)	0.28	13.2	86.8	73.54	144.4	52.7	-	19.28	69.23	-
Moche	10.05	51.26	48.74	75.95	116.3	77.5	-	32.46	53.06	-

Fuente: Elaboración propia.

d. Discusión de resultados

Para la discusión de resultados se han considerado las características y propiedades de arenas de fundición que se muestran en el “Libro Blanco para la minimización de residuos y emisiones: Arenas de moldeo en fundiciones férreas”, publicado por el Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio ambiente del Gobierno Vasco, en el año 2008. La Tabla 31 es resultado de múltiples ensayos de muestras de 5 fundiciones vascas en las que se llevó a cabo el proyecto de reducción de emisiones generadas por el sector fundición.

A partir de esta tabla se compararán las propiedades de las muestras de las canteras del norte con las propiedades determinadas en el estudio que se describe anteriormente.

Es preciso comentar que la discusión de resultados de cada una de las propiedades de las arenas, contrastadas con la Tabla 31 permitirán que el moldeador conozca qué debe agregarle a su mezcla de moldeo para hacerla apta para la obtención de piezas sanas.

Tabla 31. Propiedades de las arenas de fundición.

ALEACIÓN	Humedad	Permeabilidad	Compresión en verde (kPa)	Arcilla (%)	IF
Aluminio	6 a 8.5	7 a 13	39 a 50	10 a 16	220 – 160
Bronce y latón	6 a 8	13 a 20	44 a 54	11 a 13	150 – 140
Cupro – níquel	6 a 7.5	37 a 50	39 a 54	11 a 13	130 – 120
HIERRO FUNDIDO					
Piezas ligeras planas	6.5 a 8.5	10 a 15	36 a 49	10 a 12	200 a 180
Moldes muy prensados	6 a 7.5	18 a 25	39 a 49	11 a 13	120 a 90
Piezas de tamaño medio (arena ordinaria)	5.5 a 7	40 a 60	49 a 54	14 a 14	90 a 70
Piezas de tamaño medio (arena sintética)	4 a 5	50 a 80	49 a 59	5 a 10	75 a 55
Piezas grandes (arena seca o verde)	4 a 6.5	80 a 120	34 a 49	8 a 14	60 a 50
HIERRO MALEABLE					
Piezas ligeras	6 a 8	20 a 30	39 a 49	8 a 14	120 a 90
Piezas grandes	5.5 a 7.5	40 a 60	39 a 49	8 a 14	85 a 70
ACERO					
Piezas ligeras en arena verde	2 a 4	125 a 200	39 a 49	3 a 10	60 a 50
Piezas grandes en arena verde	2 a 4	125 a 253	39 a 49	5 a 10	60 a 50
Arena seca	1 a 5	100 a 200	39 a 49	7 a 12	60 a 40

Fuente: Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones – Arenas de moldeo en fundiciones férreas. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio ambiente. España, 2008.

i. Porcentaje de humedad:

El porcentaje de humedad de las tierras de moldeo influye directamente en sus propiedades, en la estabilidad de los moldes y los defectos que puedan aparecer en las piezas moldeadas.

Se puede decir que, 4 de las 8 muestras de arena, presentan un porcentaje de humedad muy por debajo del contenido de humedad requerido, lo que ocasiona que los moldes no se puedan conformar de manera adecuada, por la baja cohesividad de las arenas.

Tres de las ocho muestras, se encuentran en el rango permitido de humedad, es decir entre 4 y 8.5% para fundiciones grises (Ver Tabla 32); mientras que una de las ocho, excede el contenido de humedad permitido. Las muestras que exceden el rango aceptable se caracterizan por tener poca permeabilidad, lo que ocasiona la producción excesiva de gases de colada que puede ser peligroso; así como un mal acabado superficial.

Las arenas de las canteras del departamento de Piura son las más adecuadas para el proceso de moldeo. Estas arenas vírgenes, ordinarias o naturales son aptas también, para fundir aluminio, bronce, hierro fundido y hierro maleable. En cambio, las de las demás canteras, no son aptas para ningún tipo de fundición.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados de la Tabla 32 , se puede decir que:

- El porcentaje de humedad de la muestra Nariz del Diablo, es apta para fundir piezas ligeras y grandes de acero en arena verde (2- 4% de humedad). Así como piezas de tamaño medio de hierro fundido en arena sintética (4 – 5% de humedad) y piezas grandes de hierro fundido en arena verde o seca. Sin embargo, no es apta para fundir aluminio, bronce, latón cupro – níquel o hierro maleable.
- El porcentaje de humedad de la muestra Costado del Cementerio, indica que solo es apta para fundir piezas de acero en arena seca.

El ensayo de porcentaje de humedad permite determinar cuánta agua debe agregársele a la mezcla de moldeo para obtener piezas libres de defectos como costras o darts.

Tabla 32. Contenido de humedad de las muestras de arenas.

Cantera	Humedad (%)	Tipo de fundición para la cual es apta						
		ALEACIÓN Humedad	Aluminio 6 a 8.5	Bronce y latón 6 a 8	Cupro níquel 6 a 7.5	Hierro fundido 4 a 8.5	Hierro maleable 5.5 a 8	Acero 1 a 5
Reque 1	0.22	Según el contenido de humedad, no son aptas para ningún tipo de fundición.						
Reque 2	0.16							
Proveedor	0.28							
Costado del Cementerio	0.15	Según el contenido de humedad, no son aptas para ningún tipo de fundición.						
Nariz del Diablo	6.2	Hierro fundido: Piezas ligeras planas, moldes muy prensados, piezas de tamaño medio (arena ordinaria), piezas grandes (arena seca o verde).						
		Aluminio						
		Bronce, latón, cupro – níquel.						
		Hierro maleable: Piezas ligeras, piezas grandes.						
Castilla 1	7.3	Hierro fundido: piezas ligeras planas, moldes muy prensados.						
		Aluminio, bronce y latón, cupro – níquel.						
		Hierro maleable: Piezas ligeras, piezas grandes.						
Castilla 2	6.187	Hierro fundido: Moldes muy prensados, piezas de tamaño medio (arena ordinaria), piezas grandes (arena verde o seca).						
		Aluminio, bronce y latón, cupro – níquel.						
Moche	10.05	Exceso de humedad.						

(*) Los resultados de estas muestras fueron obtenidas en el Laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia. El ensayo de humedad se realizó con las muestras en el estado en el que llegaron, por lo que los datos no son del todo fiables.

Fuente: Elaboración propia.

ii. Contenido de arcilla y sílice:

El contenido de arcilla y sílice está asociado, principalmente, con la refractariedad y permeabilidad que ofrecen las arenas de fundición. Es así que, bajos contenidos de arcilla, o altos contenidos de sílice, indican baja cohesión y plasticidad.

Tomando como referencia los valores de la Tabla 31, se tiene que altos contenidos de arcilla disminuyen la permeabilidad del molde.

Por su parte, valores de porcentaje de arcilla que pertenecen al rango indicado por la Tabla 31, indican adecuada cohesión y plasticidad de la arena. Facilita el proceso de conformación del molde.

Sólo 2 de las 8 muestras analizadas cumplen con el rango de contenido de arcilla y polvo recomendado. (Ver Tabla 33).

Tabla 33. Contenido de arcilla de las muestras de arena.

Cantera	Arcilla (%)	Tipo de fundición para la cual es apta						
		ALEACIÓN	Aluminio	Bronce y latón	Cupro níquel	Hierro fundido	Hierro maleable	Acero
		Arcilla (%)	10 a 16	11 a 13	11 a 13	5 a 14	8 a 14	3 a 12
Reque 1	2.2	Escaso contenido de arcilla.						
Reque 2	3.07	Acero: Piezas ligeras en arena verde.						
Proveedor	13.2	Hierro fundido: Moldes muy prensados, piezas grandes (arena seca o verde).						
		Hierro maleable: piezas ligeras, piezas grandes.						
Castilla 2	11.59	Aluminio, bronce y latón, cupro – níquel.						
		Hierro fundido: piezas ligeras planas, moldes muy prensados, piezas grandes (arena verde o seca).						
Nariz del Diablo	42.47							
Costado del Cementerio	30.42	Excesivo contenido de arcilla						
Castilla 1	30.5							
Moche	51.26							

Fuente: Elaboración propia.

iii. Índice de finura:

El índice de finura representa el tamaño medio de una partícula de arena silícea. Este tamaño influye en la permeabilidad de una tierra de moldeo. En efecto, cuanto mayor es el tamaño de grano, mayor permeabilidad se espera obtener manteniendo constante las otras propiedades.

Las arenas con índice de finura con denominación “de grano fino”, ofrecen acabados superficiales tersos en sistemas de moldeo en verde para todos los metales con excelente desempeño en resistencia.

Por otro lado, las arenas de grano medio son excelentes para la mayoría de los sistemas de moldeo en verde en fundiciones de acero y hierro, ofreciendo buena permeabilidad y resistencia. De las 8 muestras presentadas, 1 de las ellas (Castilla 2) tiene grano medio y los 7 restantes, grano fino.

Tabla 34. Índice de finura de las muestras.

Cantera	IF (NTP 339- 128- 1999)	Tipo de fundición para la cual es apta						
		ALEACIÓN IF	Aluminio	Bronce y latón	Cupro níquel	Hierro fundido	Hierro maleable	Acero
			220 – 160	150 – 140	130 – 120	200 - 60	120 - 70	60 - 40
Reque 1	84.5	Hierro fundido: piezas de tamaño de tamaño medio (arena ordinaria).						
Reque 2	80.10	Hierro fundido: piezas de tamaño de tamaño medio (arena ordinaria).						
Taller (proveedor)	73.54	Hierro fundido: piezas de tamaño de tamaño medio (arena ordinaria, sintética).						
		Hierro fundido: piezas grandes (arena seca o verde).						
Castilla 2	53.78	Acero: Piezas ligeras en arena verde, piezas grandes en arena verde y arena seca.						
Nariz del Diablo	77.8	Hierro fundido: Piezas de tamaño medio (arena ordinaria).						
		Hierro maleable: piezas grandes.						
Costado del Cementerio	87.43	Hierro fundido: Piezas de tamaño (arena ordinaria).						
		Hierro fundido: piezas de tamaño medio (arena ordinaria).						
Castilla 1	80.97	Hierro maleable: piezas grandes.						
		Hierro fundido: piezas de tamaño medio (arena ordinaria).						
Moche	75.95	Hierro maleable: Piezas grandes.						

Fuente: Elaboración propia

iv. Forma de grano:

Como se ha mencionado en el Capítulo 2, de acuerdo a la norma AFS se conocen 4 tipos de formas de grano: angulares, sub – angulares, redondeados y compuestos. Cada uno de estos tiene repercusión en las propiedades del molde durante su conformación. Por ejemplo, la arena con granos finos y redondos se puede prensar más y forma una superficie lisa en el molde. Aunque la arena de grano fino aumenta la resistencia del molde, los granos finos pueden también reducir su permeabilidad, lo que dificulta la fácil salida de gases y vapores que se presentan durante la fundición³¹

Arenas con granos sub angulares o angulares son mejores para el moldeo, puesto que hacen mejores superficies en la cavidad del molde al poder apisonarse más intensamente, con el resultado de haber menos costra y puntos incisivos.

Por lo general, los granos angulares y uniformes corresponden a un modelo ideal. Se comprimen unos con otros con menor fuerza teniendo mayor permeabilidad.

Los granos sub – angulares, por su parte, ofrecen mejor compactación, homogeneidad, menor permeabilidad, cohesión y aptitud al moldeo intermedia entre grano angular y redondeado.

Los granos redondeados se presentan dejando mayor esparcimiento entre sí. Son ideales para los machos.

³¹ Kalpakjian, S. Schmid, R. “Manufactura, ingeniería y tecnología”. IV Edición. 2002. Pág. 264.

En cuanto a las muestras, la forma de los granos es variable. En concreto, las 8 muestras presentan granos compuestos (entre angulosos y redondeados) y en su mayoría son amorfos y tienen bastantes partículas de cuarzo cristalino.

Hay algunas muestras más heterogéneas que otras. Entre las muestras menos variables, destacan: Reque FR1N, Reque FR2N, Nariz del Diablo, Castilla 2.

En la Tabla 35 se puede encontrar la forma de grano que caracteriza a cada una de las muestras.

Tabla 35. Forma de grano de las muestras.

Departamento	Taller de fundición	Discusión del resultado según la norma AFS.
Lambayeque	Reque 1	Angulares. Granos uniformes
	Reque 2	Angulares. Granos uniformes
	Fundinorte	Sub angulares
Piura	Nariz del Diablo	Angulares. Granos uniformes
	Costado del cementerio	Subangulares
	El Porvenir	Redondeados. Granos uniformes
	Castilla 1	Subangulares
	Castilla 2	Angulares. Granos uniformes
La Libertad	Moche	Redondeados. Granos uniformes
	Chepén	Compuestos
	La Esperanza	

Fuente: Elaboración propia.

v. Permeabilidad.

La permeabilidad se relaciona con la facilidad que ofrecen las arenas para dejar evacuar el aire y los gases que se desprendan al realizar la colada. Los factores que influyen en esta, son: la granulometría, forma de granos, contenido de arcilla, intensidad de apisonado y el contenido de humedad.

A menor grado de permeabilidad se tendrá una menor salida de los gases a través del molde y se provocará una ebullición del metal líquido y la consiguiente formación de sopladuras de la pieza.

La permeabilidad queda establecida en función del volumen de los huecos existentes en una compactación de arena. En consecuencia, depende de la forma, tamaño y distribución de los granos, y es siempre mayor en una arena de granos gruesos que en una de granos finos. Una arena de granos muy uniformes (arena distribuida en un número limitado de planos adyacentes) es más permeable que otra con igual índice de finura que tenga los granos de tamaños menos uniformes.

Las superficies rugosas son propias de granos de tamaño uniforme, que presentan vacíos muy grandes, por lo que se obtienen valores de permeabilidad muy altos.

Cuando se emplean granos mezclados, los granos pequeños ocupan los vacíos existentes entre los granos más grandes y obturan las salidas de aire, disminuyendo la permeabilidad.

De la Tabla 36, se puede ver que todas las muestras son aptas para fundir hierro gris laminar.

De acuerdo a la AFS, permeabilidades muy altas son indicativos de una arena muy gruesa, que permite el libre paso de los gases de fusión, pero que también queda desprotegida ante la acción del metal sobre la arena, esto desencadena el principio de penetración, este tipo de arena es muy fácil de humectar y demanda cantidades bajas de humedad.

Permeabilidades muy bajas generan una mejor superficie de pieza, pero desfavorecen la salida de gases de fusión generando problemas de soplado, este tipo de arena es muy difícil de humectar porque demanda una mayor cantidad de agua.

Los valores obtenidos en los ensayos, a excepción hecha de la muestra de Nariz del Diablo – UNAL, cumplen con los valores de permeabilidad en verde. En seco, en cambio, solo la muestra de Nariz del Diablo es apta para fundir acero, las demás muestras no son aptas para fundir aleación alguna, debido al exceso de arcilla que presentan.

La diferencia entre los valores medidos en el Laboratorio de UDEP y de la UNAL se debe a que las muestras se escogieron aleatoriamente de zonas diferentes.

vi. Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión en verde define la capacidad de la arena para conformar un molde, es la base para el desarrollo de la resistencia en caliente, que finalmente es la que soporta la solidificación de la pieza vaciada.

Los factores que influyen en esta propiedad son la humedad y el contenido de arcilla en la mezcla. A mayores contenidos de humedad, la resistencia en verde tiende a disminuir; mientras que, a mayor porcentaje de arcilla, la resistencia se incrementa.

De acuerdo a lo que se puede ver en la Tabla 37 se infiere que ninguna de las muestras tiene un porcentaje de resistencia a la compresión adecuado para conformar los moldes.

La resistencia a la compresión se relaciona con el apisonado y la intensidad con la que se aplica para la conformación de un molde. Valores mayores a los recomendados son propulsores de defectos, puesto que, las tensiones de compresión aparecen para neutralizar la expansión térmica del metal al solidificar en la cavidad del molde, ocasionando penetraciones por explosión del molde³².

³² Según la AFS, una de las principales razones reportados en este campo es la alta dureza de molde combinado con una baja humedad. en el momento que la cavidad de la pieza es llenada con metal fundido, una explosión ocurre y desarrolla un shock térmico. este tipo de penetraciones generalmente fácil de remover porque el metal no penetra profundamente. la explosión puede ocurrir después del ciclo de vaciado.

Tabla 36. Permeabilidad de las muestras de arena.

Dpto.	Cantera	Permeabilidad		Tipo de fundición para la cual es apta						
		Verde	Seco	ALEACIÓN	Aluminio	Bronce y latón	Cupro – níquel	Hierro fundido	Hierro maleable	ACERO
				Permeabilidad (verde)	7 a 13	13 a 20	37 a 50	10 a 80	20 a 60	125 a 253
				Permeabilidad (seco)	-	-	-	80 a 120	-	100 a 200
Lambayeque	Reque 1	31.02	53.33	- <i>En verde:</i> cupro – níquel, hierro fundido, hierro maleable - <i>En seco:</i> Ningún tipo de fundición						
	Reque 2	22.73	23.276	- <i>En verde:</i> hierro fundido y maleable. - <i>En seco:</i> Ningún tipo de fundición						
	Proveedor	19.28	69.23	- <i>En verde:</i> Hierro fundido: Piezas grandes (arena seca o verde) - <i>En seco:</i> Ningún tipo de fundición						
Piura	Nariz del Diablo	25.86	4.35	36.11	- <i>En verde:</i> Hierro fundido: Piezas de tamaño medio (arena ordinaria), piezas de tamaño medio (arena sintética). Hierro maleable: piezas grandes. - <i>En seco:</i> Ningún tipo de aleación.					Por debajo de lo requerido
	Costado del Cementerio	28.09	22.78	128.37	- <i>En verde:</i> Hierro fundido: Piezas grandes (arena seca o verde) y hierro maleable. Acero: piezas en arena seca - <i>En seco:</i> Acero: piezas en arena seca.			- <i>En verde:</i> Bronce y latón Fundición gris: moldes muy prensados. Fundición maleable: piezas ligeras		
	Castilla 1	-	-							
	Castilla 2	-	-							
La Libertad	Moche	32.46	53.06	- <i>En verde:</i> Hierro fundido: Piezas grandes (arena seca o verde), hierro maleable. - <i>En seco:</i> Ningún tipo de fundición.						

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Resistencia a la compresión en verde de las muestras.

CANTERA	Resistencia a la compresión (kPa)	Tipo de fundición para la cual es apta						
		ALEACIÓN	Aluminio	Bronce y latón	Cupro níquel	H. Fundido	H. Maleable	Acero
		σ_{cv} (kPa)	39 a 50	44 a 54	39 a 54	36 a 59	39 a 49	39 a 49
Reque 1	70.4							
Reque 2	123							
Proveedor	144.4							
Nariz del Diablo	75.3	100						
Costado del cementerio	72.7	80						
Castilla 1	N.D.(*)							
Castilla 2	70.4							
Moche	116.3							

No es apta para fundir ningún tipo de aleación

(*) No se puede hacer por las características de la tierra (en gran proporción es sílice)

Fuente: Elaboración propia.

En el norte, para conformar los moldes se emplean arenas de fundición naturales, por lo que, los ensayos realizados permiten comprobar que necesitan de insumos para garantizar su aptitud en el moldeo y, por ende, menor incidencia de defectos. Precisamente, después de realizar los ensayos correspondientes, se concluyó que ninguna muestra cumple con un mínimo de propiedades para fundir cualquier tipo de aleación férrea (aluminio, bronce, cobre, hierro gris laminar, hierro gris maleable), pues sus propiedades no guardan concordancia.

Tabla 38. Resumen de los resultados de las características y propiedades de las arenas empleadas en el norte del Perú.

Ensayos	Humedad (%)	Arcilla (%)	IF	σ_{cv}	Permeabilidad
Canteras					
Nariz del Diablo		Excede		Excede	
Costado del Cementerio	Escasez	Excede		Excede	
Castilla 1		Excede		Excede	
Castilla 2				Excede	
Reque 1	Escasez	Escasez		Excede	
Reque 2	Escasez	Escasez		Excede	
Taller (proveedor)	Escasez			Excede	
Moche	Excede	Excede		Excede	

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 38 se muestra un consolidado de los ensayos realizados respecto de la aptitud de las arenas para fundir hierro gris en moldeo en verde. Se puede destacar que todas las muestras cumplen con la permeabilidad y el índice de finura. Estas propiedades guardan relación entre sí, puesto que, como se mencionó anteriormente, la permeabilidad está determinada por el índice de finura AFS y la distribución de los granos de arena.

A partir de los resultados obtenidos, se plantean algunas sugerencias para cada tipo de arena analizada, con el fin de que estén aptas para colar fundición gris laminar. Estas sugerencias se plantean a continuación:

- **Nariz del Diablo**
Para conseguir su aptitud, se debe aumentar la humedad y adicionar arena silíceas con IF entre 50 – 100. De esta manera se evita que haya exceso de humedad en el molde, se activa el poder ligante de toda la arcilla y, por ende, se disminuye la resistencia a la compresión.
- **Costado del cementerio**
Se debe agregar mayor cantidad de agua sobre la mezcla de moldeo, controlando la proporción de agua añadida, de tal manera que se disminuya la resistencia a la compresión y se active el poder ligante de la arcilla que está presente en la tierra de moldeo natural.
- **Castilla 1**
Al igual que la muestra de Nariz del Diablo, se debe aumentar la humedad, añadiendo arena silíceas para evitar que se exceda la humedad en el molde.
- **Castilla 2**
Aumento de humedad, agregando arena silíceas con IF entre 50 – 100, proporcionalmente. También puede agregársele arena reciclada, conociendo previamente su porcentaje de arcilla útil.
- **Reque 1 y Reque 2**
Las arenas de Reque necesitan ser enriquecidas con bentonita sódica y aumento del porcentaje de agua, la misma que debe añadirse gradualmente.
- **Taller (proveedor)**
Aumentar el porcentaje de humedad para disminuir gradualmente la resistencia a la compresión de la mezcla. Además, se debe añadir arena reciclada, conociendo previamente su porcentaje de arcilla útil.
- **Moche**
Añadir a la mezcla arena silíceas fina (IF: 100) para disminuir la resistencia a la compresión de la muestra.

Conclusiones y recomendaciones

El control de calidad de las piezas fabricadas en los talleres del norte ha evidenciado la presencia de defectos provenientes de prácticas inadecuadas en todas las partes del proceso, siendo las más frecuentes las derivadas del proceso de moldeo

Los defectos relacionados con las malas prácticas realizadas durante el moldeo se deben: a la calidad de las arenas empleadas, la falta de dosificación de insumos, la falta de homogeneidad de la mezcla de molde, el uso de cajas de moldeo de dimensiones inadecuadas y la incorrecta ubicación de los sistemas de alimentación y distribución en el molde.

Respecto del procedimiento realizado durante la etapa de moldeo:

1. Las arenas empleadas por los fundidores, no son las más adecuadas para preparar una mezcla de moldeo. Esto se ha evidenciado en la aparición de arena vitrificada en 17 de las 24 muestras analizadas, defecto que tiene su origen en la falta de componente arcilloso, refractariedad y plasticidad de la mezcla de moldeo. A este defecto se le asocian la reutilización de arenas y el escaso uso de aditivos para preparar la mezcla, prácticas inadecuadas comunes en el moldeo de los talleres del norte.
2. El desconocimiento de los fundidores sobre las propiedades y características con las que debe contar las arenas es un problema grave, que trae como consecuencia dificultades para dosificar los insumos y aditivos de la mezcla de moldeo, supeditando este procedimiento al criterio empírico del moldeador.
3. La preparación de arenas de moldeo se realiza manualmente, por lo que el procedimiento es muy engorroso y poco eficiente. Las inclusiones de sedimento encontradas en 7 de las 24 piezas analizadas, se relacionan con la falta de homogenización de la mezcla de moldeo, que se deriva de la falta de tecnificación de este procedimiento.
4. La destreza y experiencia de los moldeadores del norte les permite conformar moldes de arena con características aceptables. Sin embargo, el uso de arenas de características poco apropiadas, como el índice de finura diferente al recomendable, incide en la aparición de sopladuras y picaduras en la superficie de las piezas por la

falta de permeabilidad del molde a causa de granos redondeados muy grueso y darts, cuando se emplean arenas muy finas.

5. Las cajas de moldeo que se emplean no cuentan con las dimensiones apropiadas para colocar el sistema de alimentación y distribución, por lo que, en las piezas se encuentran rechupes y contracciones internas. Estos defectos están asociados al mal dimensionamiento de los alimentadores y ubicación empírica de los canales de distribución del metal fundido, los cuales constituyen un factor determinante sobre la calidad de las piezas.
6. La falta de cálculos de la presión metalostática originada durante el vaciado es también un problema que atenta contra la seguridad de los fundidores. En 2 piezas se identificó la presencia de metal saliente, debido a la falta de pesos para contrarrestar la presión metalostática.

Respecto de la gestión de los talleres de fundición

7. La administración empírica de las empresas por parte de los dueños de los talleres influye en el escaso margen de ganancia por pieza fundida que entregan. Esto se relaciona con la falta de capacitación en temas de gestión y estructura de costos, la cual resulta necesaria para garantizar la rentabilidad de sus negocios y la supervivencia de los mismos.

Respecto del estado tecnológico del sector fundición del norte del Perú

8. En el norte, los modelistas y moldeadores son conocidos por la buena performance de sus modelos. Precisamente, su experiencia y habilidad, de la mano del gran empuje que los caracteriza, son una fortaleza, que, con el asesoramiento y capacitación adecuadas pueden conseguir la fabricación de moldes de calidad a partir de los cuales se obtengan piezas libres de defectos.
9. Los fundidores del norte carecen del apoyo de una entidad encargada de su capacitación, pese a que es este aspecto el que se presenta como una necesidad prioritaria, que les permitirá impulsar su pequeña industria. Respecto a la etapa de moldeo, una buena capacitación del personal incrementará la eficiencia, productividad y calidad de los moldes de arena, lo que repercutirá en la disminución en los costos de producción.
10. En el norte, son muy escasos los centros dedicados a análisis de calidad de piezas fundidas o laboratorios de ensayos y formulación de arenas. Además de los trabajos realizados por el laboratorio de Metalotecnica de UdeP, en Piura, se ha identificado el laboratorio de arenas de la Universidad Nacional de Trujillo, el mismo que se encuentra bastante bien equipado. Sin embargo, se verifica que no hay relación entre los fundidores y la Academia debido a la poca facilidad que tiene para realizar sus ensayos y el escaso conocimiento que tienen sobre los mismos.

Recomendaciones:

1. El control de calidad de los insumos puede realizarse *in situ*, con una serie de ensayos básicos que permiten medir las propiedades tanto de sus arenas e insumos, como de los moldes conformados. Por ejemplo: en el caso del aglutinante, se puede realizar un ensayo de azul de metileno y con ello verificar que la bentonita adquirida cumple con el porcentaje de hinchamiento necesario, como se muestra en el Anexo B.3. En el tamizado, se recomienda contar con los números de tamices que la norma AFS indica y obtener mezclas de moldeo de finara entre 50 – 100 AFS para, con un adecuado conformado, garantizar una buena permeabilidad del molde. Del mismo modo, contar con un durómetro para medir la dureza de los moldes permite inferir la permeabilidad de los mismos y su resistencia a la compresión.
2. Es recomendable que los talleres de fundición lleven un registro de cuántas veces se han reutilizado las arenas y cuánta arena nueva se añadió. Esto permitirá obtener mezclas de moldeo más adecuadas, con mejores propiedades para conformar los moldes y reducirán la incidencia de defectos sobre las piezas solidificadas. En la Tabla 27 y 28 se muestra un ejemplo para llevar a cabo este procedimiento.
3. Se recomienda emplear un molino que prepare la mezcla de moldeo, con cuyo uso bastará una correcta preparación previa (desterronado y tamizado). Además, la mezcla preparada podrá conservarse en depósitos herméticos hasta por tres meses.
4. En cuanto al dimensionamiento de los sistemas de alimentación, se conocen métodos sencillos (como el propuesto por Chorinov, a partir de la relación entre el volumen y el área de la pieza) que se pueden utilizar para aproximar el número de mazarotas y alimentadores de los moldes. En el Anexo B.7 se muestra un ejemplo de cálculo de sistemas de alimentación y distribución que puede servir de referencia.
5. Un aspecto importante es el relacionado con la distribución de áreas dentro de los talleres de fundición. En las visitas realizadas se pudo constatar que el patio de moldeo no está techado, por lo que, las arenas que emplean están expuestas a las lluvias, contaminación, etc. Además, que por este espacio es muy difícil transitar. Se recomienda a los fundidores techar el área de moldeo y, por seguridad, colocar menor número de moldes en el área, de tal manera que los moldeadores y ayudantes accedan a ella sin problemas.
6. Es importante que los fundidores sean capacitados en diversos temas relacionados con el sector fundición, incluyendo temas de gestión. Entre los temas más importantes, respecto al moldeo, se pueden mencionar:
 - a. Características y propiedades de las arenas de moldeo.
 - b. Control de calidad de las arenas, insumos de moldeo.
 - c. Dosificación y preparación en arenas de moldeo.
 - d. Moldeo en arena verde.
 - e. Sistemas de alimentación y distribución
 - f. Defectología macroscópica
 - g. Gestión de activos en el proceso de fundición

De esta manera, los pequeños talleres apuntarán a mejorar sus productos, a captar un mayor mercado local y con ello, hacer crecer su empresa.

7. Ante la necesidad de una entidad que brinde capacitación y servicios tecnológicos en cuanto a análisis de calidad, una planta piloto de aleaciones en general que cuente con un laboratorio de caracterización y formulación de arenas, sería una buena alternativa, pues permitiría estudiar los distintos parámetros involucrados en la obtención de piezas de calidad; sobretodo, los relacionados con el moldeo en arena verde: calidad de arenas, preparación, dosificación, conformación de moldes, ubicación de sistemas de alimentación, etc. Además, esta sería una herramienta de capacitación para el pequeño empresario del norte y, de acuerdo a los objetivos del Programa Nacional Transversal de Ciencia y Tecnología de Materiales – ProMat, serviría para desarrollar investigación en esta área.

Bibliografía

- [1] American Foundrymen's Society. (1967). *Manual de arenas para fundición*. Illinois: Des plaines.
- [2] Apraiz Barreiro, J. (1998). *Fundiciones*. Madrid : Editorial Dossat.
- [3] *ASM Handbook - Vol. 15: Casting*. (1992). United States of America: ASM International.
- [4] Baquero, A. A. (2000). *Diseño, operación y control del cubilote*. Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones UIS.
- [5] Brown, J. R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- [6] Brown, R. (1992). Green sand molding. Equipment and Processing. En A. Handbook, *ASM Handbook - Vol. 15: Casting* (págs. 737 - 769). United States of America : ASM International .
- [7] Capello, E. (1971). *Tecnología de la fundición* . Barcelona,España : Gustavo Gili .
- [8] Carrillo Reyes, C. M. (1995). *Diseño y organización de un laboratorio de análisis de arenas de moldeo.* . Piura: Universidad de Piura .
- [9] Castro , G. (Febrero de 2009). Fundiciones. *Fundiciones*. Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.
- [10] Centeno Baez, G., Doblaz Charneco, F., Lopez Fernandez, J., Martínez Donaire, A., Morales Palma, D., & Vallellano Martin, C. (2014). *Guía de fundición*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [11] García Chacón, J. A. (2016). *Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena*. Universidad de Sevilla.
- [12] Granlund, M. (1999). Understanding the basics of green sand. *Modern Casting*.
- [13] Higgins, R. A. (1984). Vaciados en arena. En R. A. Higgins, *Ingeniería Metalúrgica - Tomo II* (págs. 75 - 107). Londres: C.E.C.S.A.

- [14] Hoyos Quintero, J., Velásquez Osorno, A., Agudelo Loaiza, C., & López Cañas, C. (2007). *Interacción y creación de un banco de proyectos para las industrias Siderúrgica y de Fundición*. Colombia: Corporación Eco-eficiente.
- [15] IHOBE. (2011). Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: *Arenas de moldeo en fundiciones férreas*. País Vasco: Gobierno Vasco.
- [16] Johnson, C. G. (1961). Hierro colado . En C. G. Johnson, *Metalurgia* (págs. 60 - 78). Chicago: Reverté.
- [17] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). Procesos de fundición de metales. En S. Kalpakjian, & S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (págs. 261 - 272). Pearson .
- [18] Lapoint, R. (Octubre de 2010). Moldeo de las fundiciones de hierro en arena verde. *Evaluación calitativa y cuantitativa de los defectos más comunes en las fundiciones grises y nodulares*. Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- [19] Leonardo Granados , F., & Puentes Ávila, M. M. (2016). *Sistema de gestión de operaciones en el área de fundición de la siderúrgica Metalmecc S.A.S*. Bogotá: Universidad Libre.
- [20] Mae, H., Teng, X., & Bai, Y. (2012). Wierzbicki T. *Comparison of ductile fracture properties of aluminum castings: Sand mold vs. metal mold*. International Journal of Solids and Structures, 45.
- [21] Mazzoleni, F. (1978). *Formatura e colata dei getti* . En F. Mazzoleni, *Tecnologie dei metalli* (págs. 73 - 218). Italia : UTET Editore.
- [22] Mora Pazán, L. (2017). *Sustitución de partes y piezas mediante proceso de fundición*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [23] Ordinola Castillo, J. C. (08 de Septiembre de 2011). Tierras de moldeo. *Caracterización de las tierras de moldeo de "El Porvenir" de la provincia Sullana*. Piura , Piura, Perú : Universidad de Piura.
- [24] Ortiz Prado, A., Ruiz Cervantes, O., & Ortiz Valera, J. (2013). *Modelado de procesos de manufactura*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [25] Pero-Sanz Elorz, J. (1994). *Propiedades generales de las fundiciones grises no aleadas (o de baja aleación) y grafito laminar*. En J. Pero-Sanz Elorz, *Fundiciones férreas* (págs. 49 - 69). Madrid, España. : Editorial Dosat S.A.
- [26] Piwonka, T. (1992). *Molding and Casting Processes*. En A. H. Committee, *ASM Handbook - Vol. 15: Casting* (págs. 441 - 515). Unites States of America : ASM International .
- [27] Plasencia Izquierdo, A. (1994). *Alternativas para el reciclaje de las arenas residuales de la fundición*. Obtenido de Hemeroteca Digital UAEM: <http://cienciaergosum.uaemex.mx/index.php/ergosum/article/view/4162>

- [28] Rodríguez Galbarro, H. (29 de Agosto de 2018). Ingemecánica . Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html>
- [29] Rodríguez Moliner, T., Parada Expósito , A., & Ordóñez , U. (2006). *El uso de técnicas de simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas*. Ingeniería Mecánica , 47 - 51.
- [30] Rojas Urgilés, V. (24 de Febrero de 2010). *Diseño de un sistema de costos por procesos para la empresa JCR Fundiciones*. Sangolquí, Ecuador : Escuela Politécnica del Ejército.
- [31] Saikaew, C., & Wiengwiset, S. (2012). *Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings*. Applied Clay Science, 67 - 68.
- [32] Secciani , A., & Villani , G. (1996). *Fonderia*. En A. Secciani , & G. Villani , Produzione metalmeccanica (págs. 196 - 219). Italia: Capelli Editore.
- [33] Sertucha, J., & Suárez, R. (2005). *Materiales inorgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición*. Anales de la Real Sociedad Española de Química, 17-27.
- [34] Sertucha, J., Suárez, R., Legazpi, J., & Gacetabeitia, P. (2007). *Influencia de las condiciones de moldeo y de las características de los moldes sobre la formación de defectos de contracción en piezas de fundición esferoidal*. Revista de Metalurgia, 188 - 195.
- [35] Singh, R. (2006). *Mold and core making*. En R. Singh, Introduction to basic manufacturing process and workshop technology (págs. 208 - 237). Nueva Delhi: New Age International.
- [36] Spirutová, N., Beno, J., Bednárová, V., Kriz, J., & Kandrnl, M. (2012). *Influence green sand system by core sand additions*. Archives of Foundry Engineering, 105 - 110.
- [37] Universidad Tecnológica Nacional de Rosario. (3 de Septiembre de 2018). Repositorio de la Facultad Regional Rosario. Obtenido de Ingeniería Mecánica: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/15-TT_Fundiciones_v2.pdf
- [38] Voigt, R. C. (1992). *Patterns and Patternmaking*. En A. H. Committee, ASM Handbook. Vol. 15: Casting (págs. 416 - 440). Unitates States of America : ASM International .
- [39] Z.A, X., & Mampaey, F. (1995). *Modelling of mould filling and solidification of castings*. Bélgica: Univ. de Birmingham (Reino Unido). Escuela de Metalurgia y Materiales.

Anexos

Anexo A

A.1 Distribución de la forma y tamaño del grafito laminar.

 A247 – 17

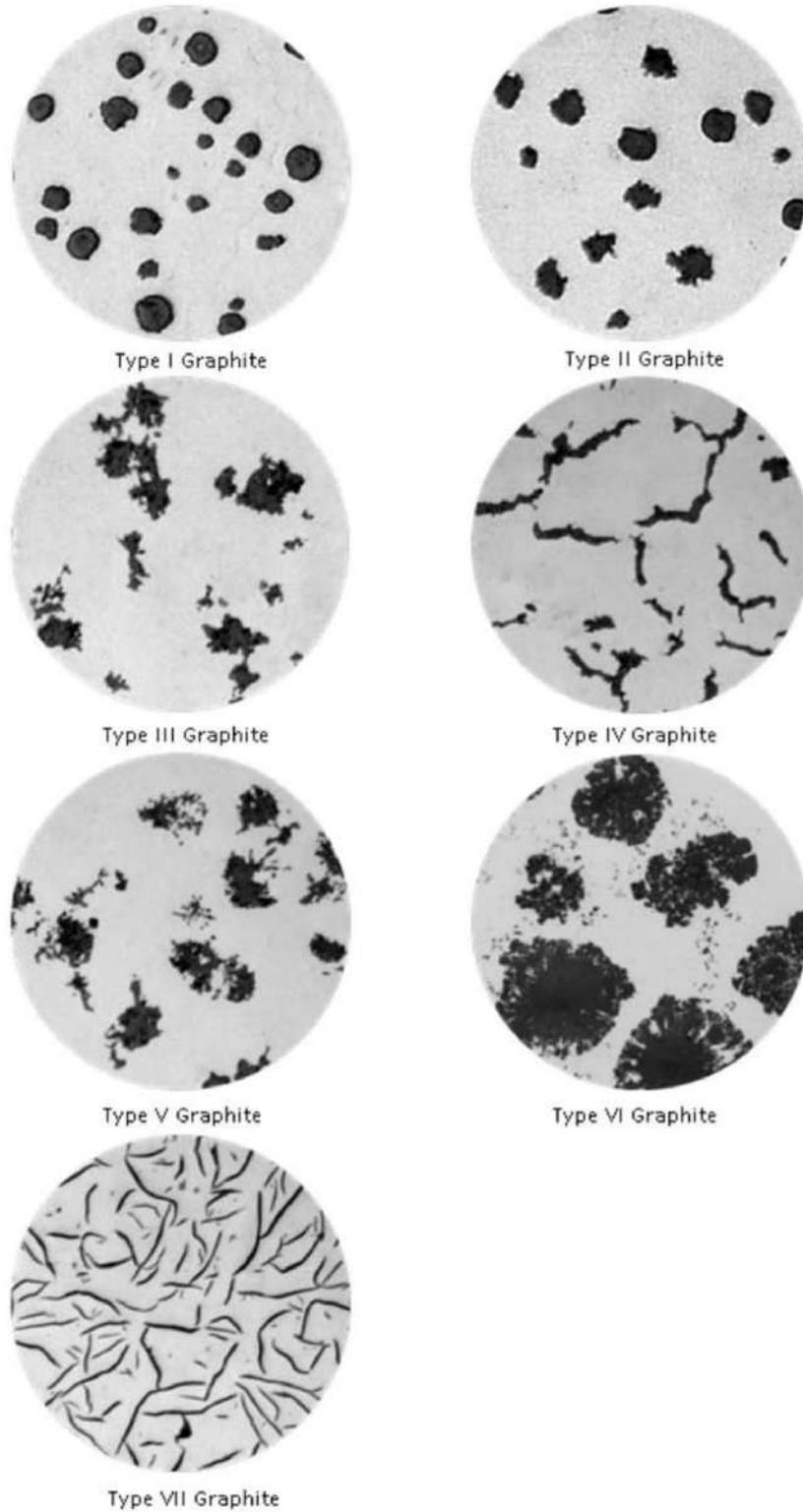


Figura A.1.Tipos de grafitos encontrados en las fundiciones grises.

Fuente: ASTM A247 – 17



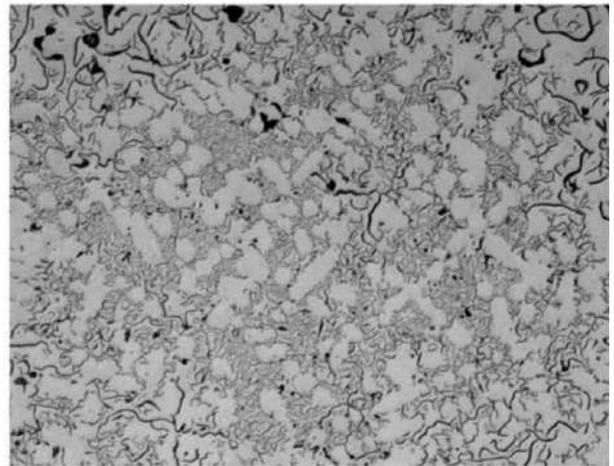
Distribution A Graphite



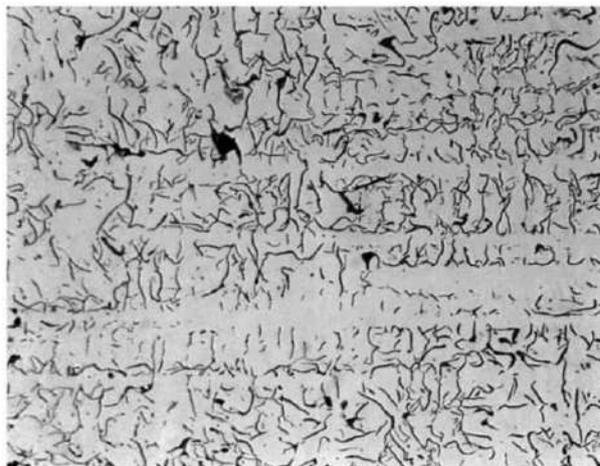
Distribution B Graphite



Distribution C Graphite



Distribution D Graphite



Distribution E Graphite

Figura A.2. Distribución de grafito laminar tipo VII en hierro gris.

Fuente: ASTM A247 - 17

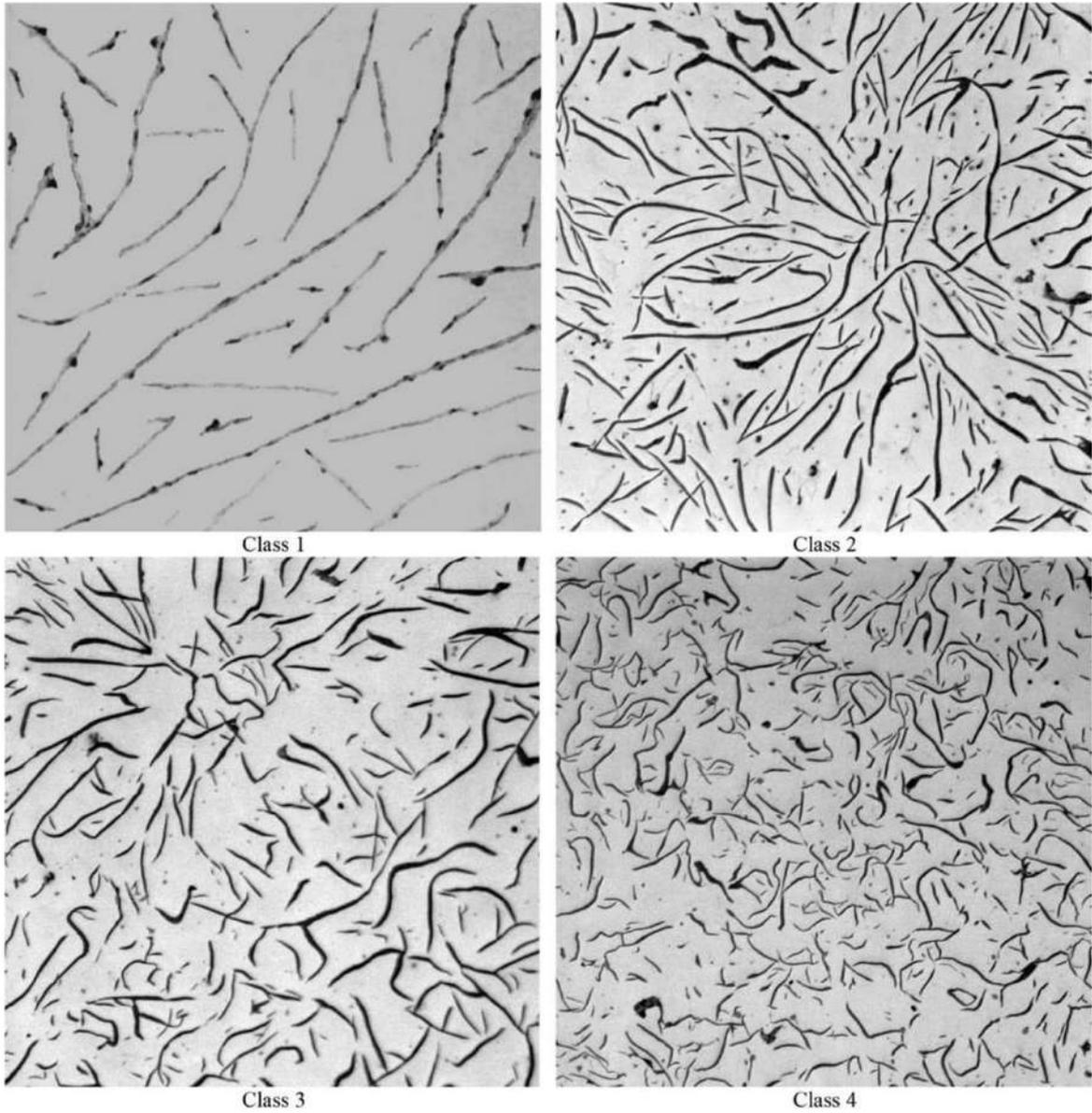


Figura A.3. Clase de grafito según el tamaño. (de la clase 1 a la clase 4).
Fuente: ASTM A247 - 17

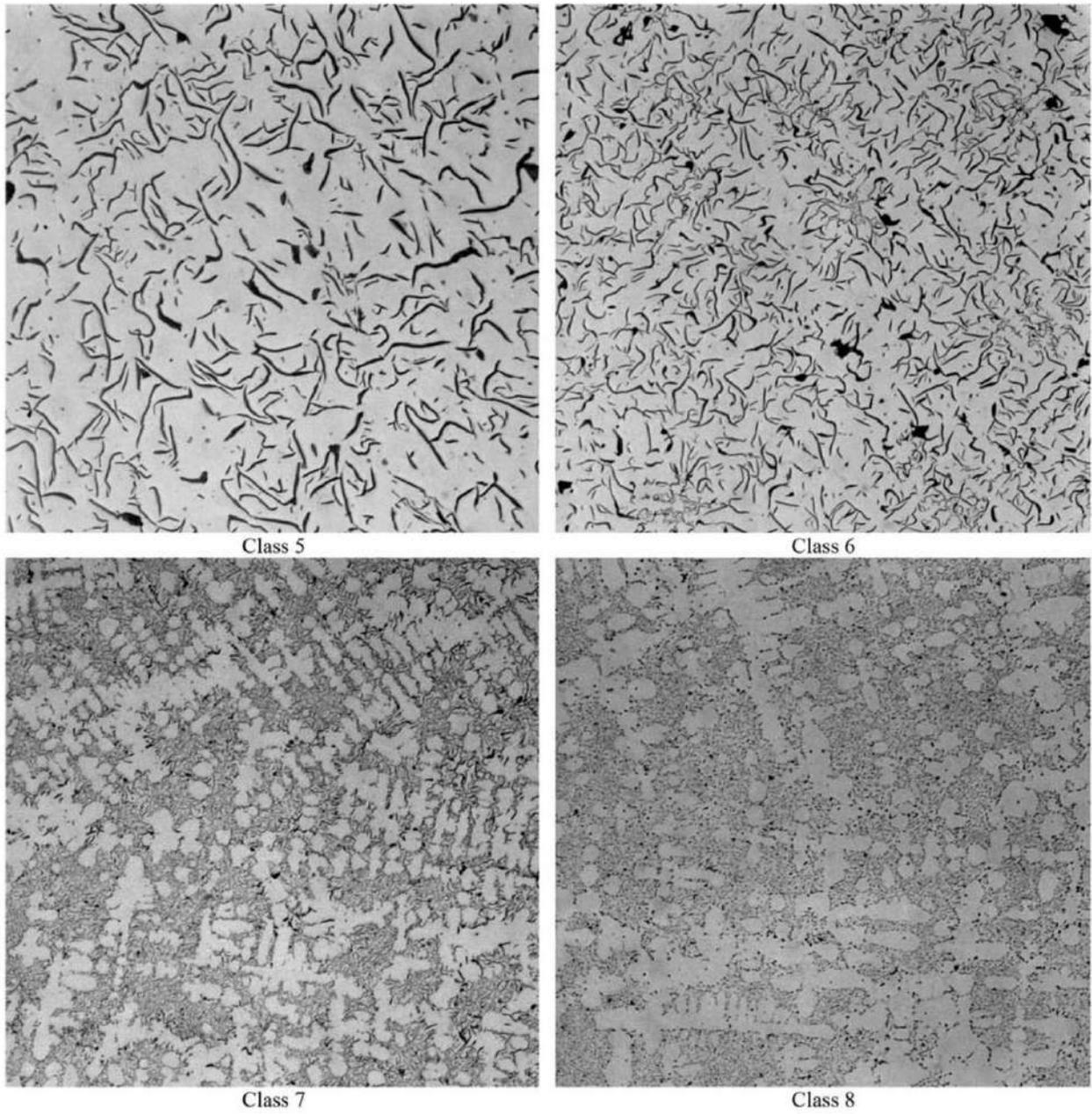


Figura A.4. Clase de grafito según tamaño (de la clase 5 a la clase 8).

Fuente: ASTM A247 - 17

A.2 Diagrama de hierro – carbono

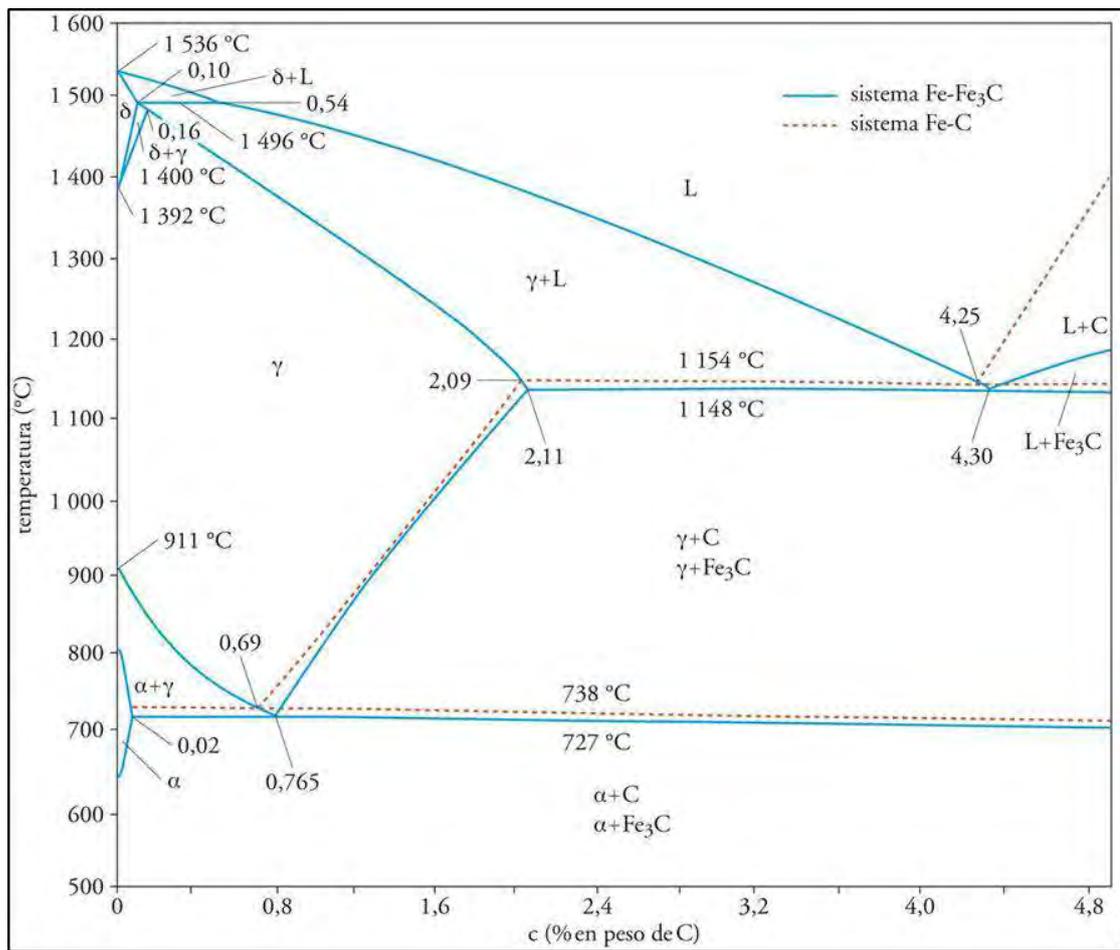


Figura A.5. Diagrama Fe-C metaestable (líneas continuas) y diagrama Fe-C estable (líneas discontinuas).

Fuente: Kostorz, 2007

A.3 Atlas Internacional de los Defectos de Fundición

American Foundrymen's Society Comité Internacional de la Asociación Técnica de Fundición

Este libro intenta apoyar el mantenimiento e incremento constante en el nivel de calidad de fundición, identificando los defectos, sus posibles causas y recomendaciones para la eliminación de los mismo.

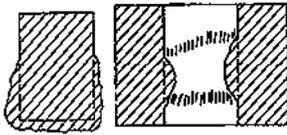
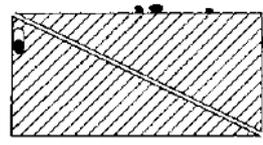
El sistema de clasificación usado está basado en la descripción física del defecto bajo consideración. Se intenta permitir una identificación hecha por observación directa del defecto de fundición o una descripción precisa del defecto implicando solamente el criterio de la apariencia, ubicación y dimensión.

Siete categorías básicas de defectos se han establecido y cada una de ellas están identificadas por una letra: aleta o envenado (A), cavidad o sopladura (B), discontinuidades (C), superficie defectuosa (D), fundición incompleta (E), dimensión o forma incorrecta (F) e inclusión o anomalía estructural (G).

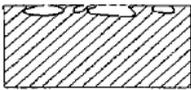
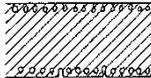
Cada categoría está dividida en grupos y subgrupos los cuales están designados por números. Dentro de cada subgrupo, un tercer número es asignado para especificar cada defecto particular.

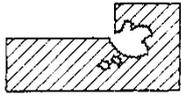
A continuación, se muestra un sistema clasificatorio de defecto presentado en forma de tabla de algunos defectos identificados por American Foundrymen's Society.

A. Metal Saliente

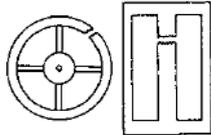
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
A200		Salientes masivos	
A210		Hinchazones	
A211	Exceso de metal sobre la superficie externa o interna de la fundición	Hinchazón externa o interna	
A300		Otros salientes metálicos	
A310		Metal saliente con superficie suave	
A311	Metal saliente de forma esférica en las superficies, esquinas o ángulos entrantes	Exudación, exudación fosforosa, de estaño o de plomo	

B. Cavidades

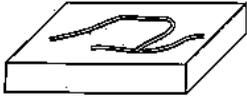
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
B100	Cavidades generalmente redondeadas, pared suave detectable a simple vista		
B110	Cavidades internas de clase B100 que no se extienden a la superficie, discernible únicamente por método especial, maquinado o fractura de la fundición.		
B111	Cavidades redondeadas, usualmente con pared suave de tamaño variado, aisladas o agrupadas irregularmente en todas las áreas de la fundición	Sopladuras y picaduras	
B113	Como B111, pero acompañada de inclusiones de escoria (G122)	Sopladuras de escorias	
B120	Cavidades de clase B100, localizadas en la superficie de la fundición o en su cercanía.		
B121	Cavidades de clase B120 de varios tamaños, aisladas o agrupadas. Normalmente localizadas en la superficie o a su cercanía con la pared brillante	Sopladura en la superficie o sub-superficie	
B123	Porosidad fina (cavidades) en la superficie de la fundición que aparecen en áreas extendidas	Picaduras en superficie	

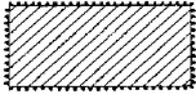
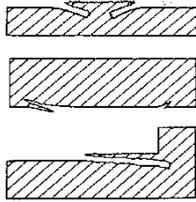
B200	Cavidades con pared generalmente áspera, contracción		
B210	Cavidades abiertas de clase B200, a veces penetran profundamente en la fundición		
B211	Cavidad en forma de embudo. Pared normalmente cubierta con dendritas	Contracción abierta o externa (rechupe)	
B212	Cavidad con bordes agudos en filetes de fundición gruesa o en las localizaciones de la colada	Contracción en esquina o filete	
B220	Cavidad de clase B200, localizada completamente en el interior de la fundición		
B221	Cavidad de forma irregular. Pared muchas veces dendrítica	Contracción interna o tapada	

C. Discontinuidad

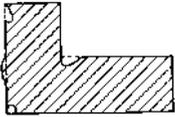
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
C100	Discontinuidades causadas por efectos del metal (ruptura), que no parece ser resultado de una tensión interna		
C110	Formación normal de grieta		
C111	Apariencia de fractura normal, a veces con marcas idénticas adyacentes	Rompimiento en frío	
C200	Discontinuidades causadas por tensión interna y impedimento a contracción (rompimientos y rasgados)		
C210	Grieta de tensiones por fundición fría o desgarramiento en frío.		
C211	Discontinuidades con bordes cuadrados en áreas susceptibles a esfuerzo de tensión durante el enfriamiento. Superficie no oxidada	Desgarramiento en frío	

D. Superficie defectuosa

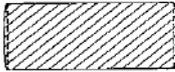
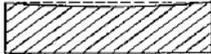
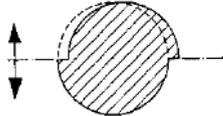
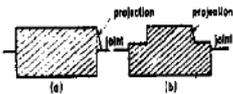
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
D100	Irregularidades de la superficie de fundición		
D110	Marcas de arruga, pliegue en la piel de la fundición		
D113	Arruga ondulada marcada sin discontinuidades. Los bordes de las arrugas están en el mismo nivel y la	Hendiduras o cicatriz	

	superficie de la fundición es suave		
D200		Defectos serios de superficie	
D220		Adherencia de arena, más o menos vitrificada	
D221	Capa de arena fuertemente adherida a la superficie de la fundición	Vitrificación, sinterización	
D230		Metal saliente en forma plana, con superficie áspera normalmente paralelo a la superficie de fundición.	
D231	Metal saliente en forma plana con superficie áspera normalmente paralelo a la superficie de la fundición, removible con un esmeril o cincel	Dartas, dartas en expansión	

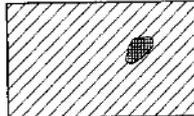
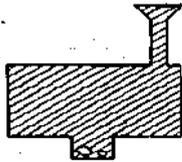
E. Fundición incompleta

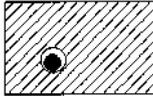
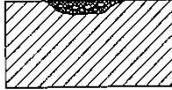
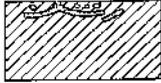
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
E100		Porciones perdidas de fundición (no fractura).	
E110		Variación superficial de la figura de modelo.	
E112	Bordes o contorno deformados debido a la mala reparación del molde o negligencia en la aplicación de pinturas de revestimiento	Revestimiento defectuoso	
E120		Variaciones serias de respecto del modelo.	
E123	Fundición incompleta debido a la pérdida de metal después de la colada	Salida	
E220		Pieza rota	
E221	Dimensiones fracturadas que corresponden a la colada, salida de aire, etc.	Fundición rota (en áreas de colada, salidas de aire, etc)	

F. Dimensión o forma incorrecta

Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
F120	Algunas dimensiones de fundición incorrectas		
F125	Espesor de metal en exceso de ubicación irregular, al exterior de la fundición	Suave o insuficiente apisonado. Movimiento de pared del molde	
F126	Pared de fundición delgada, en la superficie horizontal	Fundición deformada	
F220	Desplazamiento desigual		
F221	Fundición parece haber sido sujeta a la acción de deslizamiento en el plano de la línea de partición	Desplazado	
F223	Metal saliente de forma irregular, en la superficie vertical, generalmente a un solo lado de la cercana de la línea de partición	Defecto de apisonado	

G. Inclusiones

Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
G100	Inclusiones		
G110	Inclusiones metálicas		
G111	Inclusiones cuya apariencia, análisis químico o prueba estructural muestra que han sido causadas por un elemento diferente a la aleación	Inclusiones metálica	
G112	Inclusiones de composición igual que el del metal base, generalmente de forma esférica y muchas veces revestido con óxido	Gotas frías	

G113	Inclusiones metálicas de forma esférica dentro de las sopladuras u otras cavidades o en la depresión de la superficie (A311). Su composición se aproxima a la del metal base, pero más cercano al eutéctico	Exudación interna, exudación fosforosa	
G120	Inclusiones no metálicas (escoria, sedimento y fundente)		
G121	Inclusiones no metálicas cuya apariencia o análisis muestra que contienen escoria	Inclusiones de escoria, sedimento	
G122	Inclusiones no-metálicas generalmente impregnadas con gas y sopladuras acompañadas por sopladuras (B 113)	Defecto de sopladuras por gas	
G130	Inclusiones no metálicas del molde o material del macho		
G131	Inclusiones de la arena, generalmente muy cerca de la superficie de la fundición	Inclusiones de arena	

Anexo B

B.1 Clasificación de las arenas de moldeo para fundición

Las arenas de fundición se clasifican según los criterios que se muestran a continuación:

a. Su origen:

Las arenas de moldeo pueden ser naturales o sintéticas. Las arenas de moldeo naturales se obtienen por descomposición espontánea, durante un largo período de tiempo, de rocas de cuarzo o de origen limoso, cuyos gránulos de diversos espesores se mantienen unidos por aglutinante (arcilla).

Estas, por su parte se clasifican de acuerdo a:

- Su contenido de arcilla.
- La forma del grano.
- Las dimensiones del grano.

Por otro lado, las arenas sintéticas se obtienen mezclando arena de sílice y arcilla con aglutinantes para proveerle características adecuadas. Se componen esencialmente de arena silíceo (82% - 95%), arcilla (8% - 12%) y aglutinantes (1% - 10%), con adición de agua para proporcionarle suficiente cohesión.

En la Figura B.1 se muestra la clasificación a detalle, de acuerdo a este criterio.

b. Su porcentaje de humedad

De acuerdo a este criterio, pueden ser:

- *Verdes o magras*, cuyo contenido de arcilla oscila entre el 5 y 8% y contienen un porcentaje de agua entre el 4 y 8%, por eso tienen baja plasticidad. Se emplean para obtener piezas pequeñas sin secado previo.
- *Secas o grasas*, que se obtienen a partir de un secado controlado, entre 250 y 300°C, lo que genera que se contraiga la arcilla quedando huecos que aumentan la porosidad de la tierra de moldeo, mejorando la permeabilidad. Se emplean para producir piezas grandes.

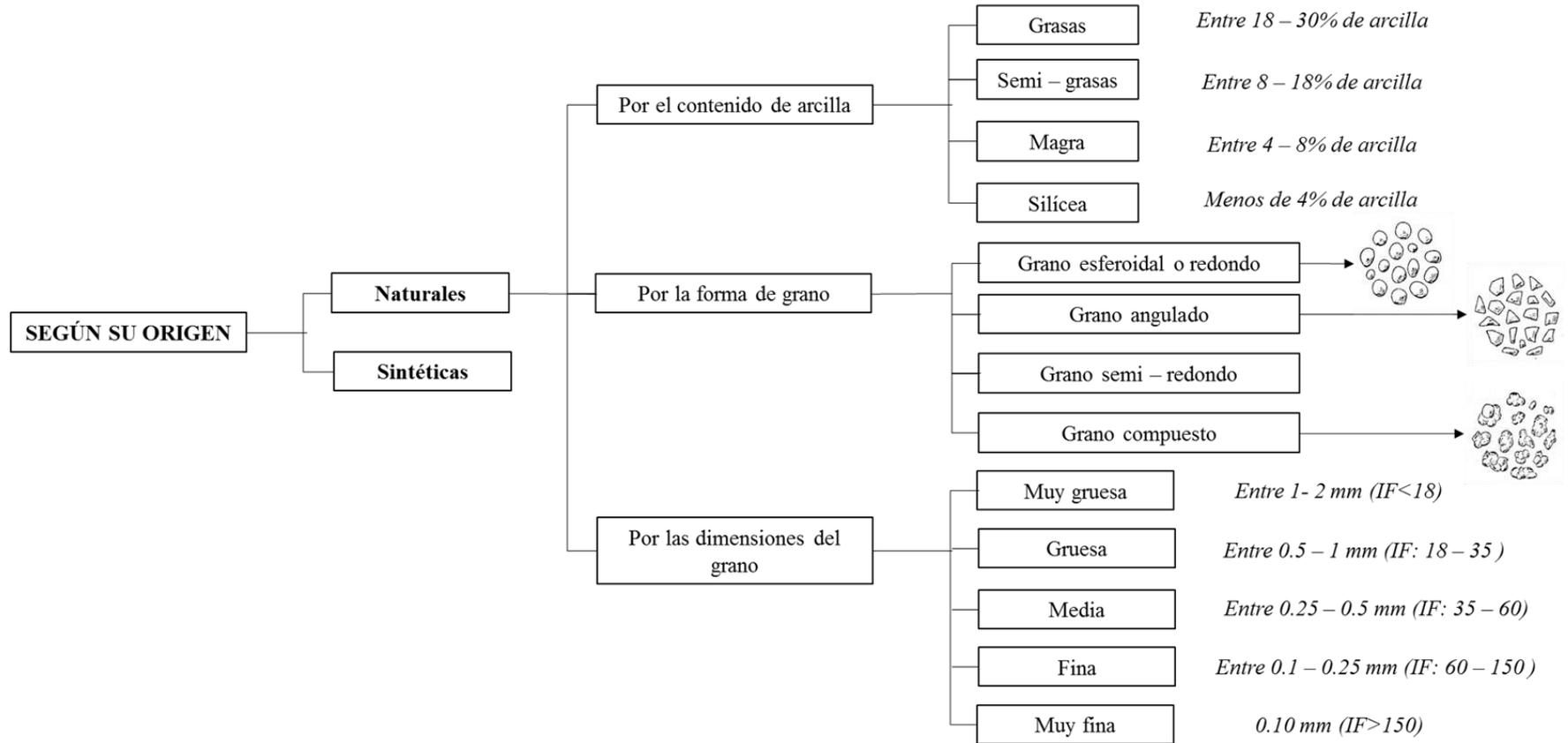
c. Su aplicación en el moldeo

Pueden ser:

- De revestimiento o contacto. También conocidas como arenilla de careado. Se aplican sobre la cara del molde, por lo que deben ser de buena calidad y de grano fino³³.
- De relleno, para completar el molde luego de haber utilizado las arenas de revestimiento. Es muy importante que estas tierras deban tener una permeabilidad no menor a las tierras de revestimiento.

³³ El espesor de capa de tierra de contacto oscila entre 15 a 100mm dependiendo de las dimensiones de la pared de la pieza.

Figura B.1. Clasificación de las arenas de moldeo según su origen.



Fuente: Elaboración propia.

d. Según su función:

Se sub –dividen en:

- Arenas para confeccionar el molde, conformadas por sílice y arcilla con algún aglutinante especial. El principal constituyente de una tierra de moldeo es la arena silíceo, con temperatura de fusión alrededor de 1700°C que puede tener una sensible disminución debido a impurezas más fusibles, feldespatos, mica y flujos alcalinos.
- Arenas para macho, las cuales tienen alto contenido de sílice de granos esferoidales de tamaño regular, resistencia a la contracción del metal en la etapa de enfriamiento, discreta rigidez para no flexionar por acción de la presión metalostática del metal líquido y bajo contenido de arcilla, en torno al 2% para aumentar la permeabilidad. Además, se le adicionan aglutinantes para aumentar su cohesión.

e. Otras arenas de fundición.

En este criterio se incluyen: tierras incrustadas, al cemento, de Zirconio, olivinita, cromita, magnetita y chamota. En la Tabla B.1 se muestra a detalle las propiedades de estas arenas.

Tabla B.1. Propiedades de las arenas de moldeo.

Propiedad	Arena de sílice	Arena de cromita	Arena de circonio	Arena de olivino
Dureza según Mohs	7	5.5	7.5	6.5 – 7
Densidad en g/cm ³	2.65	Aprox. 4.5	Aprox. 4.5	Aprox. 3.3.
Temperatura a fusión en °C	1760 – 1780	1800 – 1900	2200 – 2400	1750 – 1850
Dilatación lineal hasta 600°C en %	1.25	0.4	0.2	0.6

Fuente: IHOBE S.A, 2011.

B.2 Clasificación de las arcillas

Las arcillas se clasifican según los criterios que se muestran a continuación:

- a. De acuerdo a su naturaleza, pueden ser: aglutinantes orgánicos e inorgánicos.
 Los aglutinantes orgánicos, como los cereales, melaza, alquitrán, resina y aceites, por lo general, aumentan la cohesión de la arena verde y arden a baja temperatura. Se adicionan a la arena silíceas en cantidades que van del 1 al 3%.

Se sub – clasifican en:

- *Aglutinantes orgánicos de endurecimiento químico*, que proporcionan a las arenas buena fluidez en estado húmedo y alta resistencia en estado seco. Se emplean para preparar machos diseño complejo, como los de paredes finas.

Se dividen en dos grupos: los aceites y las resinas sintéticas.

- Los aceites, se emplean especialmente en la preparación de arena para hoyos. Se añaden en la proporción del 1.5 al 2% con un 2% de agua, obteniéndose cohesiones de 30 a 35 g/cm² en verde y de 45 a 50 kg/cm² en seco. Por lo general, confieren escasa cohesión a las arenas verdes, por lo que se emplean con otros aglutinantes (arcilla o dextrina), sustituyendo 0.5% de aceite por 1% de arcilla o de dextrina para mejorar las cohesiones en verde. Se cuece a 220 a 240°C durante 2 a 4 horas. El más conocido es el aceite de linaza, que responde bien a las exigencias de la fundición, pero, se sustituye por otros aceites vegetales por su elevado precio.
- Las resinas sintéticas desarrollan su acción aglutinante cuando se someten al calor. Pueden ser termo – endurecibles o termoplásticas. Las resinas termoplásticas al calentarse se funden y al enfriarse se vuelven a endurecer; mientras que las denominadas termo – endurecibles al calentarse se ablandan al principio, luego se endurecen en consecuencia de los procesos químicos irreversibles. Estas se utilizan para la elaboración de moldes de cáscara y machos. La ventaja de las resinas termo – endurecibles es su gran velocidad de endurecimiento con la formación de una película resistente y elástica.
- *Aglutinantes orgánicos secantes*, solubles en el agua y se mezclan bien con la arcilla, que le da a la tierra de moldeo la resistencia en verde necesaria; y, al macho, después del secado. Se reconocen en esta clasificación a la dextrina y la melaza. La dextrina tiene un poder aglutinante reducido por lo que se le emplea combinado con el aceite de linaza que proporciona resistencia en verde. Se añade en la proporción del 2 al 2.5% con un 2% de agua. La melaza, se utiliza también para pulverizar las superficies de los machos con el objeto de comunicarles resistencia superficial.

Los aglutinantes inorgánicos pueden ser de tipo arcilloso (arcillas y bentonitas) o cementosos (cemento y silicatos). los más empleados son:

- *Las arcillas*, que pertenecen a la primera sub – clasificación, están compuestas principalmente por silicato de alúmina hidratado y forma parte de las tierras de moldeo en una proporción que va del 2 al 35%. Se encuentra rodeando los granos de sílice y constituye el material aglutinante que une a estos y le da cohesión al

conjunto. Con un porcentaje de agua adecuado la arcilla es plástica, pero al secarse se vuelve muy dura y rígida.

Las propiedades aglutinantes de la arcilla dependen de las dimensiones y de la forma de las escamas que la componen³⁴: cuanto más pequeñas son, mayores son las propiedades coloidales, y, por lo tanto, el poder aglutinante. Por ende, se puede afirmar que, la cohesión de una arena aglutinada con arcilla no depende solamente de la cantidad, sino también, de las características de la misma.

Entre los tipos de arcilla que se pueden emplear, se distinguen:

- Arcilla caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): es un silicato acuoso de alúmina, que se presentan en forma de escamas. Si se calcinan pierden su agua de constitución y con ello, su estructura al mismo tiempo que su capacidad de absorber agua y hacerse plásticas. Son de alto poder refractario y moderado poder aglutinante.
 - Arcilla bentonita o montmorillonítica: se diferencian de la arcilla común por su elevado poder de absorción (en el agua se hincha hasta 16 veces más su volumen inicial), y su elevado poder aglutinante (de 2 a 7 veces mayor que el de la arcilla común). Se emplea en proporción de 2 a 4% del peso de arena (seca); se añade después del 3 al 4% de agua y se amasa durante 5 a 15 minutos.
 - *Cemento*. El más utilizado se conoce como cemento Portland, que se añade a la mezcla sub hidratada (8% de agua) de arena silíceas en una proporción del 8 al 10%. Es empleado para confeccionar moldes y machos para evitar el inconveniente de la escasa permeabilidad, el suficiente caimiento del macho durante la solidificación, la dificultad del desmoldeo y la lentitud del fraguado.
 - *Vidrio líquido*. Es un tipo de aglutinante inorgánico cementoso. Es una solución acuosa de silicato sódico o potásico de composición variable ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$). el efecto aglutinante del silicato de sodio es debido a su descomposición y a la formación, por acción del CO_2 del aire, de carbonato y sílice coloidal. La disgregabilidad de la mezcla se facilita añadiéndole harina de madera (2% aprox.)
- b. De acuerdo a su carácter de endurecimiento, se clasifican, de acuerdo a su resistencia específica a la rotura, en tres grandes grupos:
- Aglutinantes de endurecimiento irreversibles, que proporcionan mayor resistencia a los machos secos: 490 kPa (más de 5kgf/cm²) por 1% de aglutinante.
 - Aglutinante de endurecimiento intermedio, que proporcionan una resistencia a la rotura media, entre 294 – 490 kPa (3 – 5 kgf/cm²) por 1% de aglutinante.
 - Aglutinantes de endurecimiento reversible, que proporcionan una menor resistencia de 294 kPa (hasta 3kgf/cm²) por 1% de aglutinante.

³⁴ De dimensiones del orden de 10^{-5} y 10^{-3} m.

B.3 Ensayo de azul de metileno o *arcilla activa*.

Se denomina arcilla activa a la bentonita presente en la mezcla de arena que no está quemada o inerte, es decir, la que se conserva después de una colada y solo requiere de la adición de agua en una proporción adecuada humedad (agua) para exhibir sus óptimas propiedades de hinchamiento y adhesión.

Para llevar a cabo el procedimiento, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Pesar 5 g de arena reutilizada.
2. Llevar la muestra a un vaso de precipitados (vicker) de 250 ml y adicionar 50 ml de solución acuosa de Pirofosfato de Sodio al 2%; o en su defecto, 50 ml de solución acuosa de H_2SO_4 al 5%
3. Calentar a unos $80^\circ C$ durante 10 minutos, mientras agita la mezcla con agitador de vidrio o de plástico. Evitar salpicaduras.
4. Dejar enfriar y luego titular con la solución de Azul de Metileno sin dejar de agitar. Si la muestra es de arena de moldeo reciclada, comience agregando 10 ml de azul de metileno.
5. Detener la agitación y con el agitador de vidrio retire una gota de la solución de la muestra que está valorando y colóquela en un papel de filtro banda azul.
6. Comprobar la formación de un halo claro-verdoso (Ver Figura B.2) alrededor de la gota azul en el papel de filtro. Si no, continúe adicionando Azul de Metileno de 2 en 2 ml y luego de 1 en 1 ml; siempre verificando la aparición del halo claro-verdoso y detenga la valoración cuando éste aparezca.
7. Agite y vuelva a colocar la gota en el papel de filtro para garantizar que la aparición del halo persiste, si no, agregue otro ml de Azul de Metileno.
8. Cuando llegue al punto final de la valoración, lleve el número total de ml de Azul de Metileno gastados a una gráfica donde intercepta y lee el porcentaje de Arcilla Activa presente en la muestra.

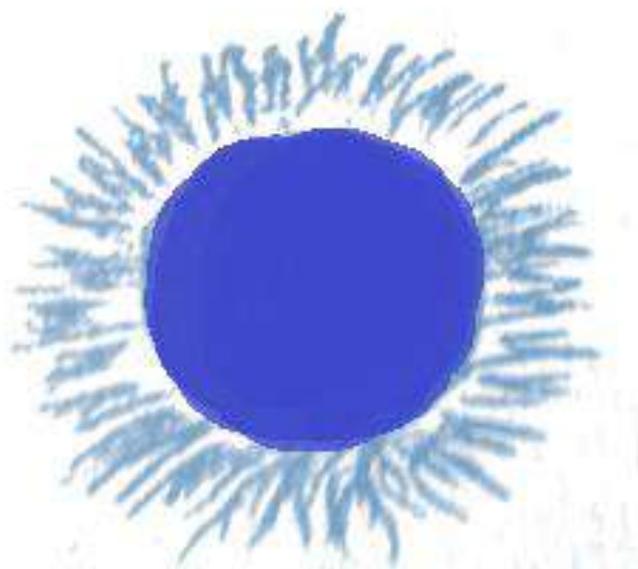


Figura B.2. Referencia de color del halo claro - verdoso.

Fuente: Rueda, Luis Fernando, 2011.

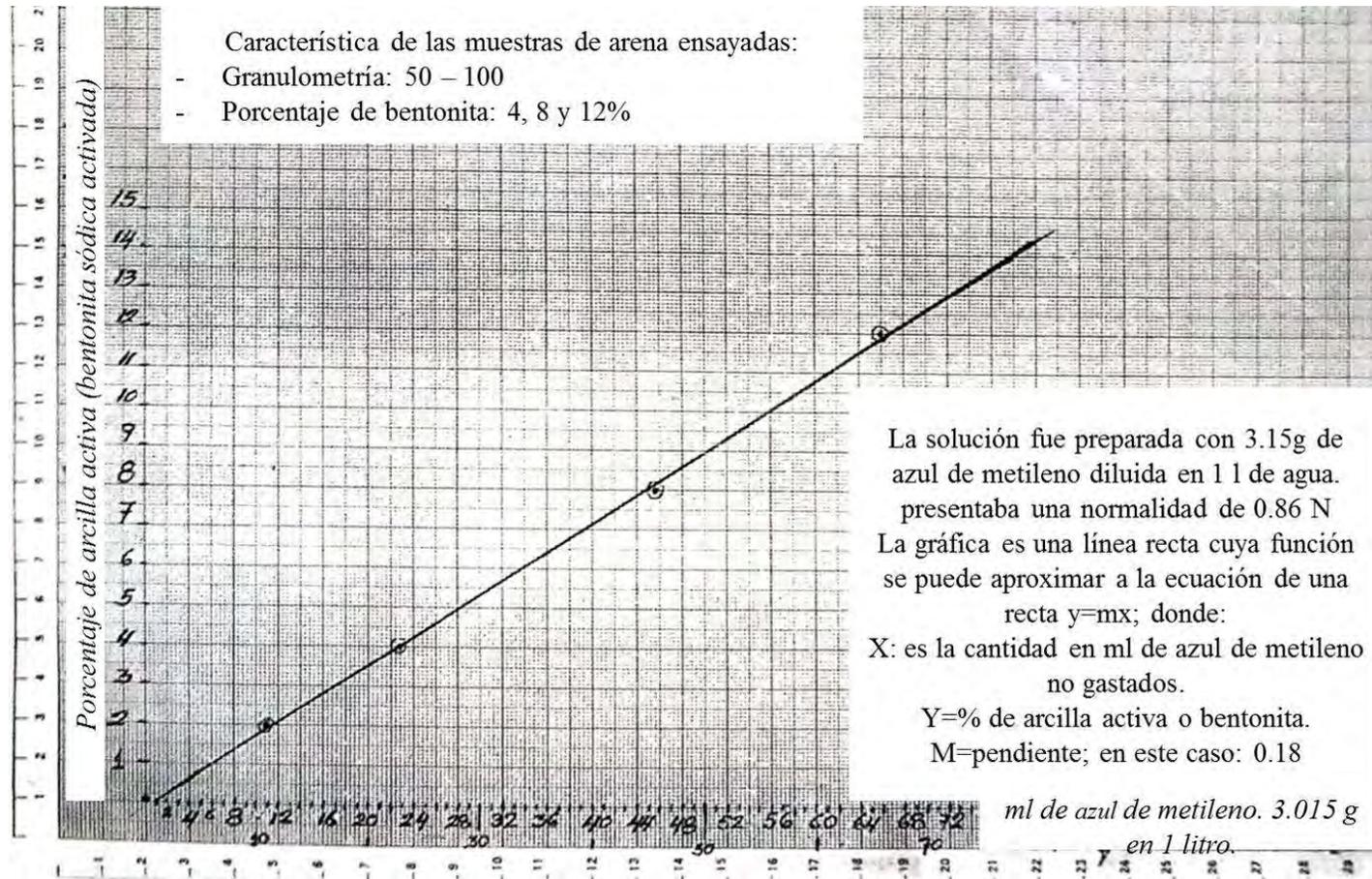


Figura B.3. Gráfica de arcilla activa.

La gráfica se construye con 4 o 5 mezclas estándar de arena nueva conteniendo 2, 4, 6, 8 y 12% de la Bentonita que se usa en la empresa donde se van a realizar los ensayos. A cada mezcla se le realiza el ensayo anterior para saber cuántos mL gasta y colocar estos en la gráfica que se construye, correspondientes al % de Bentonita que se agrega a esa mezcla.

Fuente: Rueda, Luis Fernando, 2011.

B.4 Composición de las pinturas para fundición.

Es importante determinar la composición de las pinturas empleadas en los moldes y machos. Para mejorar la adhesión de la pintura al molde se usan pinturas con una composición de una parte de harina de madera, tres de agua y una de cola pectina (en partes de masa).

En la Tabla B.2 y la Tabla B.3 se describen la composición de diez tipos de pintura. La pintura 4 se utiliza para la fundición en aluminio, la pintura 5 en bronce. Las pinturas 7, 8 y 9 se emplean para machos de piezas de acero con un espesor de las paredes de 20 – 40 mm.

Los modelos y cajas de machos se cubren con desmoldeantes o polvos para evitar la adherencia de la tierra de moldeo. Los desmoldeantes crean capas impermeables que evitan la adherencia de la tierra. Los más usados son: el licopodio, que es un polvo de color amarillo claro, liviano, movable, de granulación fina, pero su inconveniente es su alto costo y escasez.; los polvos sintéticos (sustitutos de licopodio) que se obtienen tratando polvos finos de trípoli, dolomita y otros materiales análogos. Los granos de polvo se recubren con una capa fina de parafina, grasa y cera. También se puede evitar la adherencia de la tierra de moldeo al modelo untándolo con kerosene y grafito plateado o con una tierra compuesta de 10% de ácido oleico y 90% de kerosene.

Tabla B.2. Composición de las pinturas en moldes y machos para fundición (% masa)

Pintura	Cuarzo en Polvo	Cola de Pectina	Bentonita	Grafito	Coque	Talco molido	Agua	Densidad
1	-	3.0	3.4	53.4	-	-	40.0	1.30 - 1.35
2	34.0	3.4	3.7	17.0	17.0	-	24.7	1.30 - 1.35
3	34.0	3.4	3.7	9.0	17.0	-	23.7	1.35 - 1.45
4	-	-	4.0	-	-	61.0	35.0	1.40 - 1.45
5	-	-	3.0	30.0	-	31.0	33.0	1.40 - 1.45

Fuente: Carrillo Reyes, 1995.

Tabla B.3. Composición de las Pinturas para moldeo de acero (% en masa)

Pintura	Cuarzo en Polvo	Bentonita	Jabón Naftenico	Agua	Aglutinantes	Densidad
6	72.0	1.7	1.3	18.0	Cola de Pectina 7.1	1.40 - 1.55
7	72.0	3.0	0.5	14.0	Harina de madera	
8	78.0	3.0	0.5	15.0	Dextrina 3.5	
9	76.0	3.0	0.5	8.5	Melaza 12	
10	76.0	3.0	0.5	8.5	Harina de madera	

Fuente: Carrillo Reyes, 1995.

B.5 Fórmulas para dosificar arenas

a. Arena de contacto nueva.

En la Tabla B.4, se muestran los insumos necesarios para obtener 100 kg de mezcla. En cuanto a su preparación, se debe agregar primero al molino Simpson o mezclador de paletas y rodillos, la arena seca; se humedece un poco con una parte del agua previamente calculada, se mezcla por un minuto, se agregan la bentonita y dextrina y el resto de agua, se deja mezclar hasta completar unas 150 vueltas (aprox. 5 minutos)³⁵. Se saca del mezclador y se almacena en recipientes herméticos (hasta por una semana).

Tabla B.4. Mezcla de arena en verde

<i>Insumo</i>	<i>Proporción</i>
<i>Arena nueva de sílice granulometría: "50 – 100"</i>	<i>100 kg</i>
<i>Bentonita sódica activada (arcicol)</i>	<i>10 kg</i>
<i>Dextrina (fécula de maíz precocida)</i>	<i>1kg</i>
<i>Agua limpia</i>	<i>2.5 kg</i>

Fuente: Rueda, Luis

b. Arena de contacto reciclada

En la Tabla B.5, se muestran los insumos necesarios para obtener una arena de contacto de características adecuadas empleando arenas reutilizadas de coladas anteriores. Reutilizar arenas implica tener control sobre las propiedades de las arenas recicladas. Uno de los parámetros que se controla es el contenido de bentonita en las arenas recicladas, por ello, en la proporción se indica que debe agregarse:

$$\%bentonita = 14kg - x$$

Donde "x", es la cantidad de arcilla activa presente en la arena reciclada. En el Anexo B.3 se explica un ensayo práctico que debe realizarse para verificar este contenido. Para preparar esta mezcla hace falta mezclar los componentes durante 5 minutos aprox. (en una mezcladora, 150 vueltas) para guardarla en envases herméticos, posteriormente.

Manualmente, se debe mezclar con una pala hasta homogeneizar.

Tabla B.5. Mezcla de arena, incluyendo arena reciclada.

<i>Insumo</i>	<i>Proporción</i>
<i>Arena reciclada</i> ³⁶	<i>80 kg</i>
<i>Arena nueva de sílice granulometría: 50 – 100</i>	<i>20 kg</i>
<i>Bentonita</i>	<i>14kg - x</i>
<i>Agua limpia</i>	<i>3.5 kg</i>

Fuente: Rueda, Luis.

³⁵ Si se prepara manualmente, debe mezclarse hasta su homogeneización.

³⁶ Es importante conocer el porcentaje de arcilla activa. En el Anexo B.3 se muestra a detalle el ensayo de Azul de Metileno para determinar la cantidad de bentonita activa.

c. Arena de relleno:

En la Tabla B.6 se muestran los insumos necesarios para conseguir una arena de relleno con propiedades y características adecuadas. La bentonita, parámetro que debe ser controlado, puede estar presente en las arenas recicladas y haya que agregársele menos cantidad.

Para prepararlas, se deben mezclar los insumos aproximadamente 5 minutos (150 vueltas en una mezcladora) para guardarlas en envases herméticos.

Tabla B.6. Mezcla de arena de relleno.

<i>Insumo</i>	<i>Proporción</i>
<i>Arena reciclada</i>	<i>100 kg</i>
<i>Bentonita</i>	<i>7kg</i>
<i>Agua limpia</i>	<i>1.8 kg</i>

Fuente: Rueda, Luis.

d. Arena de silicato de sodio (ideal para fabricar machos o corazones)

En la Tabla B.7, se muestran los insumos necesarios para constituir la mezcla para machos. Su preparación consiste en mezclar todos los insumos en una mezcladora por 4 minutos o 120 vueltas. Posteriormente, se guarda en envases herméticos.

Tabla B.7. Mezcla para machos

<i>Insumo</i>	<i>Proporción</i>
<i>Arena nueva de sílice granulometría: 50 – 100</i>	<i>100 kg</i>
<i>Silicato de sodio (grado 1:2.4, densidad aprox. 1.5kg/l)</i>	<i>4.5 kg</i>
<i>Plombagina</i>	<i>1 kg</i>

Fuente: Rueda, Luis

B.6 Moldeador automático



Figura B.4. Máquina de moldeo MULTIFLEX.

Fuente: SCOVAL. Visto en: <http://www.scoval.fr/soluciones-moldeo-arena-verde/maquina-moldeo-multiflex/?lang=es>

Las máquinas de moldeo MULTIFLEX cuentan con 4 tipos de cabezales y se adaptan tanto para moldeo manual como para moldeo completamente automatizado. Su secuencia de operaciones, que se muestra en la Figura B.5, consiste en:

- Recepción de la cantidad de arena pre – pesada (cae sobre el chasis).
- Caída de la cabeza de compresión.
- La presión de la cabeza y la subida de la cabeza inferior permiten una compresión óptima de la arena.
- Subida de la cabeza de compresión.
- Subida de la cabeza inferior guiada por 4 gatos hidráulicos.

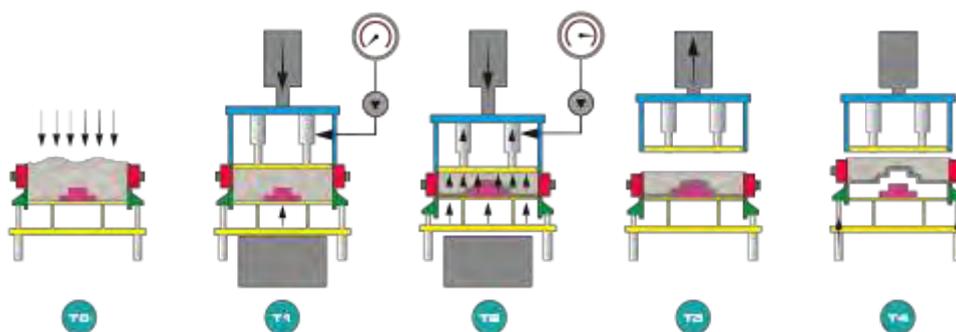


Figura B.5. Secuencia de moldeo de la máquina de moldeo MULTIFLEX.

Fuente: SCOVAL. Visto en: <http://www.scoval.fr/soluciones-moldeo-arena-verde/maquina-moldeo-multiflex/?lang=es>

B.7 Cálculo de sistemas de alimentación y distribución

Es la forma de diseñar la fabricación de un molde en el cual se pretende vaciar un metal o aleación líquida, para que solidifique siguiendo la orientación que el fabricante desee. Su objetivo principal es gobernar la solidificación en un molde o matriz a través de la determinación de la parte (o partes, en ocasiones) de la pieza que tarda más en enfriarse.

Ejercicio propuesto

Se quiere moldear una barra de 120 cm * 18 cm * 10 cm, para obtener un acero equivalente a un AISI 316 fundido. Calcule el número mínimo de mazarotas necesario y la ubicación de las mismas (alcance), como también el tamaño de cada mazarota para garantizar la obtención de una barra sana después de fundir y vaciarla.

Solución

Se va a fundir una barra en acero inoxidable. Es recomendable indicar que el modelo de la pieza debe estar construido en madera o aluminio, pero aumentando en un 2% en todas sus dimensiones longitudinales, o sea que la pieza realmente solicitada es de $120 * 0.98 = 117.6 \text{ cm}$, $18 * 0.98 = 17.64 \text{ cm}$ y $10 * 0.98 = 9.8 \text{ cm}$; esto debido a la contracción lineal que experimenta casi todo metal al vaciarlo y solidificar (en la mayoría de casos es del 1% al 2%).

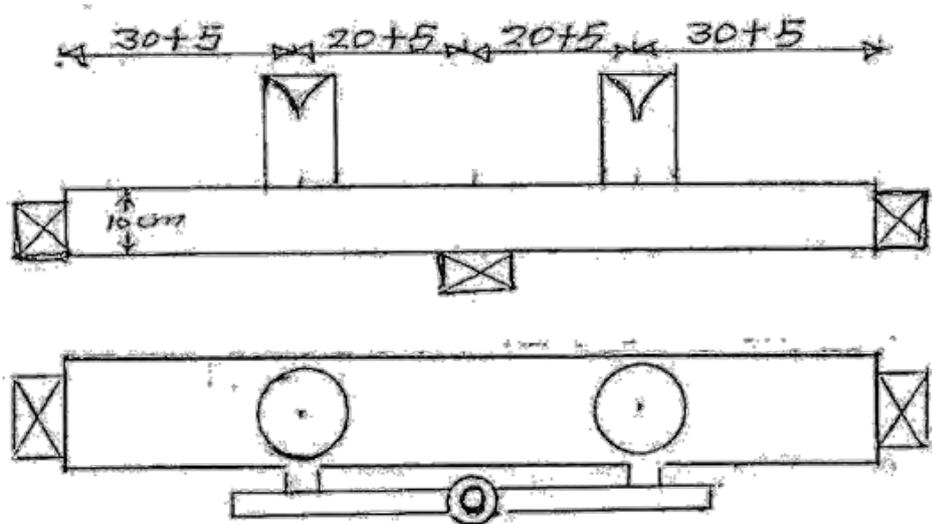


Figura B.6. Distribución de mazarotas y alimentadores.

Fuente: Rueda, Luis Fernando, 2011.

Alcance: Se requiere como mínimo dos mazarotas. Se debe colocar un enfriador en cada extremo y otro en el medio en la base de la barra (en total tres enfriadores que puedan ser tres cubos macizos de fundición gris de unos 5 kg cada uno).

Tamaño de cada mazarota: Se calcula hallando primero el módulo de la pieza o parte de la pieza que ella debe alimentar (en este caso cada mazarota deberá responder por la sanidad de media barra) y luego se multiplica ese módulo de la pieza por un factor que va de 0,6 a 1,2 dependiendo del metal a vaciar. Cuando no se conoce ese factor se puede usar 1,1 para que la mazarota sea efectiva y garantice la sanidad de la pieza³⁷. Por lo general, para aceros el factor empleado es 1,1 y en casos extremos 1,2.

$$M_{pieza} = \frac{V}{S}$$

- V Volumen de la pieza o parte de la pieza que ha de alimentar la mazarota.
S Sumatoria de todas las superficies que extraen calor que tocan las paredes del molde.

Por tanto:

$$M_{pieza} = \frac{60 * 10 * 18cm^3}{2(60 * 18) + 2(60 * 10) + (10 * 18)cm^2}$$

$$M_{pieza} = 10800 cm^3 / 3540cm^2$$

De donde:

$$M_{pieza} = 3,05 cm$$

Así mismo:

$$M_{mazarota} = (3,05cm) * 1,1 = 3,36 cm$$

Tabla B.8. Módulo de mazarota para hallar su diámetro y altura³⁸.

M	Φ_{cm}	h _{cm}
0.8	3.73	5.6
1	4.6	6.9
1.2	5.7	8.4
1.5	7	10.5
2	9.2	14
2.5	11.6	17.4
3	14	21

Fuente: Elaboración propia.

³⁷ Si el metal a colar acepta un factor menor, se economizará el material por lo que el sistema será más. Pero por ningún motivo se debe comprometer la sanidad de la pieza por economizar el procedimiento.

³⁸ La Tabla B.8 se obtiene a partir de las fórmulas: $M = 3/7 r$ y $H = 1.5\phi = 3r$

Con este valor hallado del módulo de la mazarota, se busca en la Tabla B.8 el tamaño aproximado del diámetro o radio de la misma, y también su altura. Se recomiendan mazarotas cilíndricas de altura $h=3$ veces el radio de la misma, cubiertas por encima con polvo exotérmico.

Para este caso cada mazarota tendrá las siguientes dimensiones:

Diámetro = 17,5 cm y Altura = 26 cm

Si no se emplea la Tabla B.8, se puede despejar con mayor precisión el valor del radio de la mazarota en la misma fórmula de su módulo y con el radio, se determina el diámetro y la altura de la misma. Como es de esperarse, se obtienen valores muy cercanos a los extraídos de la Tabla B.8.

$$M_{\text{mazarota}} = \frac{V}{S} = \frac{\text{(volumen del cilindro } h = 3r)}{\text{superficie cilíndrica y superior del mismo cilindro, que extraen el calor}}$$

$$= 3,36 \text{ cm} = \frac{\pi r^2 3r}{\pi^2 r 3r + \pi r^2} = \frac{3r^3}{6r^2 + r^2} = \frac{3r}{6 + 1} = \frac{3r}{7}$$

Por tanto, como $3.36 \text{ cm} = (3/7) * r$, entonces $r=7.84$, y con este valor la mazarota será de diámetro igual a 16cm y la altura son valores muy cercanos al de la Tabla B.8.

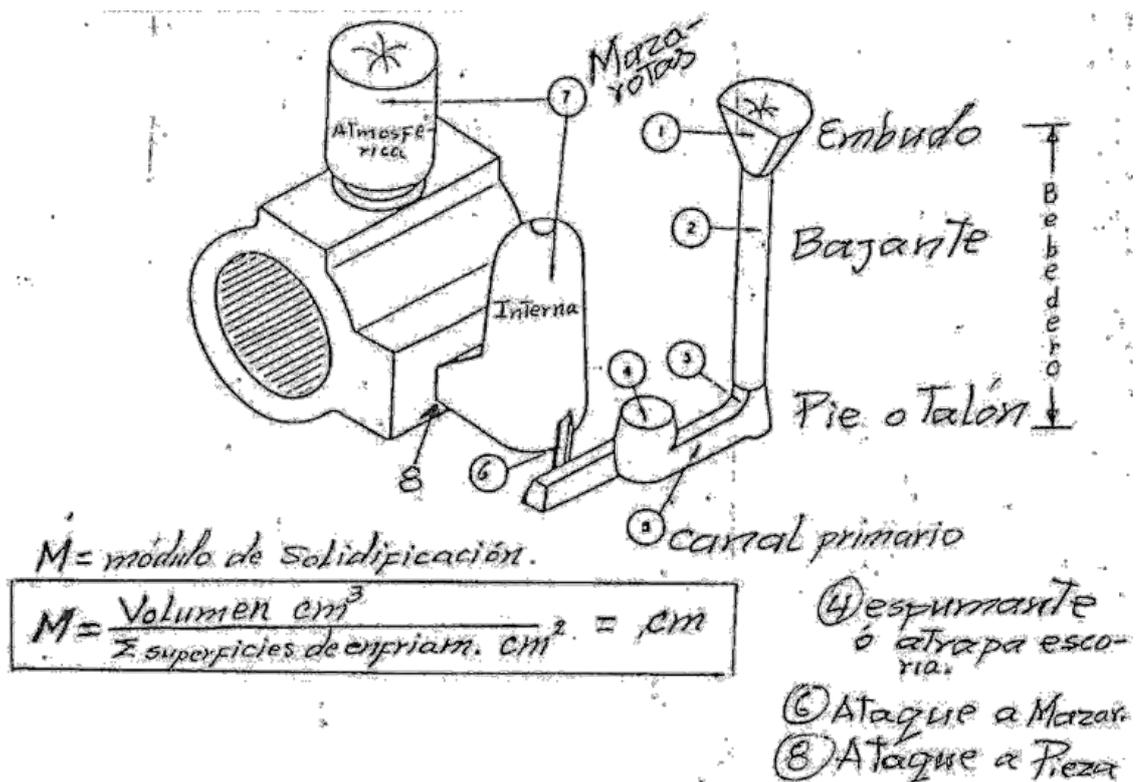


Figura B.7. Ejemplificación de un modelo con mazarotas y bebederos.

Fuente: Rueda, Luis Fernando, 2011.

Anexo C

C.1 Encuesta de la etapa de moldeo

ENCUESTA DIRIGIDA A EMPRESAS DE FUNDICIÓN DEL NORTE DEL PERÚ

Con esta encuesta se espera caracterizar el entorno y la manera cómo operan las Fundiciones del Norte del Perú, con respecto a: I) *Aprovisionamiento de materias primas e insumos y el seguimiento hecho a su calidad*; II) *Procedimiento de moldeo y manejo y control de las arenas de moldeo*; III) *Proceso de fusión y vaciado de metal*.

Esta encuesta es adelantada por la Universidad de Piura con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

De antemano agradecemos su colaboración.

CARACTERIZACIÓN GENERAL

1. Fecha: _____, Ciudad: _____
2. Nombre de la empresa: _____
3. Nombre de la persona que responde la encuesta: _____
4. Cargo de la empresa: _____
5. Nivel de formación alcanzado: _____
6. ¿La empresa está afiliada a alguna cámara industrial o sectorial?
 SÍ___ NO___ ¿Cuáles? _____
7. Según la cantidad producida, indique los tipos de piezas más representativos que fabrican:

8. Mencione las aleaciones con las cuales trabajan, si recurren a alguna norma indicarlas también y los kilogramos mensuales promedio producidos de cada una:

9. ¿Número de operarios en su empresa? _____
10. Nivel de formación promedio del personal. Indicar porcentaje o número:
 Empírico ___ Bachiller ___ Técnico ___ Tecnológico ___ Ingeniero ___
11. En orden de importancia, mencione los sectores para los cuales trabaja su empresa: _____

MATERIAS PRIMAS, INSUMOS Y SU CALIDAD

12. De los productos relacionados en la tabla, indique cuales son utilizados en su empresa, si aplica alguna normatividad o criterio para controlar la calidad a la recepción o al inicio, cuando está en proceso de definir un nuevo proveedor.

Materia prima o insumo	Controla calidad a la recepción	Controla calidad al seleccionar nuevo proveedor	Norma aplicada y/o criterio seguido
Coque			
Refractarios			
Alta alúmina			
Magnesita			
Sílice			
Otros			
Chatarra de hierro			
Chatarra de acero			
Ferroaleaciones			
Chatarra de aluminio			
Aluminio, aleaciones			
Chatarra de cobre			
Cupro aleaciones			
Arena de sílice			
Arena de cromita			
Arena de olivina			
Bentonita			
Silicato de sodio			
Resinas de moldeo			
Carbonita (polvo de carbón)			
Pinturas refractarias			
Fundentes			
Exotérmicos			
Otros:			

MOLDEO Y CONTROL DE ARENAS

13. Mencione las granulometrías de la arena utilizada para los moldes destinados a vaciar piezas en fundición de hierro: _____
-
14. Mencione la granulometría de las arenas empleadas para los moldes destinados a vaciar no ferrosos. ¿Cómo las elije? _____
-
15. ¿Realiza controles rutinarios a las arenas de moldeo en ‘verde’?
 SÍ ____, NO ____
 ¿Cuáles? _____

16. Mencione los procesos de moldeo utilizados. Para cada uno de ellos, indique de manera abreviada el procedimiento seguido. _____

17. ¿Qué tipo de equipo y/o herramientas utiliza para el mezclado de las arenas en 'verde'? _____
18. Describa el procedimiento seguido en la preparación de las arenas de moldeo en 'verde' nuevas. _____
19. Describa el procedimiento seguido en la preparación de las arenas de moldeo en 'verde' de recirculación. _____

20. Mencione las resinas y/o agente aglutinante empleados en la fabricación de matachos. _____
21. Mencione los equipos y/o herramientas utilizadas en la fabricación de matachos. _____
22. Describa el procedimiento seguido para la preparación de las mezclas de arena para matachos. _____

FUSIÓN Y VACIADO

23. Porcentaje de rechazos del total vaciado en su empresa: _____
24. Enumere los tipos de defectos que generan rechazo a las piezas producidas en su empresa y las causas que las provocan.

Tipos de defecto	Posibles causas
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

25. ¿Realiza tratamientos térmicos a las piezas que funden?
 SÍ ___ NO ___
26. Si su respuesta es afirmativa, mencione dichos tratamientos. _____

27. ¿Calcula el sistema de solidificación de la pieza a vaciar (canales de alimentación, mazarotas, enfriadores)?
SÍ _____ NO _____
28. Si su respuesta es afirmativa: mencione el procedimiento seguido.

29. ¿Realiza controles a la sanidad externa e interna de la pieza fundida?
SÍ _____ NO _____
30. Si su respuesta es afirmativa, indique dichos controles: _____
31. Mencione los tipos de hornos que utiliza para fundir sus aleaciones con la respectiva capacidad. _____

32. Indique los tipos de cucharas empleadas para repartir el metal a los moldes.

33. ¿Desoxida o desgasifica el metal previo al vaciado?
SÍ _____ NO _____
34. Si su respuesta es afirmativa, mencione cómo lo hace según el tipo de aleación.

35. ¿Mide la temperatura antes de vaciar el metal?
SÍ _____ NO _____
36. Si su respuesta es afirmativa, ¿con qué tipo de instrumento lo hace?

37. ¿Realiza análisis de composición antes y después del vaciado?
SÍ _____ NO _____
38. Según el diseño del molde, ¿conoce ud. cuál es el rendimiento metalúrgico según el tipo de aleación?
SÍ _____ NO _____

C.2 Análisis de costos del taller 2

Uno de los problemas que se presentan en las micro y pequeñas empresas es el desconocimiento en cuanto a costos del proceso de producción. Las empresas que participan en este proyecto, en la mayoría de casos, no tienen certeza de la rentabilidad que genera a su empresa el proceso que están aplicando. Con el fin de aclarar un poco este aspecto, se ha realizado un análisis de costos con los datos que ha sido posible obtener de los talleres.

Tabla C.1. Estructura mensual de costos fijos y variables unitarios del horno pequeño del taller 4. (212.5kg de capacidad)

N°	DETALLE	COSTOS FIJOS UNITARIOS (S/.)	COSTOS VARIABLES UNITARIOS (S/.)
1	Materia prima		
	Chatarra de hierro gris		1.12
2	Mano de obra directa		
	Obrero contratado	0.18	
	Obrero 1		0.28
3	Combustibles		
	Carbón de piedra o antracita		0.24
	Leña		0.14
	Energía trifásica		0.084
4	Insumos		
	Fundente de escoria (piedra caliza)		0.075
	Desulfurante (carburo de calcio)		0.2611
	Ladrillo refractario		0.2315
5	Maquinaria y Equipo		
	Horno de cubilote	0.08	
	Ventilador	0.04	
TOTAL DE COSTOS (S/./kg de hierro fundido)		0.30	2.43

Fuente: Elaboración propia.

La matriz de costos que debe establecerse para calcular el flujo de ventas debe considerar: los costos directos e indirectos y clasificarlos como variables o fijos.

Por lo general, los costos directos fijos están relacionados a la mano de obra y al mantenimiento del horno de cubilote, mientras que las indirectas variables dependen de la energía trifásica que se consume, insumos, combustibles y materia prima. Este tipo de variables encarecen el proceso, reduciendo el margen de ganancia por kg. de hierro fundido.

En la Tabla C.1, se muestra la estructura de costos resultado de los datos proporcionados por el taller 2. A partir de la aplicación de esta matriz para cada una de las empresas, se ha encontrado lo que se presenta en el cuadro resumen de la Tabla C.2.

En general el margen de ganancia de las 8 empresas (de las cuales tres de ellas cuentan con dos hornos: taller 4, taller 4 y taller 5) oscila entre -0.72 S/kg (Taller 6 – horno grande, Chiclayo) y 8.95 S/kg (Taller 5 – horno pequeño, Chiclayo).

Esta estructura de costos referencial sirve para evaluar si la empresa reporta ganancias o pérdidas. En un taller se encontró que el proceso reporta pérdidas (Taller 4 – horno grande) y 07 de estas empresas reportan una ganancia que oscila entre 0.5 y 2.9 soles por kilogramo de hierro fundido, siendo las más rentables 3 en las que el margen de ganancia oscila entre 3.53 (Taller 4 – horno pequeño) y 8.95 (Taller 5– horno pequeño).

Tabla C.2. Comparación de los 8 talleres dentro del análisis de costos

Empresa	Ciudad	Número de trabajadores contratados	Frecuencia de producción	Precio venta (S/ por kg)	Costo total (S/./kg)
Taller 1	Piura	1	mensual	4	3.06
Taller 2	Sullana, Piura	2	mensual	2.85	Horno pequeño: 2.7 / Horno grande: 2.3
Taller 4	Chiclayo	7	semanal	10	Horno pequeño: 10.72 / Horno grande: 6.47
Taller 5	Chiclayo	5	quincenal	10	Horno pequeño: 7.19/ Horno grande: 1.05
Taller 7	Trujillo	5	semanal	5	3.61
Taller 8	Trujillo	2	mensual	3.5	2.70
Taller 10	Trujillo	6	semanal	8	6.47 (S/./plancha)

Fuente: Elaboración propia

Anexo D

D.1 Muestras de las arenas recolectadas del norte del Perú.

1. Piura (Castilla y Sullana)

Dos de los tres fundidores de Piura se procuran su arena mediante proveedores que les llevan a sus talleres. Según los proveedores, la cantera está ubicada en el distrito de Castilla. No proporcionaron un punto exacto de localización.

De estas arenas, se obtuvieron dos muestras de arena virgen utilizadas en el moldeo de las fundiciones muestras que tenían los fundidores y se utilizaron para la elaboración de los ensayos de

Dos fundidores de Sullana facilitaron muestras de arena de fundición. Las canteras de las que se abastecen son: Costado del cementerio de Sullana y Nariz del Diablo

Las diferentes muestras han sido guardadas como se muestra en la Figura D.1.



Figura D.1. Muestras de Castilla 1 y 2. PIURA

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017.

2. Lambayeque (Reque)

La cantera está ubicada en un cerro localizado en el distrito de Reque, de la cual se obtuvo dos muestras de arena virgen utilizada en la fundición de dicha localidad. El punto localizado por el equipo investigador no era el real, por ello se tomaron dos muestras posteriormente acompañados del Gerente del Taller 5, quien condujo al equipo investigador al lugar exacto de donde se extrajeron dos muestras cuya identificación de las probetas es Reque 1N y Reque 2N. La N es la letra que indica que es el nuevo punto de extracción de muestras.

En Lambayeque, se obtuvo otra muestra del Taller 4, quien compra la arena de moldeo a un proveedor y no sabe de dónde la extrae. La identificamos como “Muestra identificada por proveedor”.



Figura D.2. Primeras muestras que se obtuvieron de Reque 1 y 2.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017

3. La Libertad (Trujillo)

Las fundidoras locales obtienen la arena para fundición de canteras ubicadas en Chepen, Moche y La Esperanza. Se recogieron muestras de arenas vírgenes de la cantera de Moche, la misma que se presentan en la Figura D.3.



Figura D.3. Muestra de MOCHE.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017

D.2 Ensayos para determinar las características de las muestras de arena.

a. Ensayo de humedad:

Para determinar el porcentaje de humedad se utilizan los siguientes equipos y materiales:

- Horno para temperatura hasta 1200°C con una variación máxima de $\pm 5\%$.
- Balanza electrónica.
- Platos.
- Cucharas.

El procedimiento consiste en colocar en bolsas herméticas las muestras para evitar las pérdidas de humedad. Luego, se pesa cuidadosamente en una balanza electrónica. Para este ensayo se necesitan 150 g muestra, la misma que se deposita en un recipiente resistente al calor.

Se coloca la muestra en un horno a una temperatura constante de 110 °C por un tiempo determinado (aproximadamente, 15 minutos. Se puede ir aumentando el tiempo gradualmente observando el resultado hasta obtener arena seca). Por último, se pesa nuevamente la arena seca.

El porcentaje de humedad se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\%H = \frac{W - W_{seca}}{W} * 100$$

Donde:

- %H: Porcentaje de humedad
- W: Peso en gramos de la arena húmeda
- W_{seca}: Peso en gramos de la arena seca.

b. Determinación de arcilla y sílice (método por decantación):

Para determinar el porcentaje de arcilla y sílice se utilizan los siguientes equipos y materiales:

- Horno para temperatura hasta 1200°C con una variación máxima de $\pm 5\%$
- Balanza electrónica
- Platos
- Cuchara
- Solución de pirofosfato de sodio al 1.5%

El procedimiento consiste en extraer una muestra de arena seca obtenida del ensayo de determinación de humedad, se deposita en un recipiente que resistente altas temperaturas y se procede a preparar la solución, un vaso de precipitado será llenado con 25 ml de solución de pirofosfato de sodio al 1.5%. Si la arena de fundición tiene algún tipo de aglomerante o aglutinante se debe lavar con agua destilada.

Luego de mezclar bien, se agrega 450 ml de agua destilada a la solución³⁹. Se agita la muestra de arena de moldeo con la solución durante un tiempo de 5 minutos, aproximadamente. Posteriormente, se deja sedimentar durante un periodo de 10 minutos para luego decantar el líquido.

Se repite el proceso cuantas veces sea necesario hasta que el líquido de enjuague sea completamente claro. Se seca la muestra en el horno a 110 °C durante una hora aproximadamente y se pesa la muestra resultante libre de arcilla cuando se encuentra a temperatura ambiente.

Para determinar el porcentaje de arcilla, se emplea la siguiente fórmula:

$$\%A = \frac{A - a}{A} * 100$$

Donde:

%A: porcentaje de arcilla.

A: Peso en gramos de la arena antes de secar.

a: Peso en gramos de la arena ya seca y sin arcilla.

c. Índice de finura:

Para determinar el índice de finura de las muestras se emplearon tamices como los que se muestran en la Figura D.4.



Figura D.4. Tamices de arena.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017

El procedimiento es el siguiente:

- Se coloca una muestra de arena en una pila de tamices.
- La serie de tamices(AFS) es la siguiente: 6, 12, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270. Cada tamiz va asociado a un factor K: 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200 y 300
- Se pesa el material retenido en cada tamiz.
- Se calcula el índice de finura mediante la siguiente fórmula:

³⁹ Esta solución tiene como única función impedir que las partículas de arcilla se acumulen formando granos gruesos, que de otra manera se depositarían rápidamente

$$IF = \frac{\sum p_i * K_i}{\sum p_i}$$

Donde:

IF : Índice de finura

p_i : porcentajes sobre el total de los tamices individuales

K_i : Factor K

D.3 Descripción del marinete

- Consta de un vástago, un contrapeso, un cilindro contenedor y un contrapeso adicional. El vástago, el contrapeso principal y el adicional, pesan en conjunto, aproximadamente, de 17 libras (7.9383 kg), peso requerido para el ensayo de permeabilidad. Para los demás ensayos de propiedades; tales como de compresión en verde, en seco, de corte, etc., se usan el peso del contrapeso principal y del vástago, aproximadamente, 6.67 kg.
- Las probetas que se obtienen son de 2 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura, según requiere la norma AFS. La altura de la probeta a conformar se consigue al agregar entre 150gr – 190gr de la muestra de arena de fundición sin compactar (ya humedecida con la cantidad de agua requerida calculada) dentro del contenedor.
- Para conformar las probetas estándar, es necesario elevar el émbolo a una altura de dos pulgadas sobre la muestra en el contenedor. Dicha altura se obtiene elevando el émbolo y haciendo coincidir la parte superior del vástago con la parte superior del contenedor. Una vez elevado, se libera para que caiga libremente sobre la muestra de arena. Este proceso se repite tres veces. Para el ensayo de permeabilidad se unen los tres elementos vástago contrapeso principal y adicional, y para las probetas de los demás ensayos solo se utilizan el vástago y el contrapeso principal.



Figura D.5. Marinete fabricado en el Laboratorio de Suelos. Marinete simple (sin contrapeso para elaboración de probetas).

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017



Figura D.6. Marinete con el contrapeso adicional en la parte superior.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017



Figura D.7. Partes del marinete.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017.



Figura D.8. Probeta estandarizada según la norma AFS.

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017.

D.4 Ensayos para determinar las propiedades de las arenas naturales.

a. Ensayo de permeabilidad:

Para llevar a cabo este ensayo se emplearon probetas estándar y un permeámetro (ver Figura D.9), cuyo procedimiento de trabajo se describe a continuación:

- Primero, quitar el seguro del contenedor e inserta la probeta a ensayar. Luego, se asegura la probeta colocando el pasador en el contenedor nuevamente.
- Con la válvula abierta; se procede a elevar el mango del inflador para succionar el volumen de aire para realizar el ensayo.
- Una vez succionado el volumen de aire, se cierra la válvula (punto rojo en el esquema). Se cierra la válvula para poder calcular la presión máxima ejercida en el instante en que se coloca el peso en el recipiente. El flujo de aire seguirá las flechas rojas del esquema, desde el inflador hacia el manómetro.
- Una vez anotada la presión máxima, se procede inmediatamente, a abrir la válvula (indicador en el punto verde). En el instante en que se abre la válvula también se debe tener en cuenta la presión en el trayecto de bajada del émbolo y cronometrar el tiempo que tarda en pasar el flujo de aire a través de la probeta, es decir el tiempo en que desciende totalmente el mango del inflador. Las flechas verdes grafican el paso del aire al abrir la válvula de paso.

Teniendo ya todos los parámetros, se procede a calcular el índice de permeabilidad, ateniendo a la siguiente fórmula:

$$i \left[\frac{cm}{min} \right] = \frac{V \cdot h}{P \cdot S \cdot T}$$

Donde:

V: volumen de aire conocido que ha de pasar a través de la probeta de arena.

H: altura de la probeta (5.08cm).

S: sección transversal de la probeta (20.268cm²).

P: presión ejercida por un peso constante (cm de agua).

T: tiempo que le toma al volumen conocido atravesar la probeta de arena (min).

i: índice de permeabilidad (cm/min).

- Finalmente, para retirar la probeta ensayada, se abre la válvula de paso y se succiona el aire, se retira el seguro del contenedor y se hace descender

el mango del inflador rápidamente para que la probeta salga expulsada o se eleve y sea más fácil atraparla y retirarla.

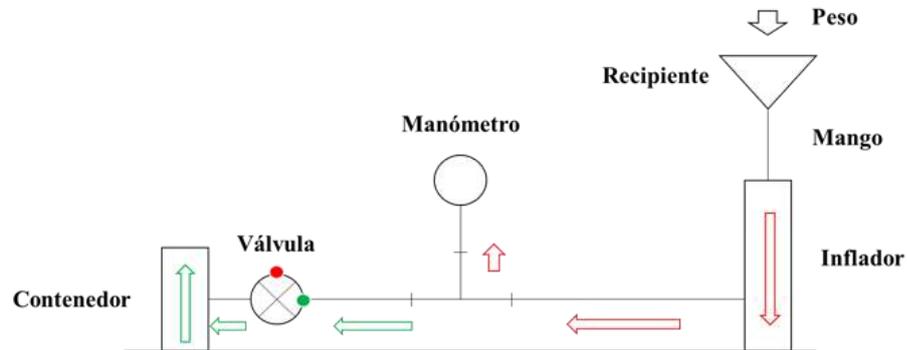


Figura D.9.Esquema del permeámetro.
Fuente: Elaboración propia.

b. Ensayo de compresión y deformabilidad:

Para este ensayo se necesitan probetas estandarizadas según la norma AFS. Las probetas ensayadas secan al aire libre 24 horas, en cambio, las probetas para el ensayo en verde se procedieron a ensayar inmediatamente después de ser conformadas.

Una vez conformadas las probetas, se procede a ensayarlas en la máquina de compresión no confinada SOILTEST U-160-0-1 (Ver Figura D.10). Este equipo posee un sistema de avance proporcionado por un tornillo sinfín y una polea y también dos relojes comparadores que proporcionarán la carga y la deformación.

Se coloca la probeta en la máquina y se gira la perilla a una velocidad constante (una vuelta en 10 s). Previamente, se fija los relojes comparadores en un cero inicial. Cuando el reloj de carga comienza a girar se debe tener en cuenta el avance que el reloj de deformación lleva registrando.

Estos equipos permiten el cálculo de las cargas de corte y compresión como también la deformación que ocurre simultáneamente en cada ensayo.



SOILTEST U-160-0-1

El reloj ubicado en la parte superior proporciona la carga multiplicado por un factor de 0.44kg.



SOILTEST U-160-0-1

El reloj ubicado en la parte inferior arroja el valor de la deformación multiplicado por un factor 0.001”.

Figura D.10. Máquina de compresión no confinada SOILTEST U-160-0-1

Fuente: Laboratorio de Mecánica, 2017

Se debe tener en cuenta que el dispositivo falla cuando la aguja del reloj de carga deja de avanzar y empieza a retroceder. En el instante de cambio de sentido de la aguja del reloj se debe registrar el avance del reloj de deformación.

D.5 Resultados de los análisis de muestras de canteras de Sullana obtenidos en la UNAL.

No.

	INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	Código: FAR-001
	LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA	Versión: 00 Solicitud: 01 – 17

<p>Solicitado por: Dra. Ing. Rosalba Guerrero A. Dirección: Universidad de Piura. Av. Ramón Mugica 131, Piura, Perú. Número de solicitud: 01 – 17 Número de muestras: 2(Dos) Fecha de recepción: 20 de octubre del 2017 Fecha de análisis: 27 de octubre del 2017.</p>

Identificación de la muestra	Tipo de muestra	Código de muestra
Muestra de arena, 2 kg	Arena natural	Nariz del Diablo, ND – 0117
Muestra de arena, 2 kg	Arena natural	Costado del Cementerio, CC – 0117

Código de la muestra	Parámetro	Resultado	Método	Norma
ND - 0117	Permeabilidad	4.35	Permeámetro	AFS
	σ_{cv} , psi	14.5	Máquina universal de peso muerto	AFS
CC - 0117	Permeabilidad	22.78	Permeámetro	AFS
	σ_{cv} , psi	11.6	Máquina universal de peso muerto	AFS