



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

IMPACTO DEL DISEÑO DEL CUBILOTE Y USO DEL COMBUSTIBLE EN LA CALIDAD DE LAS FUNDICIONES GRISES DEL NORTE PERUANO

Jorge Morales-Seminario

Piura, marzo de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Morales, J. (2019). *Impacto del diseño del cubilote y uso del combustible en la calidad de las fundiciones grises del norte peruano* (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



“Impacto del diseño del cubilote y uso del combustible en la calidad de las fundiciones grises del norte peruano”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Jorge Diego Morales Seminario

Asesora: Dr. Ing. Rosalba Guerrero Aslla

Piura, 22 de marzo de 2019

A mi madre Ana Quellí, por hacerme un hombre de bien, a mi abuelita Doris por su cariño, a mis tíos y a mis primos por la fortaleza entregada. Al apoyo incondicional de mis amigos Yajaira, Rosita, Jan, y a todos aquellos que de alguna manera aportaron a este logro. Pero sobre todo, a Dios por las bendiciones infinitas que me ha entregado.

Prólogo

El sector metalúrgico nacional está en la continua necesidad de optimizar sus procesos de producción para la reducción de costos y la certificación bajo estándares internacionales de calidad como medio para alcanzar nuevos mercados. En la producción industrial de piezas de fundición ferrosa vaciadas en arena es frecuente la obtención de un porcentaje de productos con discontinuidades indeseables para su aplicación y funcionamiento. Muchos de estos defectos tienen su origen en el proceso de fusión y características del horno de cubilote usado para este proceso, al igual que el combustible y son de difícil detección al presentarse en zonas sub-superficiales de la pieza, lo que puede generar una falla en servicio y el desprestigio del taller que la fabricó.

Ante este escenario, en la Universidad de Piura se ha desarrollado el proyecto “Impulso de la industria manufacturera de aleaciones férreas 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”, dentro del cual se ha desarrollado esta tesis.

En este trabajo se busca estudiar la incidencia del diseño y operación del horno de cubilote y el uso del combustible sobre la aparición de defectos que surgen en las piezas de fundición gris laminar obtenidas en el norte del Perú y proponer procesos de mejora que permitan obtener productos de mayor calidad y para atender la demanda de piezas requeridas por la industria norteña que, actualmente, es atendida en los talleres de la capital o mediante la importación.

Se hace un especial agradecimiento a CONCYTEC a través de FONDECYT, ente financiador del proyecto que ha permitido el desarrollo de la tesis, a la Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla, coordinadora general del proyecto y asesora de esta tesis, así como al Mgtr. Ing. Jorge Yaksetig Castillo y al Ing. César Dioses Gutierrez, quienes, con mucha generosidad, guiaron hacia su objetivo principal, esta investigación.

Resumen

La industria manufacturera de aleaciones del norte peruano presenta deficiencias en cuanto al cumplimiento de estándares de calidad. En esta tesis se han estudiado las características de diseño y operación de nueve hornos de cubilote pertenecientes a siete talleres colaboradores del proyecto, se han caracterizado e identificado los defectos de fusión de catorce muestras de fundición gris laminar y dos muestras del carbón usado como combustible.

Los resultados muestran que la mayoría de hornos no cumple con el correcto dimensionamiento y diseño, lo cual genera defectos del tipo macroscópico, los cuales se han identificado en la mayoría de piezas analizadas. Además, el inadecuado dimensionamiento de los hornos de cubilote que emplean, repercute sobre la eficiencia de su proceso aumentando costos y disminuyendo la productividad de sus pequeños talleres. Por otra parte, el elevado porcentaje de azufre detectado en la mayoría de las catorce muestras analizadas, no corresponde con la composición química de las chatarras utilizadas; sin embargo, se relaciona con el elevado contenido de azufre presente los combustibles utilizado por los talleres. Se plantean mejoras que solucionen estos problemas sin que su aplicación resulte onerosa para la economía de los talleres.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 Diseño y funcionamiento del horno de cubilote	3
1.1. Influencia del combustible en las propiedades de las fundiciones grises.....	3
1.1.1. Fundiciones grises	3
1.1.2. Características de los combustibles	7
1.1.3. Mecanismo de influencia del combustible sobre la fundición gris	10
1.2. Diseño y materiales del horno de cubilote.....	13
1.2.1. Diámetro interior (D_i)	16
1.2.2. Capacidad de fusión o producción (C_i)	16
1.2.3. Altura del horno (H)	16
1.2.4. Altura efectiva del horno (H_e)	16
1.2.5. Índice de precalentamiento (I_p).....	16
1.2.6. Toberas	17
1.2.7. Mirillas.....	18
1.2.8. Altura del crisol (H_{crisol}).....	18
1.2.9. Conductos de aire (A_c).....	19
1.2.10. Caja de viento (A_{cv})	19
1.2.11. Altura de la caja de viento (h_{cv}).....	19
1.2.12. Altura de las toberas (h_t).....	19
1.2.13. Altura del orificio de escoriado (C).....	20
1.2.14. Piquera de escoriado.....	20
1.2.15. Orificio de sangrado	20
1.2.16. Piquera de sangrado.....	20
1.2.17. Apagachispas	20

1.2.18.	Volumen de aire	20
1.2.19.	Ventilador centrífugo	20
1.2.20.	Revestimiento refractario	21
1.2.21.	Diámetro externo (D_e)	22
1.2.22.	Placa base	23
1.2.23.	Puerta de descarga	23
1.2.24.	Columnas de apoyo	24
1.2.25.	Cimentación	24
1.3.	Funcionamiento del horno de cubilote.....	24
1.3.1.	Zona de precalentamiento	25
1.3.2.	Zona de fusión.....	26
1.3.3.	Zona de gasificación o reducción.....	26
1.3.4.	Zona de combustión u oxidación	27
1.3.5.	Zona de crisol.....	29
Capítulo 2	Los hornos de cubilote en los talleres del norte del Perú.....	33
2.1.	Caracterización de los hornos de los talleres participantes.....	33
2.1.1.	Taller 1	33
2.1.2.	Taller 2	34
2.1.3.	Taller 3	36
2.1.4.	Taller 4	37
2.1.5.	Taller 5	38
2.1.6.	Taller 6	39
2.1.7.	Taller 7	40
2.2.	Descripción del funcionamiento de los hornos en el norte del Perú.....	41
2.3.	Diagnóstico de los hornos de cubilote en el norte del Perú.....	45
2.3.1.	Diagnóstico de los hornos de cubilote participantes.	45
2.3.2.	Diagnóstico de hornos de cubilote.	61
Capítulo 3	Incidencia del horno de cubilote y combustible en la calidad de las piezas obtenidas.	65
3.1.	Macrodefectos de fusión.....	65
3.1.1.	Cavidades	65
3.1.2.	Superficie defectuosa	67
3.1.3.	Fundición incompleta.....	68
3.1.4.	Inclusiones.....	69
3.2.	Impacto de las características de los hornos en la generación de defectos.....	70

3.2.1.	Taller 1.....	70
3.2.2.	Taller 3.....	71
3.2.3.	Taller 4.....	73
3.2.4.	Taller 5.....	74
3.2.5.	Taller 6.....	76
3.2.6.	Taller 7.....	77
3.3.	Influencia del combustible utilizado en la calidad de las piezas.....	80
3.3.1.	Comportamiento del azufre en el horno de cubilote.....	84
Capítulo 4 Propuestas de mejora.		91
4.1.	Hornos de cubilote.....	91
4.1.1.	Relacionado al dimensionamiento.....	91
4.1.2.	Relacionado al diseño.....	96
4.1.3.	Relacionado a la operación.....	102
4.2.	Selección y adquisición de combustible.....	110
4.2.1.	Especificaciones técnicas de antracita.....	110
4.3.	Tratamiento del caldo.....	111
4.3.1.	Desulfuración del caldo.....	111
Conclusiones		115
Bibliografía		119
Anexos		121
Anexo A: Clasificación de fundiciones férreas.....		122
Anexo B: ASTM A-48.....		123
Anexo C: Propiedades mecánicas de las fundiciones grises.....		129
Anexo D: Diagrama Fe-S.....		130
Anexo E: Diagrama Mn-S.....		131
Anexo F: Esquemático completo del horno de cubilote.....		132
Anexo G: Cimentaciones para horno de cubilote.....		133
Anexo H: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.....		134
Anexo I: Especificaciones técnicas de la antracita que venden en Trujillo.....		140
Apéndices		143
Apéndice 1: Micrografías de análisis de sulfuros.....		144
Apéndice 2: Esquemático de un sombrero chino.....		154
Apéndice 3: Esquemático de un supresor de chispas.....		155

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama Fe-C metaestable (líneas continuas) y Fe-C estable (líneas discontinuas).....	5
Figura 2. Fundición gris laminar (lado izquierdo). Fundición gris esferoidal (lado derecho).	5
Figura 3. Esquema de los cinco tipos de grafito laminar	6
Figura 4. Grafito nodular.....	7
Figura 5. Corte del horno de cubilote.....	11
Figura 6. Inclusiones de sulfuro de manganeso (gris oscuro, redondeado).....	12
Figura 7. Aparición de defectos en la fundición gris como función de la relación en contenido de azufre y manganeso.....	13
Figura 8. Efecto del azufre en la cantidad de células eutécticas y la profundidad de blanqueo para fundiciones grises inoculadas y no inoculadas.	13
Figura 9. Partes importantes del horno de cubilote convencional.....	14
Figura 10. Mirilla en horno de cubilote ubicado a nivel de tobera.....	18
Figura 11. Armado de revestimiento con ladrillos circulares de arcilla refractaria	22
Figura 12. Disposición de revestimiento para horno usando ladrillos convencionales.....	22
Figura 13. Zonas del horno de cubilote convencional.....	25
Figura 14. Diagrama idealizado que representa la composición de gases dentro del cubilote. Fuente: El horno de cubilote y su operación. American Foundrymen's Society (1985). ..	27
Figura 15. Efecto de la velocidad de aire y la inclinación de las toberas sobre la forma y la altura de la zona de oxidación o combustión.....	28
Figura 16. Relación entre la etapa de combustión y el porcentaje de pérdidas de silicio y manganeso	31
Figura 17. Balance de azufre en la fusión según el porcentaje de combustible en la carga	32
Figura 18. Horno de cubilote del Taller 1.	34
Figura 19. Horno de cubilote 01 del Taller 2..	35
Figura 20. Horno de cubilote 02 del Taller 2.	36
Figura 21. Horno de cubilote del Taller 3	37
Figura 22. Hornos de cubilotes del Taller 4.	38
Figura 23. Horno de cubilote del Taller 5.	39
Figura 24. Horno de cubilote del Taller 6.	40
Figura 25. Horno de cubilote del Taller 7	41

Figura 26. Procedimiento de sanado de refractario.....	42
Figura 27. Detalle de la conexión de la tubería que va desde el ventilador hasta el semi-anillo de viento.....	42
Figura 28. Ingreso de la materia prima por la parte superior del horno de cubilote.	43
Figura 29. Recepción del hierro fundido en una callana.....	44
Figura 30. Proceso de grandes trozos extracción de escoria en un molde abierto.	44
Figura 31. Horno de cubilote sin fondo con carga en exceso en el suelo.	45
Figura 32. Horno de cubilote de Taller 1	47
Figura 33. Detalle de la conexión del ventilador a la caja de viento.....	48
Figura 34. Mal sistema de alimentación de viento (amarillo). Chimenea y puerta de carga (rojo).....	51
Figura 35. Disposición del horno 01 del Taller 4.....	53
Figura 36. Sistema de alimentación de aire con conexión directa al ventilador..	54
Figura 37. Horno de cubilote mostrando sus fallas en el diseño.....	56
Figura 38. Horno de cubilote del Taller 6 mostrando las deficiencias más resaltantes.	
Fuente: Taller 3 en la ciudad de Trujillo.....	58
Figura 39. Interior del horno del Taller 7, distribución incorrecta del refractario.	60
Figura 40. Fragmento de una capa de cilindro de hierro, mostrando sopladuras que aparecieron durante el mecanizado	66
Figura 41. Sección de una caja de válvulas, mostrando sopladuras de escoria.....	67
Figura 42. Picaduras superficiales sobre hierro fundido.....	67
Figura 43. Hierro fundido mostrando rebabas.	68
Figura 44. Base de máquina de hierro fundido mostrando darts.....	68
Figura 45. Pieza de fundición gris con defecto de rotura.....	69
Figura 46. Cierre de válvula mostrando inclusiones metálicas dentro de una sopladura... ..	69
Figura 47. Hierro fundido mostrando inclusiones.....	70
Figura 48. Sección transversal, se muestra cavidades de forma irregular.....	71
Figura 49. Cavidades esféricas cercanas a las superficies.	71
Figura 50. Cavidades irregulares y rellenas sobre la superficie de la barra.	72
Figura 51. Cavidades sobre la superficie que han sido rellenas.....	72
Figura 52. Cavidades huecas sobre uno de los extremos de la barra.	73
Figura 53. Cavidades en el borde de la pieza.....	73
Figura 54. Cavidades esféricas en la superficie de la barra.	74
Figura 55. Irregularidad en la superficie.....	75
Figura 56. Cavidades esféricas en la superficie.	75
Figura 57. Cavidades en la superficie de la pieza entregada.....	76
Figura 58. Darts presentes en la superficie de la pieza entregada.	76
Figura 59. Fractura en uno de los extremos de la pieza entregada.....	77
Figura 60. Picaduras en la superficie lateral de la barra.....	78
Figura 61. Cavidades en forma irregular sobre la superficie de la pieza.	78
Figura 62. Cavidad esférica conectada la superficie.....	79
Figura 63. M8 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x	87
Figura 64. M8 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x	88
Figura 65. M10 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x	88
Figura 66. M10 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x	89
Figura 67. M14 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x	89
Figura 68. M14 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x	90

Figura 69. Aumento de altura de horno.	91
Figura 70. Esquema de un cubilote común.	92
Figura 71. Esquemático del anillo o caja de viento.....	93
Figura 72. Esquemático con vista de planta del anillo o caja de viento.....	93
Figura 73. Piezas especiales de refractario.....	94
Figura 74. Esquemático de la inclinación incorrecta de una tobera.	94
Figura 75. Esquemático de la remoción y adición de material refractario.....	95
Figura 76. Esquemático de la correcta inclinación de una tobera.	95
Figura 77. Esquemático de soldadura y remachado de la coraza.....	96
Figura 78. Esquemático del capuchón.....	96
Figura 79. Esquema simplificado del sombrero.....	97
Figura 80. Esquema de la figura base para el sombrero chino.....	97
Figura 81. Esquema tentativo de la estructura del sombrero chino.....	98
Figura 82. Parte inferior de supresor de chispas.....	98
Figura 83. Esquemático de la parte inferior del supresor de chispas.	99
Figura 84. Esquema simplificado de la estructura superior.	99
Figura 85. Esquema de la figura base para el sombrero chino.....	100
Figura 86. Esquemático del supresor de chispas.....	101
Figura 87. Comprobación de altura con barra doblada en Z.....	103
Figura 88. Carta de temperaturas de acuerdo al color del caldo.	109
Figura 89. M3 pulido sin ataque. 500x.....	144
Figura 90. M3 atacado con Kunkele. 200x.....	144
Figura 91. M3 atacado con Kunkele. 500x.....	145
Figura 92. M6 pulido sin ataque. 100x.....	145
Figura 93. M6 atacado con ácido oxálico. 500x.....	146
Figura 94. M6 atacado con nitrato de plata. 200x.....	146
Figura 95. M6 atacado con Kunkele. 200x.....	147
Figura 96. M6 atacado con Kunkele. 500x.....	147
Figura 97. M7 pulido sin ataque. 100x.....	148
Figura 98. M7 atacado con ácido oxálico. 500x.....	148
Figura 99. M7 atacado con nitrato de plata. 200x.....	149
Figura 100. M7 atacado con Kunkele. 200x.....	150
Figura 101. M7 atacado con Kunkele. 500x.....	150
Figura 102. M7 atacado con Kunkele. 1000x.....	151
Figura 103. M9 pulido sin ataque. 100x.....	151
Figura 104. M9 atacado con ácido oxálico. 200x.....	152
Figura 105. M9 atacado con nitrato de plata. 500x.....	152
Figura 106. M9 atacado con Kunkele. 200x.....	153
Figura 107. M9 atacado con Kunkele. 500x.....	153

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de las fundiciones grises.....	3
Tabla 2. Efecto de cada componente sobre la fundición gris.	4
Tabla 3. Composiciones base típicas de piezas de hierro gris.....	4
Tabla 4. Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48.	6
Tabla 5. Clasificación de fundiciones grises según SAE J431.	7
Tabla 6. Clasificación de combustibles sólidos.....	7
Tabla 7. Resumen de características de antracitas, hullas y coque.....	10
Tabla 8. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote.....	17
Tabla 9. Potencia de los ventiladores en función del diámetro interno del cubilote.	21
Tabla 10. Espesor del refractario en función del diámetro interno del cubilote.....	21
Tabla 11. Clasificación de los principales componentes de las escorias.....	21
Tabla 12. Tabla de dimensiones para cimentación.....	24
Tabla 13. Relación de talleres participantes.	33
Tabla 14. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 1.....	34
Tabla 15. Parámetros actuales del horno de cubilote 01 del Taller 2.	35
Tabla 16. Parámetros actuales del horno de cubilote 02 del Taller 2.....	35
Tabla 17. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 3.....	36
Tabla 18. Parámetros actuales del horno de cubilote 01 del Taller 4.....	37
Tabla 19. Parámetros actuales del horno de cubilote 02 del Taller 4.....	38
Tabla 20. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 5.....	38
Tabla 21. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 6.....	39
Tabla 22. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 7.....	40
Tabla 23. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 1.....	45
Tabla 24. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 1.....	46
Tabla 25. Parámetros calculados para el horno de cubilote 01 del Taller 2.....	47
Tabla 26. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 01 de Taller 2.....	47
Tabla 27. Parámetros calculados para el horno de cubilote 02 del Taller 2.....	49

Tabla 28. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 02 de Taller 2.....	49
Tabla 29. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 3.....	50
Tabla 30. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 3.	50
Tabla 31. Parámetros calculados para el horno de cubilote 01 del Taller 4.....	52
Tabla 32. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 01 del Taller 4.	52
Tabla 33. Parámetros calculados para el horno de cubilote 02 del Taller 4.....	53
Tabla 34. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 02 del Taller 4.	54
Tabla 35. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 5.....	55
Tabla 36. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 5.	55
Tabla 37. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 6.....	56
Tabla 38. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 6.	57
Tabla 39. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 7.....	58
Tabla 40. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 7.	58
Tabla 41. Análisis FODA del diseño de hornos de cubilote del norte del Perú.....	61
Tabla 42. Muestra entregada por Taller 1.	70
Tabla 43. Muestras entregadas por Taller 3.	71
Tabla 44. Muestras entregadas por el Taller 4.	73
Tabla 45. Muestras entregadas por Taller 5.	74
Tabla 46. Muestras entregadas por el Taller 6.	76
Tabla 47. Muestras entregadas por Taller 7.	77
Tabla 48. Resumen de defectos macrográficos en muestras del norte peruano.....	79
Tabla 49. Análisis de composición química de combustibles entregados por talleres.....	80
Tabla 50. Composición química de las muestras entregadas por los talleres participantes.	81
Tabla 51. Relación entre azufre y manganeso de las muestras entregadas por los Talleres.	82
Tabla 52. Composición química de las chatarras entregadas por los talleres.	83
Tabla 53. Muestras analizadas para detección de sulfuros.....	86
Tabla 54. Reactivos usados para ataque de muestras.	87
Tabla 55. Ladrillos refractarios ofrecidos en la capital.	101
Tabla 56. Clasificación de chatarras según su procedencia	104
Tabla 57. Hoja de cálculo de carga para fundición de clase 25 sin arrabio	105
Tabla 58. Pesos individuales para la hoja de cálculo de carga para fundición de clase 25.	106
Tabla 59. Resumen de la materia prima necesaria para fundir 150 kg de hierro con 2.5% Si y 0.5% Mn.	106
Tabla 60. Métodos empíricos y cualitativos para aproximar temperatura del caldo.....	109
Tabla 61. Equipos para determinar la temperatura del caldo.	110
Tabla 62. Agentes desulfurantes y sus efectos.	112
Tabla 63. Características de los desulfurantes más usados.	112

Introducción

El horno de cubilote se utiliza en la industria de la fundición para la fabricación de hierros. Según Ricardo Emilio Aristizábal Sierra (2014), se reporta que el 70% del hierro fundido en el mundo se fabrica con este tipo de unidades de fusión. La vigencia del cubilote se debe a su versatilidad, fácil adaptación a las nuevas tecnologías, bondades de operación y bajos costos de inversión inicial. Aunque la contaminación producida por los gases resultantes del proceso han llevado a que el horno de cubilote sea reemplazado por tecnologías mucho más limpias como los hornos de inducción, crisol, eléctricos, etc., es aún una alternativa al alcance de las micro y pequeñas empresas manufactureras de fundiciones grises que atienden parte de la demanda de piezas de este material en diversas ciudades del norte del Perú.

La presente investigación estudia la incidencia del diseño y operación del horno de cubilote y el uso del combustible sobre la aparición de defectos que surgen en las piezas de fundición de gris laminar fabricadas en los talleres del norte del Perú. Se ha analizado el diseño y características de los hornos de cubilote y se ha relacionado el uso de combustible con las propiedades químicas, mecánicas, macro y microestructurales de las piezas obtenidas.

En el norte del Perú, los hornos de cubilote presentan deficiencias en su diseño ya que se construyen en base a los conocimientos empíricos de los fundidores, obteniendo estructuras de fusión con carencias que conducen a la obtención de piezas con apreciables defectos de fusión. Otro problema en el proceso de fundición del norte es la selección de materia prima que repercute sobre la pieza final. El historial de piezas defectuosas motiva a que las industrias locales soliciten piezas de mejor calidad, a mayor costo, a empresas de la capital o del extranjero, causando que la inversión local disminuya. No obstante, la habilidad de los talleres del norte y su capacidad de emprendimiento, junto con la mejora de sus prácticas de fundición pueden conseguir una apreciable mejora en la calidad de sus productos y afrontar mayores retos, tanto en la obtención de otros productos, como en una mayor inversión para mejorar su tecnología. El presente trabajo de investigación está estructurado en cuatro capítulos.

En el primer capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los parámetros que deben tenerse en cuenta al momento del diseño y funcionamiento del horno de cubilote. Asimismo, se evalúa el efecto del combustible sobre la composición química de las piezas de fundición gris enfatizando en el azufre, elemento químico pernicioso presente en su gran mayoría en el combustible usado.

En el segundo capítulo, se caracterizan los hornos de cubilote de los talleres participantes a través de su dimensionamiento y diseño, se expone el funcionamiento de los hornos de cubilote durante el proceso de fusión en el norte del Perú tomando los datos recopilados en las distintas visitas a los talleres. Finalmente se elabora un diagnóstico de los hornos de cubilote, resaltando los puntos más críticos.

En el tercer capítulo se detallan los defectos macroscópicos encontrados en las piezas debidos a las características de los hornos de cubilote. Se evalúa la incidencia del combustible utilizado en el norte peruano sobre las piezas, tomando como punto de discusión la composición química. Se relaciona también la presencia de azufre en las piezas con la cantidad de azufre existente en el combustible y los defectos que ello genera.

Finalmente el cuarto capítulo, presenta propuestas de mejora para la situación actual de los hornos de cubilote, en cuanto al dimensionamiento, diseño y operación para obtener una mejor eficiencia en el proceso de obtención de piezas de fundición gris. Tomando en cuenta también la disminución de la contaminación ambiental. Se dan sugerencias para hacer una mejor adquisición del combustible que cause menos contaminación del caldo, así como sugerencias para tratarlo antes de la colada.

Capítulo 1

Diseño y funcionamiento del horno de cubilote

1.1. Influencia del combustible en las propiedades de las fundiciones grises.

Las fundiciones grises tienen un amplio campo de aplicación debido a sus propiedades: fácil fusión y moldeo, aceptables propiedades mecánicas, excelente maquinabilidad, buena resistencia al desgaste y su capacidad de amortiguamiento.

Las características de las fundiciones grises están influenciadas por la calidad de sus chatarras, insumos y la del combustible empleado durante su proceso de fabricación en el horno de cubilote. La metalurgia de los hierros grises es extremadamente compleja debido a una amplia variedad de factores que influyen en su solidificación y las posteriores transformaciones en estado sólido.

1.1.1. Fundiciones grises

Las fundiciones grises son un tipo de aleación perteneciente a las aleaciones hierro-carbono (Ver Anexo A) con contenido mayor a 2.1% C. Se define como fundición férrea gris a una aleación del tipo hierro-carbono-silicio que experimenta la reacción eutéctica según el diagrama Fe-C estable, ver Figura 1, durante su solidificación. Pueden contener cantidades menos significativas de otros elementos químicos como el azufre, manganeso y fósforo. En la Tabla 1 se observa los rangos de la composición de las fundiciones grises y en la Tabla 2, se observa la incidencia de cada elemento sobre la fundición gris.

Tabla 1. Composición química de las fundiciones grises.

Composición química				
%C	%Si	%Mn	%S	%P
2.5-4.0	1.8-3.5	0.5-1.0	0.05-0.12	< 0.2

Fuente: The Essentials of Material Science and Technology for Engineers. Rakhit (2013).

Tabla 2. Efecto de cada componente sobre la fundición gris.

Elemento	Efecto
C	El carbono disminuye las características mecánicas de las fundiciones, su contenido debe estar entre 2,5 y 4 %. Las fundiciones resistentes son de bajo carbono.
Si	El silicio es un elemento de carácter grafitizante, por lo cual se hace necesario para las fundiciones grises. Los valores para una fundición gris de buena calidad es entre 1 y 3.8%. Mayor contenido de silicio favorece la estructura ferrítica y aumentan la dureza de la ferrita. El contenido de silicio depende de la sección de la pieza a fundir.
Mn	El manganeso tiene un efecto contrario al del silicio. Favorece la solidificación metaestable, estabiliza la perlita y eventualmente la cementita. El manganeso tiene la función esencial de fijar el azufre bajo la relación siguiente: $\%Mn = 1.7\%S + 0.3\%$
S	El azufre incrementa durante la fusión en el horno de cubilote dependiendo directamente del combustible. Este elemento forma el sulfuro de hierro, FeS, segregando en las juntas de grano causando dureza y fragilidad, obstaculiza la grafitización. El manganeso permite controlarlo bajo la forma de sulfuro de manganeso, MnS, su temperatura de solidificación es de 1620°C y no afecta las características de la fundición gris. Genera la disminución de la fluidez y tiene efecto en la nucleación del grafito.
P	El fósforo no tiene mucho efecto en la grafitización, sin embargo es una impureza útil en el hierro, puesto que mejora la fluidez. La fluidez que otorga, se debe a la formación de un eutéctico de baja temperatura de solidificación (950 °C), llamado comúnmente esteadita. Esta se presenta cuando el contenido de fósforo es mayor a 0,15 %. Altos niveles de este elemento pueden promover porosidad por contracción, mientras que niveles controlados y bajos de fósforo incrementan la colabilidad del metal dentro del molde. La esteadita incrementa la dureza total y la resistencia al desgaste del hierro colado.

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de: ASM Handbook Volume 15: Casting (1992), Foscoo Ferrous Foundryman's Handbook. Brown (2000).

Se le denomina gris por el color que revela después de la fractura, puesto que presenta grafito. Las fundiciones grises se dividen en dos grupos importantes debido a la forma del grafito: fundiciones grises laminares (grafito en forma de láminas) y fundiciones grises esferoidales (grafito en forma de nódulos), en la Figura 2 se observa la diferencia entre ambas clasificaciones.

La clasificación de las fundiciones grises no se basa fundamentalmente en su composición química, por esta razón, se han establecido rangos de composición con los que se espera obtener valores específicos de resistencia, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Composiciones base típicas de piezas de hierro gris.

Grado	%C	%Si	%Mn	%S _{máx}	%P _{máx}	%CE
G1800	3.40-3.70	2.30-2.80	0.50-0.80	0.15	0.25	4.25-4.50
G2500	3.20-3.50	2.00-2.40	0.60-0.90	0.15	0.20	4.00-4.25
G3000	3.10-3.40	1.90-2.30	0.60-0.90	0.15	0.15	3.90-4.15
G3500	3.00-3.30	1.80-2.20	0.60-0.90	0.15	0.12	3.70-3.90
G4000	3.00-3.30	1.80-2.10	0.70-1.00	0.15	0.10	3.70-3.90

Fuente: ASTM A159. American Society for Testing Materials (2012).

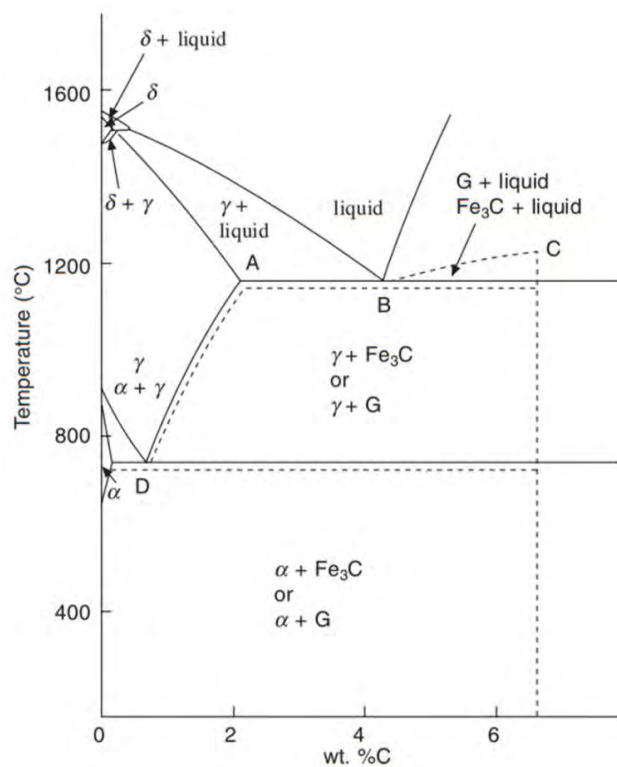


Figura 1. Diagrama Fe-C metaestable (líneas continuas) y Fe-C estable (líneas discontinuas).

Fuente: Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. Brown (2000).

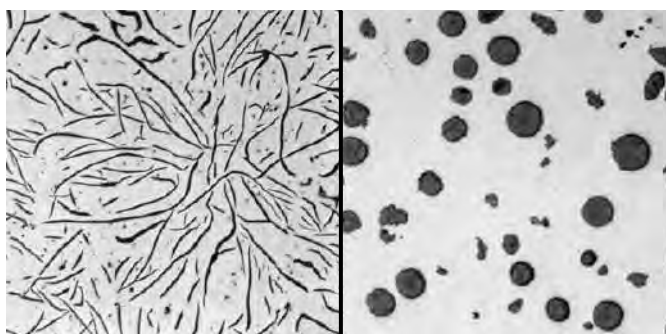


Figura 2. Fundición gris laminar (lado izquierdo). Fundición gris esferoidal (lado derecho).

Fuente. ASTM A247-17. ASTM Internacional (2017).

El “American Society for Testing Materials” (ASTM) junto con la “American Foundrymen’s Society” (AFS) han establecido dos maneras de clasificar a las fundiciones grises: en función a su resistencia mecánica y, según la forma y distribución del grafito.

a. Resistencia mecánica

Establecido por la norma ASTM A48 (ver Anexo B), esta especificación subordina la composición química a la resistencia a la tracción. Las clases 20, 25 y 30 son consideradas como clases ordinarias y el resto como clases de alta resistencia. En la Tabla 4 se observa la denominación de la fundición y su resistencia.

Tabla 4. Clasificación de las fundiciones grises según la norma ASTM A48.

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: The Essentials of Material Science and Technology for Engineers. Rakhit (2013).

En el Anexo C se observa mayor información con relación a las propiedades mecánicas de las fundiciones grises.

b. Formas de grafito

El grafito en su totalidad se puede presentar en cuatro formas (grafito laminar, grafito esferoidal, grafito nodular y grafito vermicular) pero la presente investigación se tomará en cuenta a dos de esto: grafito laminar y grafito esferoidal.

- **Grafito laminar:** El grafito laminar crece de un centro en común, de acuerdo a la velocidad de enfriamiento y la composición química del caldo, se obtienen diferentes tipos de grafito laminar. En la Figura 3, se observa los tipos de grafito laminar existentes.

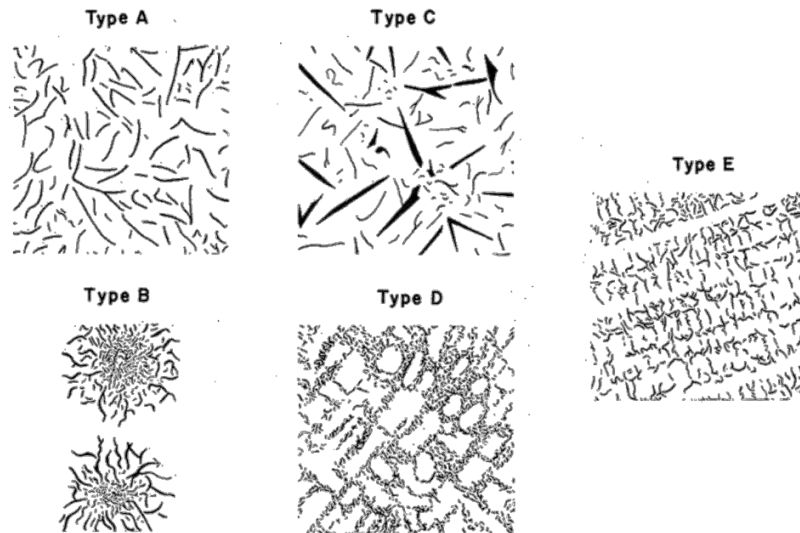


Figura 3. Esquema de los cinco tipos de grafito laminar

Fuente: Norma UNE-EN ISO 945-1. 1975.

- **Tipo A:** Distribución uniforme y orientación aleatoria. Es la forma de grafito más buscado, se le asocia con mejores propiedades mecánicas.
- **Tipo B:** Agrupación en forma de rosetas y distribución aleatoria. Grafito obtenido por reacción eutéctica.
- **Tipo C:** Láminas superpuestas de tamaño grueso y orientación aleatoria. Buenas propiedades frente a aplicaciones térmicas.
- **Tipo D:** Segregación interdendrítica y orientación aleatoria.
- **Tipo E:** Segregación interdendrítica y orientación de preferencia.

- **Grafito esferoidal:** La forma del grafito es esferoidal a causa de la adición de una pequeña cantidad de magnesio o cerio, a los que se les denomina inoculantes, durante el proceso de fundición, específicamente en la etapa de colada.

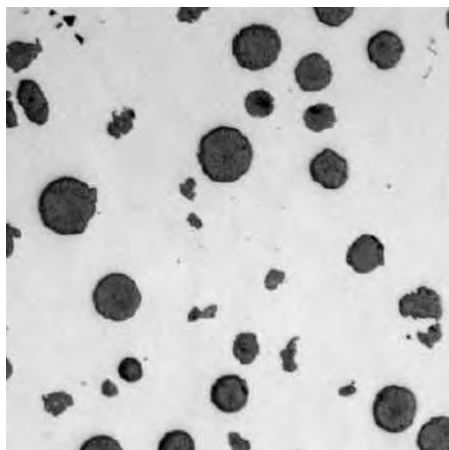


Figura 4. Grafito nodular.

Fuente: UNE UNE-EN ISO 945-1. 1975

Una tercera forma de poder clasificar a las fundiciones grises es según su dureza y las características que presenta la matriz de las fundiciones. Esta clasificación es presentada por la SAE J431 según la Tabla 5:

Tabla 5. Clasificación de fundiciones grises según SAE J431.

Grado	Dureza [HB]	Matriz
G1800	120 – 187	Ferrítica-perlítica
G2500	170 – 229	Ferrítica-perlítica
G3000	187 – 241	Perlítica
G3500	207 – 255	Perlítica
G4000	217 – 269	Perlítica

Fuente: SAE J431. SAE International (2000).

1.1.2. Características de los combustibles

Para el funcionamiento del horno de cubilote es necesario un combustible de tipo sólido. En la Tabla 6, se observa la clasificación de los combustibles sólidos.

Tabla 6. Clasificación de combustibles sólidos

Clasificación de combustibles sólidos			
Sólidos	Naturales	Carbón	Maderas
			Turbas
			Lignitos
			Hullas
			Antracitas
	Artificiales		Coque
			Aglomerado
			Carbón

Fuente: Manual de Carbones y Coquización. Báez (2004).

Cada combustible sólido es idóneo para un cierto tipo de aplicación dependiendo de las características que identifiquen a los de su clase.

Es necesario identificar las características que definen a un combustible para poder determinar el más eficiente para la fabricación de fundición de hierro gris en horno de cubilote. A continuación se describen las características más importantes de los combustibles sólidos:

a. Materiales volátiles (ASTM D-3175)

Las materias volátiles son desprendimientos, en forma de gas o líquido, de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento. A medida que el combustible se calienta se desprenden elementos como el agua, hidrógeno, compuestos aromáticos, etc. Esto disminuye la calidad del combustible. (ASTM D-3175. American Society for Testing Materials, 2017).

b. Cenizas (ASTM D-3174)

Las cenizas son producto de la combustión de la materia orgánica y la descomposición de la materia existente en el combustible. Un alto valor de cenizas indica un menor valor de poder calorífico y menor calidad del combustible. En un análisis químico se encuentran los siguientes compuestos que conforman a las cenizas: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_3 y SO_3 . (ASTM D-3174. American Society for Testing Materials, 2012).

c. Humedad (ASTM D-3302)

Es la cantidad de agua presente en el combustible. Reduce el poder calorífico de manera directa respecto al contenido de agua. Durante la combustión en el cubilote, el agua es inerte y su vaporización consume energía. (ASTM D-3302. American Society for Testing Materials, 2017).

d. Carbono fijo (ASTM D-3172)

El carbono fijo es la parte no volátil y quema desde el estado sólido. Se encuentra en el residuo que queda en el crisol luego que el proceso de fundición ha terminado. Se determina al restar del 100% de la composición del combustible, el porcentaje de humedad, materias volátiles y cenizas. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2013).

e. Poder calorífico (ASTM D-5865)

Es el calor de combustión referido a la unidad de masa. Energía liberada por el combustible en combustión debido a la reacción exotérmica de oxidación. El poder calorífico representa la energía en combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirítico, y parte del azufre orgánico. Es una de las características más importantes en la selección de un combustible sólido. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2013).

f. Cloro (ASTM D-3176)

La determinación de cloro suele realizarse como parte del análisis elemental. La existencia del cloro se debe a la presencia de cloruros ligados a la parte orgánica o debido a la presencia de minerales formados por aguas salinas.

Este tiene efecto sobre la desulfuración ya que disminuye la relación Ca/S en un 12% por cada 0.25% de Cl. (ASTM D-3172. American Society for Testing Materials, 2015).

g. Contenido de azufre (ASTM D-4239)

Se encuentra en proporciones variables desde trazas e incluso puede llegar a alcanzar valores de hasta 10%. Es una impureza problemática y preocupante luego de las cenizas. Está presente como pirita, sulfatos o combinado químicamente en compuestos orgánicos.

En la práctica se simplifica considerando azufre combustible (el que reacciona e ingresa a la fundición) e incombustible (permanece inerte y se hace presente en los desechos del combustible). (ASTM D-4239. American Society for Testing Materials, 2014)

Se hace necesario conocer el porcentaje del azufre ya que durante la combustión este puede originar gases venenosos que contaminen el ambiente, debido al íntimo contacto entre el combustible y el caldo, la composición química del último se ve afectado de manera directa y decanta en propiedades negativas para la pieza de fundición gris.

A continuación se muestran las características principales de los combustibles más usados en fundición:

- **Carbón de piedra:** Los carbones de piedra se pueden clasificar según su contenido en materias volátiles: así se habla de carbones con el 30 al 40% de materias volátiles (carbones de llama larga o carbones de gas), de otros con el 19 al 30%. La humedad natural varía del 3 al 5%, y las cenizas del 3 al 10%.

Su tamaño es muy variado, para adaptarse a los hornos de distintos tipos en los que es empleado, es decir, en los llamados de reverbero, sean fijos, sean giratorios, que están en uso especialmente en las fundiciones de hierro colado maleable y de bronce. Algunas de estas instalaciones utilizan el carbón muy finamente molido e insuflado en la cámara de combustión con aire comprimido. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

- **Antracita:** Por su bajísimo contenido de cenizas y de materias volátiles es especialmente adecuada para la carburación del hierro colado y del acero líquido. En determinadas proporciones se, puede usar también en los cubilotes, substituyendo en un 10% al coque de carga. Es el carbón más denso y duro, contiene menos del 8% en materias volátiles y 92% de carbono fijo. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).
- **Hulla:** Es sin lugar a dudas el combustible sólido más importante, tanto para las reservas mundiales como el uso que se hace de ellas. Es la más empleada, por su buen poder calorífico, abundancia, buena combustión

y diversos usos. Sus características son variadas ya que pueden contener de 8% a 48% de materias volátiles. Un aspecto en contra de la hulla es que contiene elevadas cantidades de azufre que son una fuente muy importante de contaminación del aire. Algunos carbones de este tipo, cuando se calientan en ausencia de aire, se restablecen y liberan volátiles para formar un sólido poroso, duro y negro: el coque. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

- **Coque:** Se emplea en los cubilotes de las fundiciones de hierro colado, en los hornos de crisol de las fundiciones de metales y aleaciones férricas y no férricas. El coque se obtiene destilando fuera del contacto del aire hulla de llama larga (reducida a fragmentos menudos) en baterías de retortas o de cámaras. Los establecimientos donde se realiza esta operación reciben el nombre de coquerías. El coque para fundición debe ser un coque de baja reactividad, denso, poco poroso, con buena organización estructural, buena resistencia mecánica. Se puede tolerar un máximo del 0.08% de azufre, del 8% de cenizas, del 2% de materias volátiles y del 5% de humedad. (Cfr. Manual de Carbones y Coquización, Báez, 2004).

En la Tabla 7, se observa los 3 carbones más aptos para el combustible utilizado en el horno de cubilote:

Tabla 7. Resumen de características de antracitas, hullas y coque

	%C	Azufre	Humedad	Cenizas	Volátiles	PCI ^a	PCS ^b
Antracita	86-98	1%	< 15%	4-12 %	2-10%	8198	8293
Hulla	69-86	2%	15-20 %	4-10%	14-31%	7314	7505
Coque	84-90	0.8%	~3%	7-10 %	2%	7003	8054

^{a,b} Unidades en kcal/kg

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de: Norma ASTM D388; Manual de Carbones y Coquización por Báez, 2004).

1.1.3. Mecanismo de influencia del combustible sobre la fundición gris

Con las propiedades de las fundiciones grises y las características de los combustibles se puede determinar el efecto del combustible sobre las fundiciones grises. La Japan Foundry Engineering Society afirma que mientras el metal va fundiendo entra en contacto con el combustible y se ve directamente influenciado por las características del mismo. En la Figura 5 se observa un seccionamiento del horno de cubilote en funcionamiento, el círculo rojo muestra el íntimo contacto entre el metal fundido y el combustible.

La característica del combustible que genera más efectos perjudiciales sobre la fundición gris es la cantidad de azufre. Puesto que el azufre incrementa entre un 40%-60% durante la operación del horno de cubilote, la fuente de este elemento serán aquellos materiales involucrados durante el proceso de fusión: materia prima metálica, insumos y combustible.

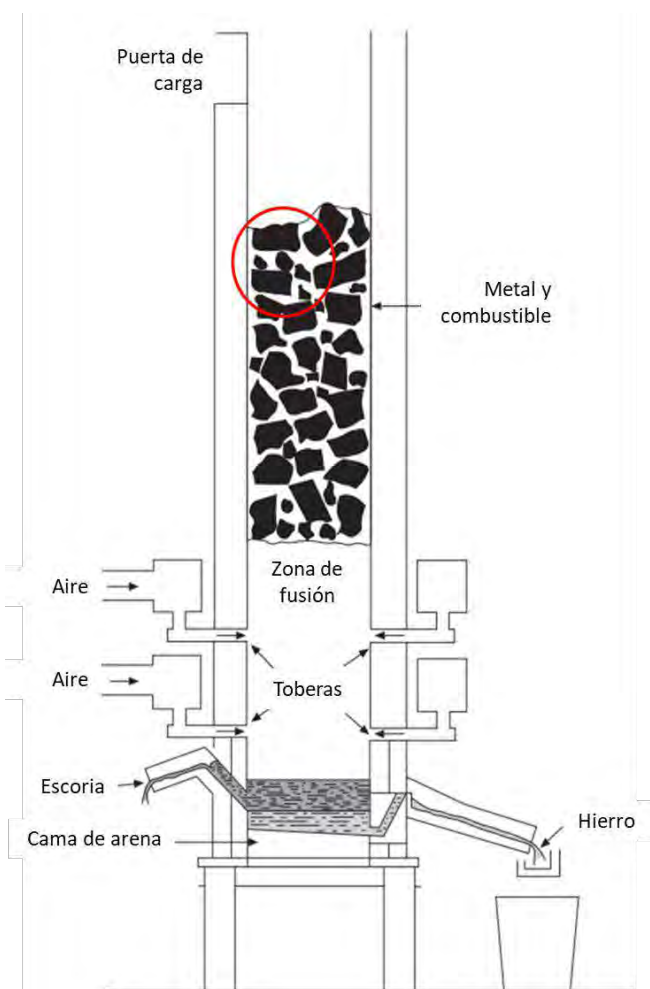


Figura 5. Corte del horno de cubilote.

Fuente: Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. Brown (2000).

En general, el porcentaje de azufre en la materia prima metálica es mínimo, en los insumos utilizados como fundentes o aleaciones es muy poco probable que supere el 0.05%, mientras que el combustible es el que mayor contenido de azufre posee. Por lo tanto, el combustible se considera la principal fuente de azufre.

Como se mencionó anteriormente, el azufre está presente en tres configuraciones: pirítico, sulfato y orgánico. El azufre pirítico es del tipo combustible y juega un importante papel en el fenómeno de la combustión instantánea. El azufre en sulfatos es no combustible y pasa a las cenizas, por lo que su acumulación genera contaminación del medio ambiente. El azufre orgánico es el más difícil de separar debido a su configuración dentro del combustible.

El azufre tiene efecto sobre dos fenómenos que se presentan durante la solidificación de la pieza: la formación de sulfuros y la nucleación del grafito.

- **Sulfuros de hierro:** La formación de sulfuros son del tipo FeS y MnS. Como se observa en el Anexo D, el diagrama de fases muestra que el Fe con el S forman una reacción eutéctica de tipo Fe-FeS (sulfuro de hierro), sólido a 988°C (975°C en el sistema Fe - C - S). Aparece como constituyente matriz si hay líquido suficiente o aislado. Al ser un

compuesto eutéctico, su punto de fusión es bajo; este compuesto segrega en las juntas de grano y causa un aumento en la dureza y en la fragilidad. Favorece a la aparición de cementita y propicia el fenómeno de blanqueo.

- **Sulfuros de manganeso:** Son inclusiones de forma casi geométrica, de color gris paloma (ver Figura 6), que se forman antes de la solidificación final (ver Anexo E). La presencia de sulfuro de manganeso es el resultado de adiciones deliberadas de manganeso para prevenir la formación de sulfuros de hierro quebradizos que de otra manera se formarían en los límites de los granos (ASM Handbook Volume 15: Casting, 1992). La cantidad necesaria de manganeso para neutralizar los efectos perjudiciales del azufre viene dada por la ecuación:

$$\%Mn \geq 1.7\%S + 0.3$$

Esta formulación de contenido necesario para manganeso es válida para contenidos de azufre menores a 0.12%. Un contenido de azufre mayor a este, necesitará una mayor cantidad de manganeso y aumentará la tendencia del hierro a endurecer. Cuanto más alto sean los niveles de azufre y manganeso, mayor deberá ser la temperatura de vertido para evitar sopladuras. La Figura 7, muestra la relación entre azufre y manganeso en lo que produce fundición de buen estado o defectuosa.

- **Nucleación del grafito:** Algunos investigadores afirman que el azufre tiene efecto durante la nucleación del grafito en el hierro gris. En la Figura 8 se observa la cantidad óptima de azufre para el conteo de células eutécticas de grafito. La nucleación de grafito conlleva a un fenómeno denominado tendencia al blanqueo, al haber poco conteo de células de grafito, el carbono reacciona y aparece como cementita. Esto ocasiona que la dureza de la pieza incremente causando la aparición de fundición blanca. En la Figura 8 se observa que en el rango de 0.05%S a 0.1%S se obtiene la menor profundidad de blanqueo (ASM Handbook Volume 15: Casting, 1992).

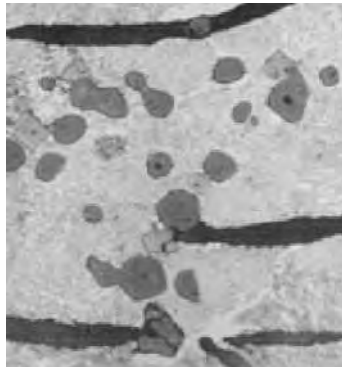


Figura 6. Inclusiones de sulfuro de manganeso (gris oscuro, redondeado)

Ataque: Nital 2%. Ampliación: 500x.

Fuente: ASM Handbook Volume 15: Casting (1992).

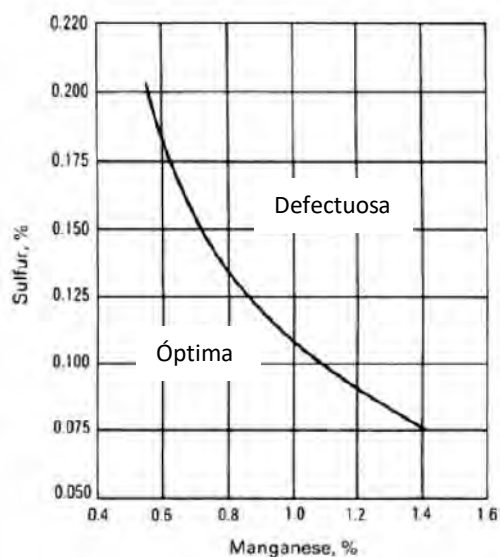


Figura 7. Aparición de defectos en la fundición gris como función de la relación en contenido de azufre y manganeso.

Fuente: ASM Handbook Volume 15: Casting (1992).

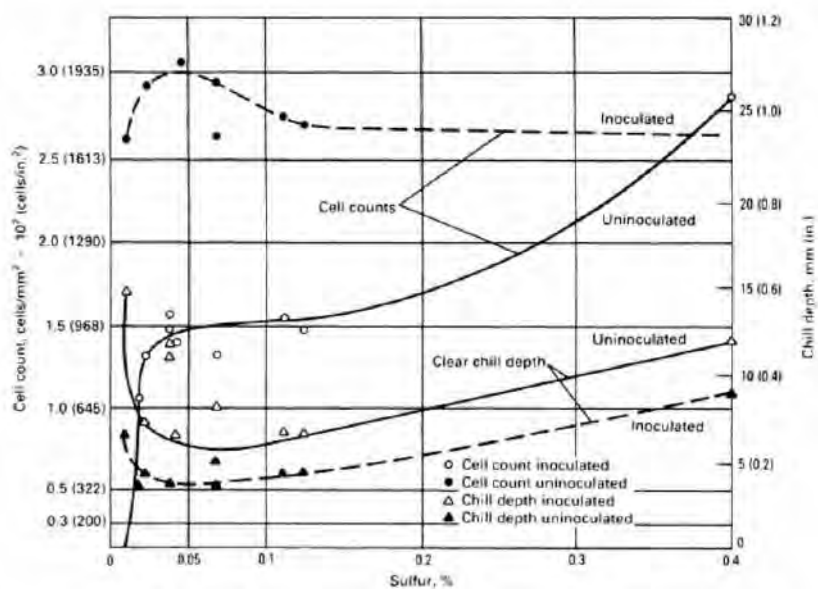


Figura 8. Efecto del azufre en la cantidad de células eutécticas y la profundidad de blanqueo para fundiciones grises inoculadas y no inoculadas.

Fuente: ASM Handbook Volume 15: Casting (1992).

1.2. Diseño y materiales del horno de cubilote.

Un cubilote puede ser definido, sencillamente, como una cavidad revestida de refractario, con las aberturas necesarias en la parte superior para el escape de los gases y carga de los materiales (materia metálica y combustible); y en el fondo para la entrada y soplado de aire; y para la extracción del hierro fundido y de la escoria (El horno de cubilote y su operación, 1985).

Este tipo de horno conserva su diseño básico hasta la actualidad (ver Anexo F). Naturalmente, ha sufrido variaciones estructurales, se han incorporado aditamentos, se han rediseñado algunas de sus partes, particularmente el sistema de toberas, pero su concepción inicial de horno tubular, en posición vertical, con la entrada de la carga metálica por la parte superior y un contacto directo entre el combustible sólido y dicha carga metálica, se ha mantenido inalterable.

Así como el concepto básico de funcionamiento se ha mantenido invariable hay algunas partes del cubilote que se mantienen desde su concepción y que se hacen necesarios para su operación. A continuación, en la Figura 9, se pueden ver señaladas las más importantes.

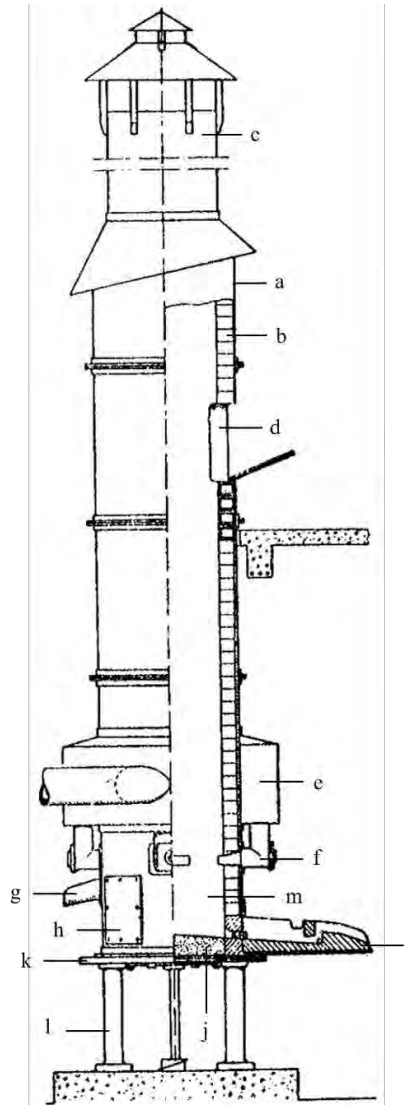


Figura 9. Partes importantes del horno de cubilote convencional.

Fuente: Tecnología de la fundición. Capello (1982).

- a. Coraza:** Envoltura cilíndrica de chapa de acero soldada. Placas de 3mm de espesor, rolandas en forma de cilindros y remachadas entre sí, con juntas de traslape hacia abajo para protección contra las condiciones climáticas.
- b. Revestimiento interno:** Revestimiento interno de material refractario, generalmente de ladrillo o arcilla refractaria. El espacio que existe en coraza y

refractario debe ser entre 3 y 5 cm, esto permite las dilataciones radiales y axiales del refractario.

- c. Chimenea con sombrero:** Algunas veces se añade apagachispas, para retener la mayor cantidad de restos sólidos incandescentes que se disparan al exterior del horno.
- d. Puerta de carga:** La puerta de carga está ubicada a una distancia vertical de cuatro a cinco veces el diámetro de cubilote, desde la placa del fondo.
- e. Cámara de aire para combustión:** Plancha delgada por donde circula aire o viento (enviado por una máquina soplante) para la combustión del combustible.
- f. Tobera:** Chapas de acero, en forma de caja y adaptada al revestimiento para conducir el aire al interior del cubilote. La pared exterior está agujereada y provista de portillos con mirillas para vigilar la combustión.
- g. Piquera de escoria:** Abertura ubicada a unos 15 o 20 cm aproximadamente por debajo del plano de toberas. Su inclinación de 30 a 40° facilita la salida de la escoria.
- h. Puerta lateral de encendido y limpieza:** Orificio para facilitar el encendido del horno y su limpieza. Antes de cerrarse, al comienzo de la fusión, hay que rehacer el murete que completa el revestimiento.
- i. Canal de colada:** Plancha de hierro revestida de masa refractaria. Mantiene la misma inclinación (10°) que la solera para garantizar la caída del hierro fundido en el caldero de colada.
- j. Solera a fondo de cubilote:** Arena de moldeo apisonada e inclinada hacia la piquera de sangría del horno.
- k. Plancha a base de envoltura cilíndrica:** A través de ella se descarga el contenido de coque de la cama, al final de la operación el horno.
- l. Columnas de apoyo:** Columnas de acero con concreto reforzado. La altura de las mismas, deberá permitir el libre juego de las puertas de fondo, y la fácil extracción de la descarga del cubilote.
- m. Crisol:** Parte inferior del cubilote entre la solera y el plano de las toberas. Se estima que el metal ocupa el 46% de volumen y el restante será coque incandescente. Su distancia debe ser capaz de almacenar el 30% de la capacidad de producción.

Al igual que cualquier equipo, posee sus parámetros de diseño y son consecuencia de experiencia acumulada en la construcción y operación del horno. Los parámetros a tomar en cuenta para su diseño y construcción son los siguientes:

1.2.1. Diámetro interior (D_i)

El parámetro más importante en el diseño del horno de cubilote, en torno a este se dimensiona el horno y se calcula la producción del mismo. El valor de este parámetro debe ser determinado al nivel de toberas. De acuerdo a la producción deseada, el diámetro se encuentra en un rango entre $[0.5 - 1.0]$ kg/cm².

1.2.2. Capacidad de fusión o producción (C_i)

Parámetro que determina el aproximado de lo que horno de cubilote es capaz de producir por hora. Existe una capacidad mínima y máxima de fusión expresada en la Ecuación 1:

$$C_i = kD_i^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- k: constante de producción, varía de 4 a 7. Se usa 4 para determinar la producción mínima y 7 para la producción máxima.
- D_i : diámetro interno del horno de cubilote expresado en [m].

1.2.3. Altura del horno (H)

El parámetro de la altura está medido desde la solera hasta la puerta de carga. Para determinar su valor se debe tomar en el siguiente rango de la Ecuación 2:

$$H = [5 - 7]D_i \quad (\text{Ec. 2})$$

1.2.4. Altura efectiva del horno (H_e)

La altura efectiva comprende desde el nivel de toberas hasta la puerta de carga. Como muestra la Ecuación 3 su valor varía entre:

$$H_e = [4 - 6]D_i \quad (\text{Ec. 3})$$

1.2.5. Índice de precalentamiento (I_p)

Es la relación entre el volumen del cilindro entre el plano de las toberas y el plano inferior de la puerta de carga, y la capacidad de fusión. (Diseño, operación y control de cubilote. Baquero, 2000). Se expresa en unidades [m³h/ton]. La Ecuación 4 determina el I_p en función de términos previamente mencionados:

$$I_p = \frac{0.785 * D_i^2 * H_e}{C_i} \quad (\text{Ec. 4})$$

Se recomienda que para cubilotes de $D_i < 800$ mm, se tenga un I_p de 0.7 y para hornos de $D_i > 1000$ mm un I_p de 1.0. Térmicamente, el tiempo de contacto entre carga y gases de combustión determina una mejor transferencia de calor.

A mayor tiempo de contacto, mayor será la recuperación de calor sensible de los gases de combustión. La dimensión del diámetro interno (D_i) ejerce una influencia exponencial sobre I_p , favorece a hornos con $D_i > 1000$ mm.

El factor de capacidad de fusión afecta al índice de precalentamiento, ya que al disminuir dicha producción el I_p aumenta.

1.2.6. Toberas

A través del sistema de toberas, ingresa el aire necesario para quemar el combustible en el horno de cubilote. Todas las toberas deben colocarse en un mismo plano, ya que colocadas a diferentes niveles perturban la combustión. Para determinar el número de toberas, primero, se debe tener en cuenta el valor del área a nivel de toberas ($S_{\text{nivel de toberas}}$), la Ecuación 5.

$$S_{\text{nivel de toberas}} = \pi * \frac{D_i^2}{4} \quad (\text{Ec. 5})$$

Luego de obtener el área a nivel de toberas, se procede a obtener el valor del área total de las toberas. Este valor, usualmente, debe ser de 1/4 a 1/8 de la sección a nivel de toberas ($S_{\text{nivel de toberas}}$). El valor más empleado es de un 1/5.

$$S_{\text{toberas}} = \frac{S_{\text{nivel de toberas}}}{5} \quad (\text{Ec. 6})$$

Posterior a la obtención del área de toberas se debe calcular el área individual de cada tobera. Para esto es necesario determinar el número de toberas a colocar teniendo en cuenta el diámetro interno (D_i) del cubilote. En la Tabla 8, se observa la relación existente entre el número de toberas y el diámetro interno del horno de cubilote. Se ingresa teniendo en cuenta el valor del diámetro interno del cubilote y se obtiene el número mínimo necesario de toberas.

Tabla 8. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote

D_i (mm)	N_t
500	2
600	3
700	
800	
900	
1000	4
1100	
1200	
1300	
1400	5
1500	
1600	

Fuente: Diseño, operación y control de cubilote Baquero (2000).

Luego de haber determinado el número necesario de toberas según el diámetro del horno, se calcula el área de cada tobera.

$$S_{\text{tobera,n}} = \frac{S_{\text{toberas}}}{N_t} \quad (\text{Ec. 7})$$

Finalmente, al haber determinado el área de cada tobera es posible tener el diámetro de cada tobera.

$$d_{tobera,n} = \sqrt{\frac{4S_{tobera,n}}{\pi}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Pese a que las toberas circulares son una elección más sencilla debido a que son comerciales, en algunas situaciones se decide usar toberas rectangulares. Para esta situación debe cumplir que el área de la sección rectangular sea igual al parámetro $S_{toberas,n}$, teniendo esto en cuenta, las dimensiones de la tobera rectangular serán determinadas por el usuario. Se recomienda que la dimensión de la base sea mayor a la altura para permitir un ingreso tranquilo del aire proveniente de la caja de viento.

Luego de tener los parámetros de diseño de las toberas, se debe considerar una inclinación de 8° respecto a la horizontal. El efecto de esta consideración se analizará más adelante en el funcionamiento del horno de cubilote.

1.2.7. Mirillas

Son cuerpos a manera de ventana ubicados a nivel de tobera sobre la caja de viento. A cada tobera le corresponde una mirilla por la cual se puede observar si el combustible se halla encendido durante la operación, así como para golpearlo y permitir el acceso del aire hacia el interior de la zona de combustión. Son de vital importancia cuando se presentan atascos de metal fundido en las toberas. Este parámetro no presenta un cálculo determinado pero deben estar dispuestas de manera que no se haya fuga de aire.



Figura 10. Mirilla en horno de cubilote ubicado a nivel de tobera.

Fuente: Foto tomada en un laboratorio de la ciudad de Trujillo.

1.2.8. Altura del crisol (H_{crisol})

El crisol, al igual que otros parámetros, también depende del diámetro interno (D_i). La altura del crisol se puede tomar como lo indica la Ecuación 9.

$$H_{crisol} = [0.8 - 1]D_i \quad (\text{Ec. 9})$$

1.2.9. Conductos de aire (A_c)

Se denomina conducto de aire a la tubería que va desde el ventilador centrífugo hasta la caja de viento del horno de cubilote. Esta tubería debe ser recta y de sección circular, estas características garantizan una mínima pérdida de presión del aire necesario para la combustión. En la Ecuación 10, se muestra el valor estimado necesario aproximado:

$$A_c = 1.15 S_{tobera,n} \quad (\text{Ec. 10})$$

Para poder obtener el diámetro de la tubería de los conductos de aire se debe despejar de la ecuación anterior utilizando la Ecuación 11:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 * A_c}{\pi}} \quad (\text{Ec. 11})$$

El valor que se obtenga será el óptimo para el funcionamiento. Se puede hacer mediante rolado o se puede colocar una tubería de valor cercano que sea comercial.

1.2.10. Caja de viento (A_{cv})

La caja de viento se sitúa a nivel de toberas. Esta rodea al horno de cubilote, recibe y redistribuye el aire para la combustión, a través de las toberas. Además ayuda al precalentamiento del aire debido a la radiación causada por el horno de cubilote. La sección de la caja o anillo de viento puede ser cuadrada o circular, se prefiere circular para evitar la acumulación de suciedad. Como muestra la Ecuación 14, el valor de la sección de la caja de viento es el doble de los conductos de aire.

$$A_{cv} = 2A_c \quad (\text{Ec. 12})$$

1.2.11. Altura de la caja de viento (h_{cv})

La altura de la caja o anillo de viento sobre el nivel de la solera se calcula como se muestra en la Ecuación 13:

$$h_{cv} = \sqrt{2A_{cv}} \quad (\text{Ec. 13})$$

1.2.12. Altura de las toberas (h_t)

La posición de las toberas queda en función de la capacidad del crisol del horno de cubilote. Para métodos prácticos se calcula como la diferencia de la altura del horno y la altura efectiva del mismo, como se observa en la Ecuación 14. Se recomienda que estas se ubiquen entre 30 a 60 cm sobre el nivel de solera para hornos de cubilote pequeños.

$$h_t = H - H_e \quad (\text{Ec. 14})$$

1.2.13. Altura del orificio de escoriado (C)

Puesto que la densidad de la escoria es mucho menor que la del caldo o metal fundido, esta flota y se considera que puede llegar a ser cerca del 20% de la fundición. Bajo este último dato, se hace necesario un orificio para su evacuación. La altura del orificio de escoriado será una altura igual al 80% de la altura de las toberas. Cuando se detecte metal a la altura de las toberas, este será escoria y se podrá evacuar.

$$C = 0.8h_t \quad (\text{Ec. 15})$$

1.2.14. Piquera de escoriado

No hay un cálculo que defina la distancia necesaria de la piquera de escoriado, es indispensable que presente la longitud necesaria para evacuar la escoria. Para facilitar la salida de la escoria, debe tener una inclinación entre [20 – 40] °.

1.2.15. Orificio de sangrado

Se encuentra a nivel de solera, aproximadamente a 15 cm de altura del fondo del cubilote. El diámetro del orificio de sangrado debe ser aproximadamente 10 cm.

1.2.16. Piquera de sangrado

La piquera de sangrado se ubica al nivel de la solera del cubilote. Su inclinación debe ser de 10° y su distancia debe guardar relación con el diseño del horno, teniendo en cuenta, que debe ser capaz de almacenar cerca del 30% del caldo.

1.2.17. Apagachispas

Dispositivo de doble cono formado de placa de acero gruesa y perforada, soportada por patas de hierro colado durables. Este supresor de chispas reduce el peligro de incendio a causa de las chispas del cubilote.

1.2.18. Volumen de aire

La cantidad de aire necesario para la combustión está determinada por dos parámetros de vital importancia en el funcionamiento del horno de cubilote, estos son: la relación de hierro/combustible y el diámetro interno del horno. Un cubilote debe consumir 100m³ de aire por metro cuadrado de sección transversal (a nivel de toberas).

1.2.19. Ventilador centrífugo

El ventilador centrífugo es un soplador que gira a velocidad constante y trabaja a bajas presiones. El objetivo principal es impulsar un cierto flujo de aire dentro del horno de cubilote. El funcionamiento de este ventilador debe vencer las pérdidas de presión originadas en el circuito de ventilación, como se mencionó anteriormente en el 1.2.7., para evitar pérdidas se recomienda un circuito recto. En la Tabla 9 se observa la potencia necesaria del ventilador para cada diámetro interno.

Tabla 9. Potencia de los ventiladores en función del diámetro interno del cubilote.

D _i (mm)	Potencia		
	CV	kW	HP
400	3	2	2.96
450	4	3	3.94
500	5	3.73	4.93
550	6	4.5	5.92
600	7	5.22	6.90
650	9	6.7	8.87
700	11	8.2	10.85
800	15	11.2	14.79
900	22	16.4	21.69
1000	29	21.6	28.59
1100	38	28.3	37.47
1200	47	35.1	46.34
1300	55	41.1	54.23
1400	65	48.5	64.09
1500	80	59.7	78.88
1600	100	74.57	98.60

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de Tecnología de la Fundición, 1982).

1.2.20. Revestimiento refractario

El revestimiento refractario del horno asume la función de retener la mayor cantidad de calor producido durante el proceso de combustión, necesario para la fusión del metal; además, debe poder ser capaz de contener los productos fundidos. Para calcular el peso del refractario es necesario multiplicar el número de ladrillos por el peso individual.

El espesor del revestimiento refractario viene dado en función del diámetro interno del cubilote como se aprecia en la siguiente Tabla 10:

Tabla 10. Espesor del refractario en función del diámetro interno del cubilote.

Diámetro interno (D _i)	500	600	700	800	900	1000	1200	1300	1500
Espesor del revestimiento (mm)	180	200	200	220	220	250	250	300	300

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de Tecnología de la Fundición, 1982)

El material utilizado para el refractario depende directamente del tipo de escoria que se obtendrá durante el proceso de fundición, en la Tabla 11 se observan los componentes de las escorias.

Tabla 11. Clasificación de los principales componentes de las escorias.

Ácido	Anfótero	Básico
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO
P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO
V ₂ O ₅	ZiO ₂	MnO
B ₂ O ₂	TiO ₂	MgO
	Cr ₂ O ₃	PbO

Fuente: Diseño, operación y control de cubilote. Baquero (2000).

Si se tiene una escoria ácida, el material refractario deberá ser de comportamiento ácido. El material utilizado deberán ser ladrillos de arcilla refractaria, otro material que se puede utilizar, aunque más costoso, es una arcilla sílico-aluminosa. Si se tiene una escoria del tipo básica, el material refractario deberá ser de comportamiento básico. El material utilizado deberá ser ladrillo de material básico, como la magnesita o cromo-magnesita. El tipo de material refractario tiene efecto sobre la fluidez de la escoria: un refractario ácido, generará una escoria viscosa y de baja fluidez mientras que un refractario básico, generará una escoria de baja viscosidad y más fluida.

La forma de los ladrillos debe ser de forma circular para que el espacio entre ladrillos sea mínimo, en la Figura 11 se observa un ladrillo circular y su armado. Si no se cuenta con este tipo de ladrillo, se puede utilizar ladrillos de forma convencional siguiendo el esquema de la Figura 12. El espacio resultante entre ladrillos se debe cubrir con cemento refractario, este debe tener una conductividad térmica aproximadamente de $0.04 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$.

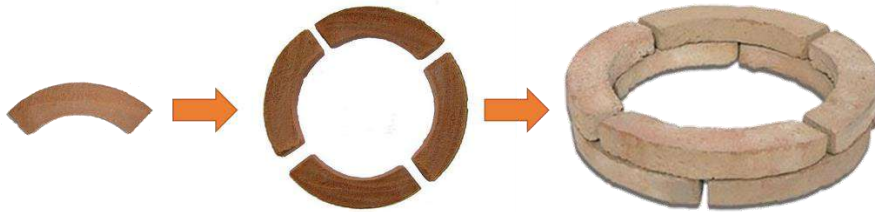


Figura 11. Armado de revestimiento con ladrillos circulares de arcilla refractaria.

Fuente: <http://materialesrusticos.es>



Figura 12. Disposición de revestimiento para horno usando ladrillos convencionales.

Fuente: <http://ghdistribucion.com>

1.2.21. Diámetro externo (D_e)

El diámetro externo se calcula en base al diámetro interior adicionando el espesor del refractario, más un espacio vacío entre la coraza y el refractario (usualmente, se llena con diatomita, debido a su bajísima conductividad térmica) y finalmente, el espesor de la coraza.

$$D_e = D_i + 2e_{ref} + 2e_{vacío} \quad (\text{Ec. 16})$$

1.2.22. Placa base

La placa base se ubica a nivel de la solera, en el fondo del horno de cubilote y soporta el peso del refractario. Tiene forma de anillo, es decir una placa circular de radio a con agujero en el centro de radio b .

$$Q_{(r=b)} = \frac{q * b}{2} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$M_{c(r=b)} = \frac{q}{16} (3 + \nu)(a^2 - b^2) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

- a : radio exterior de la placa
- b : radio interior de la placa
- ν : coeficiente de Poisson
- q : carga máxima del horno

1.2.23. Puerta de descarga

La puerta de descarga se ubica en la parte inferior del cubilote. Esta soporta todo el peso de la carga del horno. Al igual que la placa base, su diseño se calcula por medio de expresiones de los esfuerzos, momentos y cortantes.

El momento máximo se registra en el centro de la placa y está dado por la ecuación:

$$M_{c_{m\acute{a}x}} = -\frac{q * a^2}{8} (1 + \nu) \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

- a : radio de la placa
- ν : coeficiente de Poisson
- q : carga máxima del horno

El momento de inercia para sección transversal de la placa viene dado por:

$$I_{xx} = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{Ec. 20})$$

El esfuerzo máximo viene dado por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{c_{m\acute{a}x}}}{I_{xx}} \quad (\text{Ec. 21})$$

El factor de seguridad viene dado por la expresión:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (\text{Ec. 22})$$

1.2.24. Columnas de apoyo

Se utilizan cuatro columnas con la finalidad de lograr una mayor estabilidad del horno y de sus accesorios. Debido a su disposición, las columnas son sometidas a compresión, lo cual puede causar falla por pandeo. La altura de estas columnas deberá permitir el libre juego de las puertas del fondo, y la facilidad de retirar la descarga del cubilote. Deberán ser de acero estructural y rellenas de concreto reforzado. Su medida se ve supeditada a las dimensiones de la puerta de descarga.

1.2.25. Cimentación

En esta zona se ubica el horno de cubilote y soporta todo el peso de la estructura. La parte superior de la cimentación deberá estar 15 cm por debajo del nivel del piso de la fundición, de manera que se pueda llenar con arena u otro material aislante del calor originado. Esto es necesario para proteger la zapata de concreto de la estructura de soporte o cimentación. En el anexo G se observa la disposición de las cimentaciones del horno de cubilote.

Tabla 12. Tabla de dimensiones para cimentación.

D _e	AB	AC	AD	AE	Peso por metro	Peso Total ^a
813	914	908	1372	305	395	10000
914	914	952	1473	406	505	12250
1014	1014	1067	1626	406	590	16800
1168	1168	1194	1753	406	650	19550
1295	1295	1270	1880	406	710	22250
1422	1422	1321	2032	457	780	25900
1600	1549	1549	2159	457	1430	35000
1676	1651	1539	2261	483	1515	38600
1829	1778	1778	2438	483	1650	43500
1981	1981	1924	2642	508	1795	50000
2134	2134	2102	2794	508	1905	55300
2286	2286	2203	2946	508	2065	61600

^a Los pesos totales están basados en cubilotes de 13.72m de alto. Por cada metro adicional de chimenea superior añádase el peso por metro que indica la tabla.

Fuente: El horno de cubilote y su operación. American Foundrymen's Society (1985).

1.3. Funcionamiento del horno de cubilote.

El cubilote es un horno de torre vertical, que consiste básicamente en una coraza cilíndrica de acero revestida con material refractario y equipado con una caja de viento y un número determinado de toberas. En la parte superior cuenta con una puerta de carga para la entrada de materia prima (chatarra y combustible sólido). En su descenso, el metal es precalentado y fundido por el contacto directo con el flujo en contracorriente de los gases calientes de la combustión. Sin embargo, debido al íntimo contacto del metal, las cenizas y el oxígeno, el hierro colado producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico. El metal fundido y la escoria fundidos se acumulan en el fondo, donde se descarga por orificios y picos.

Al ser un horno vertical continuo presenta varias zonas donde ocurren diferentes fenómenos termoquímicos. Aunque las zonas reales en un cubilote varían en forma y localización de acuerdo con diversos factores, se supone una cama de combustible idealizada, para este estudio. El control de estas zonas es de gran importancia para obtener una operación satisfactoria y eficiente. Estas zonas son: la zona de precalentamiento, zona de fusión, zona de combustión, zona de reducción y zona de crisol. Las condiciones de cada una, las reacciones y los factores que las controlan serán discutidas a continuación.

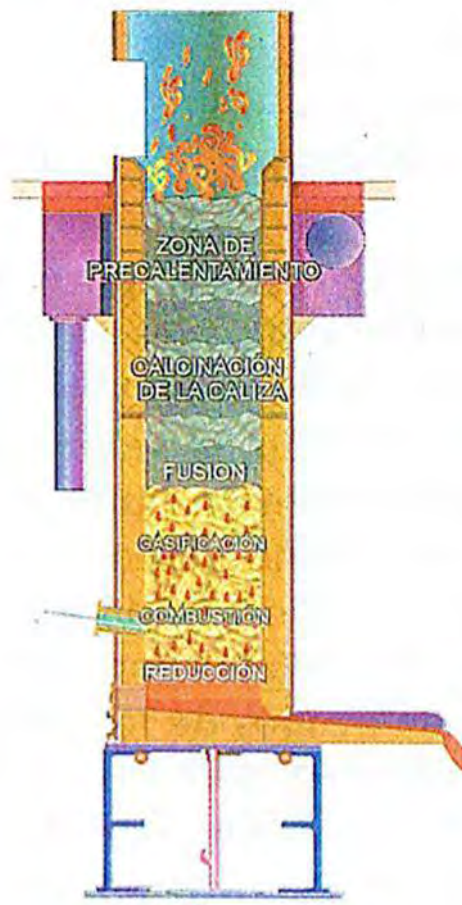


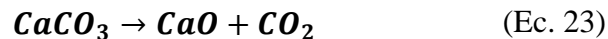
Figura 13. Zonas del horno de cubilote convencional
Fuente: Diseño, operación y control de cubilote. Baquero (2000).

1.3.1. Zona de precalentamiento

Zona de calentamiento de cargas metálicas, comprende desde la puerta de carga descendiendo hasta la zona contigua, la zona de fusión. La función principal de esta sección del cubilote es servir como intercambiador de calor; en el que la carga metálica, el combustible y la caliza, son calentados por los gases generados en las zonas inferiores, transfiriendo calor sensible y disipándose tanto a los materiales como a las paredes del horno.

Desde el punto de vista metalúrgico, la única reacción medible es la descomposición de la caliza. Como se aprecia en la Ecuación 1, esta reacción es endotérmica y da como resultado óxido de calcio y dióxido de carbono.

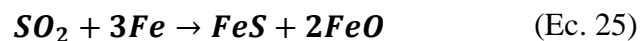
Los intervalos de temperatura de calcinación van desde 400°C hasta 1200°C, dependiendo de la composición y del tamaño de la misma.



En esta zona se presenta un fenómeno de oxidación parcial en la chatarra de la materia prima metálica, esta reacción se debe al gas resultante de la combustión y está gobernada por la siguiente reacción química de la Ecuación 24:



El anhídrido sulfuroso (SO₂), producido en zonas inferiores del cubilote, reacciona con el hierro para formar sulfuros de hierro y óxido de hierro. Esta tendencia a la absorción del azufre, se le conoce como “sulfuración”. El contenido de azufre en el combustible influye de manera directa en este fenómeno.



1.3.2. Zona de fusión

Se sitúa a la altura de la cama de coque, se limita en su extremo superior con la zona de precalentamiento y en su extremo inferior con la zona de gasificación del coque. El espesor de esta zona depende del porcentaje de acero en la carga o del espesor de la chatarra, ya que el acero funde a 1500°C y el hierro a unos 1150°C. El problema que se presenta es que mientras más extensa sea la zona de fusión habrá una disminución de la temperatura de fusión.

Otro factor determinante del tamaño de la zona de fusión es la humedad en las cargas puesto que la presencia de esta causa un movimiento de la zona de fusión, hacia la zona de oxidación. Este desplazamiento de zonas genera, a su vez, una disminución en la parte superior de la zona de reducción.

La reacción principal es el cambio de fase de sólido a líquido del metal (metal sólido a metal líquido).



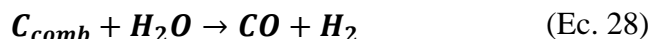
1.3.3. Zona de gasificación o reducción

Esta zona se ubica entre la zona de fusión y el instante en el cual ya no hay oxígeno libre en el horno. Recibe este nombre ya que en esta zona se forma CO, producto de una reacción química entre el CO₂ obtenido en la zona de combustión y el carbono del coque. La reducción del CO₂ es endotérmica, ya que al consumir calor, la temperatura disminuye. Su comportamiento se define bajo la siguiente ecuación:



El consumo de una gran cantidad de calor, desde el punto de vista energético, se puede considerar como perjudicial pero su supresión equivaldría a obtener una fundición altamente oxidada. Una fundición oxidada origina una baja colabilidad, alta sensibilidad al espesor, elevada susceptibilidad al temple, presencia de porosidades, sopladuras, etc.

Parte del agua ingresa al cubilote a través de los materiales de carga. La mayor parte del vapor de agua ingresa con el aire de soplado y reacciona con el combustible para producir CO y H₂.



1.3.4. Zona de combustión u oxidación

La reacción que se da entre el oxígeno y el combustible se denomina combustión, precisamente, donde se produce el calor necesario para el proceso. Esta zona es rica en dióxido de carbono (CO₂) pero deficiente en oxígeno (O₂) como se observa en la Figura 14, y es dependiente de varios factores tales como las condiciones de soplo (temperatura, caudal, enriquecimiento con oxígeno, etc.), de las características del combustible utilizado, diámetro y tipo de refractario del horno.

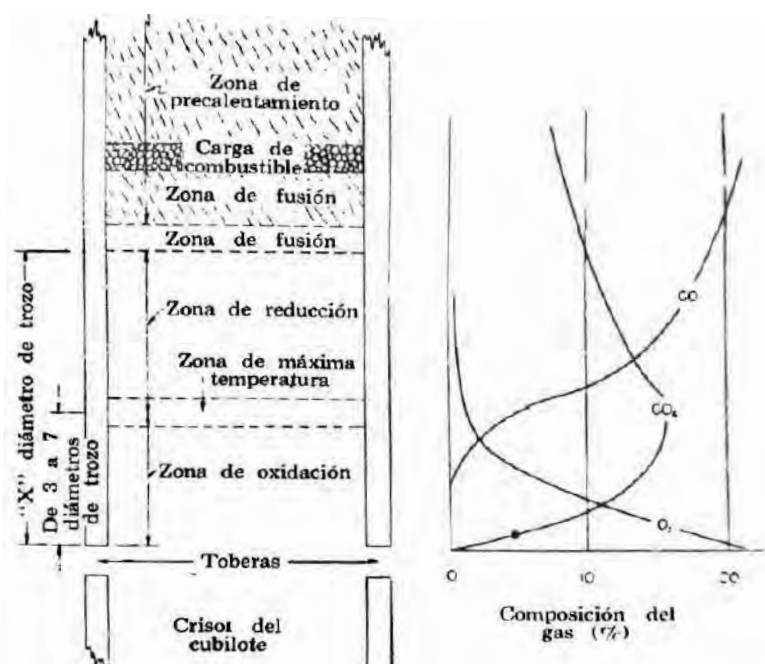


Figura 14. Diagrama idealizado que representa la composición de gases dentro del cubilote.

Fuente: El horno de cubilote y su operación. American Foundrymen's Society (1985).

Si esta zona presenta una mayor altura, el calor liberado por la misma será mucho mayor y más elevada será la temperatura de la fundición. Un factor de diseño que tiene influencia en la forma y altura de la zona es la inclinación de las toberas en conjunto con la influencia de la velocidad de aire. En la Figura 15 se puede observar la incidencia de la inclinación de las toberas sobre la zona de oxidación o combustión.

En la Figura 15a., se muestra que la velocidad baja de soplo, origina corrientes de aire que causan la fusión cerca del refractario. El oxígeno al no llegar al centro de la zona de oxidación o combustión, genera una zona energéticamente muerta.

En la Figura 15b., se observa que al ir modificando la inclinación de las toberas la zona de combustión va variando su altura y hay una tendencia a enfocarse en un punto.

En la Figura 15c., se observa que con un aumento en la velocidad del soplo y una inclinación (8°) en la entrada del aire al cubilote, la zona de combustión se concentra y la combustión tiende a realizarse en el centro del cubilote.

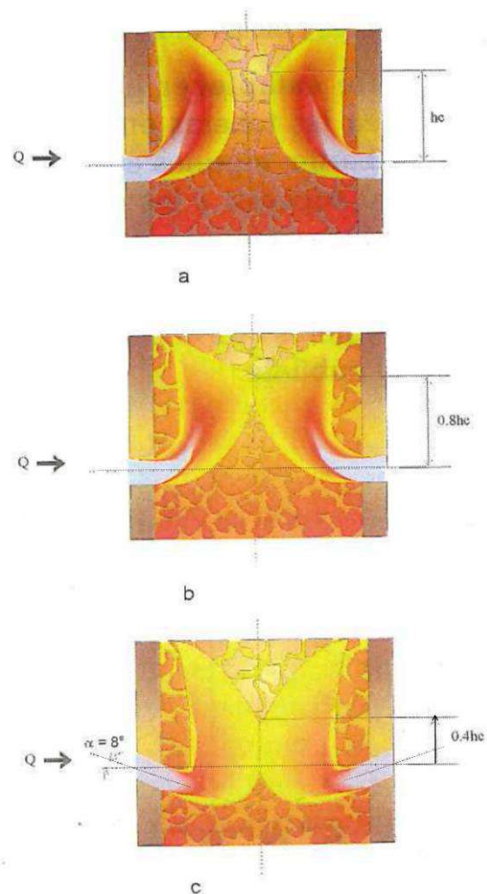


Figura 15. Efecto de la velocidad de aire y la inclinación de las toberas sobre la forma y la altura de la zona de oxidación o combustión.

Fuente: Diseño, operación y control de cubilote. Baquero (2000).

La principal reacción que se da en esta zona es la combustión y viene determinada por la siguiente reacción:



La reacción en esta zona es altamente exotérmica, la velocidad de esta reacción es definida por el tamaño del combustible, la temperatura, la velocidad del aire y contenido de oxígeno del mismo.

Aunque en esta zona la reacción predominante es la generación de energía, al ser una zona altamente oxidante se presentan una serie de reacciones de oxidación metalúrgicas muy poco deseables:





La reacción que predomina es la oxidación del hierro (Fe) ya que, comparado con el silicio (Si), manganeso (Mn) y carbono (C), este presenta una mayor tendencia a oxidarse. Los óxidos se depositan en la superficie de las gotas como películas de escoria.

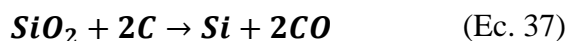
En esta parte del cubilote, se llega a obtener el máximo sobrecalentamiento del hierro y de la escoria, formada por la reacción de los óxidos, cenizas del combustible, revestimiento interno del horno y oxidación de la caliza.

1.3.5. Zona de crisol

Esta zona se ve delimitada por los planos inferiores de las toberas hasta la solera. Por encima de esta, la zona gaseosa es altamente rica en monóxido de carbono. Por su parte, el metal líquido se encuentra en contacto con el coque por períodos muy largos y presenta una alta disolución de carbono.

En el crisol se encuentra el metal líquido y la escoria, la cual flota sobre el metal fundido debido a su densidad. Además, tiene la particularidad en reducir varios de los elementos oxidados en las zonas anteriores como silicio, manganeso y hierro. Al ser reacciones de reducción poco perceptibles su incidencia sobre la energía consumida es mínima. Por su comportamiento, se puede hablar de tres subzonas:

- a. Subzona de reacción:** Va desde el plano inferior de toberas hasta el orificio de escoria. Se genera una significativa cantidad de CO, al ser una zona de carácter reductor.



- b. Subzona de escoria:** Esta subzona hace referencia a la intercara formada entre el metal fundido – escoria. En la operación del cubilote, la descomposición de la caliza reacciona con el dióxido de silicio proveniente de las cenizas, arcilla refractaria o arena adherida a la materia prima para formar silicato de calcio:



Las siguientes reacciones muestran que los reactivos forman parte del metal fundido y los productos se vuelven parte de la escoria:





Desde el punto de vista metalúrgico, la escoria tiene un papel de suma importancia ya que protege a la fundición de la oxidación del aire, se disuelven óxidos y limita la absorción de azufre (esta última característica depende mucho del índice de basicidad de la escoria).

En la práctica del horno de cubilote se considera evaluar la basicidad de la escoria con el **índice de basicidad (I_b)**:

$$I_b = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} \quad (\text{Ec. 45})$$

Según la Ecuación 45, el índice de basicidad se clasifica en base a su valor como:

- Ácida: $I_b < 1$.
- Neutra: $1 < I_b < 1.4$.
- Básica: $I_b > 1.4$.

A medida que la acidez de la escoria aumenta, su temperatura de fusión es más baja y su viscosidad es más alta. Si la basicidad aumenta, funde a más alta temperatura, pero es más fluida.

- c. **Subzona de crisol:** Subzona ubicada entre la solera y la capa de escoria, interfase metal – escoria. Aquí se lleva en gran parte la carburación del proceso de fundición, es por esto que se debe tener en cuenta el porcentaje de carbono de la fundición que se va a elaborar.

Normalmente la distancia entre la solera y el orificio de escoria es de 450 mm ya que permite el almacenaje de aproximadamente el 30% de la producción. Así se puede obtener una fundición de homogeneidad aceptable de composición química.

Influencia de las zonas del cubilote sobre la composición del metal

A lo largo del horno de cubilote, pasando por las cinco zonas, se dan tres fenómenos importantes que modifican directamente la composición química del hierro cargado. El hierro cargado está formado principalmente por hierro, carbono y silicio, y pueden contener cantidades menores de azufre, manganeso y fósforo.

a. Carburación

Existen muchos factores que afectan la cantidad de carbono absorbido durante la fusión, tales como: naturaleza y composición química inicial de la carga metálica, cantidad de combustible, temperatura de fusión, diseño del cubilote, técnica de operación y calidad.

Para determinar el porcentaje de carbono de la fundición en piquera en colada continua, en función de la composición química promedio de la carga metálica (Levi, 1947), se tiene la siguiente relación:

$$\%C_{piq} = 2.4 + \frac{1}{2}\%C_{carga} - \frac{1}{4}(\%Si + \%P)_{piq} \quad (\text{Ec. 46})$$

La concentración de carbono en los hierros fundidos es muy importante ya que tiene un comportamiento grafitizante. Los niveles de carbono y silicio se deben mantener dentro de los límites, evitando así el blanqueo y el fomento de grafitización en forma de láminas.

b. Oxidación de silicio y manganeso

Existe una correlación entre la composición de los gases de escape de CO₂ y las pérdidas de silicio (Si) y manganeso (Mn), y se observa en la Figura 16.

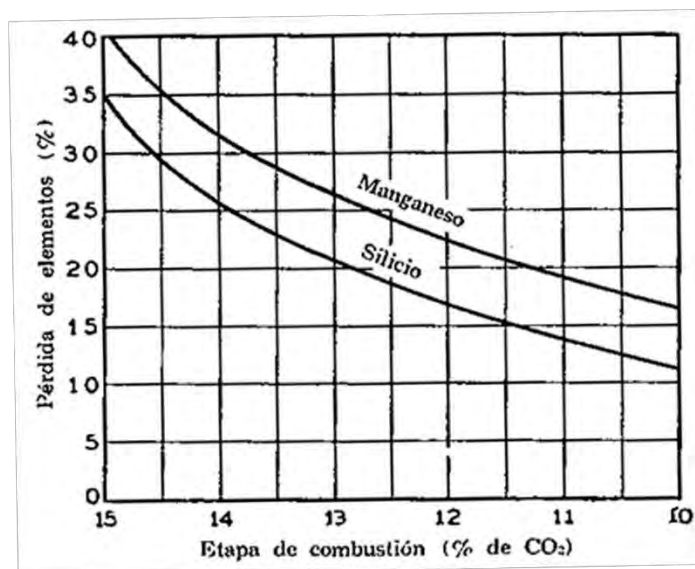


Figura 16. Relación entre la etapa de combustión y el porcentaje de pérdidas de silicio y manganeso.

Fuente: El horno de cubilote y su operación. American Foundrymen's Society (1985).

Estas pérdidas tendrán un efecto directo sobre microestructura del hierro fundido y, por ende, sobre las propiedades mecánicas del metal. Por un lado, el silicio es un elemento fuertemente grafitizante. La influencia que presenta el manganeso es la de neutralizar los efectos dañinos del azufre, promoviendo la formación de sulfuros de manganeso y evitando la segregación de sulfuros de hierros, adicionalmente favorece a la aparición de matriz perlítica.

c. Sulfuración

Está estrechamente relacionada con la carburación, ya que los parámetros que aumentan la carburación estimulan la sulfuración del hierro fundido debido a que el azufre en su mayoría está contenido en el combustible.

El fenómeno de absorción de azufre se puede dar sobre la zona de fusión y la zona de precalentamiento. Debido a que la cantidad y distribución de gases que contienen azufre (SO_2 y S_2) a lo largo de los diferentes niveles del horno es inexacta, no se puede presentar una química exacta de esta absorción. En el proceso de obtención de aleaciones férreas por fusión en horno de cubilote, se presenta este problema. Sin embargo, se puede afirmar que poco después de la entrada del acero, este absorbe azufre pero lo va perdiendo a medida que la temperatura va aumentando (al acercarse a la zona de fusión). Contrario a esto, el hierro colado muestra una mayor absorción justo antes de la zona de fusión.

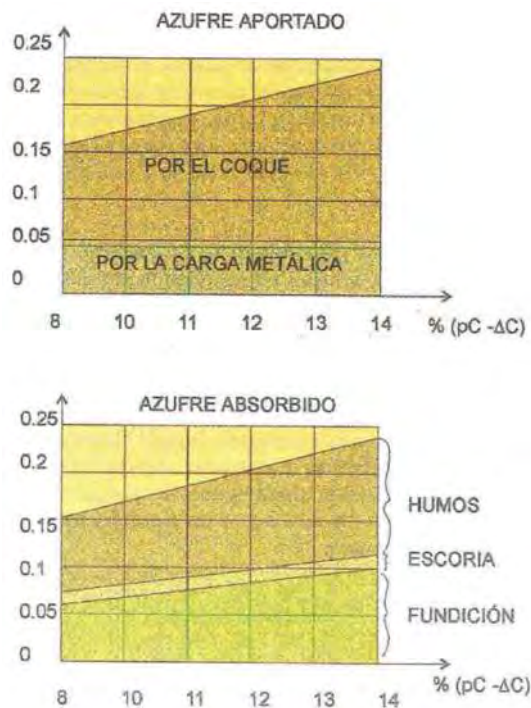


Figura 17. Balance de azufre en la fusión según el porcentaje de combustible en la carga.

Fuente: Diseño, operación y control de cubilote. Baquero (2000).

El azufre tiene influencia sobre el fenómeno de temple invertido, es decir, la zona más dura es el núcleo y la periferia es más blanda. También tiene efectos sobre el enfriamiento, disminuyendo la fluidez del caldo, lo cual produce sopladuras y rechupes en la pieza fundida.

Capítulo 2

Los hornos de cubilote en los talleres del norte del Perú

2.1. Caracterización de los hornos de los talleres participantes.

El procedimiento de caracterización se realizó a partir de visitas técnicas y evaluación visual. Se visitaron siete talleres de fundición en el norte del Perú, de los cuales se pudo obtener información respecto al diseño de los hornos de cubilote, además de sus medidas y disposición de los mismos. En la Tabla 13, se aprecia la ubicación de dichos talleres y el número de hornos con los cuales laboran.

Tabla 13. Relación de talleres participantes.

Taller	Ciudad	Número de hornos
Taller 1	Sullana	01
Taller 2	Sullana	02
Taller 3	Piura	01
Taller 4	Chiclayo	02
Taller 5	Trujillo	01
Taller 6	Trujillo	01
Taller 7	Trujillo	01

Fuente: Elaboración propia.

Durante las visitas realizadas a los talleres participantes se tomaron las medidas de los parámetros de los nueve hornos de cubilote y a la par se verificó si contaban con algunas de las partes más importantes. Estos datos se muestran a continuación. El material refractario usado por los talleres es el mismo, ladrillos de construcción: sílice refractaria.

2.1.1. Taller 1

La empresa ubicada en la ciudad de Sullana, posee un (01) horno de cubilote revestido, como se puede apreciar en la Figura 18. El diseño del mismo fue realizado gracias a la experiencia técnica en este sector. En la Tabla 14, se aprecian los datos tomados del horno del Taller 1.

Tabla 14. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 1

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	730 mm
Diámetro interno	500 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	570 mm
Altura efectiva	1830 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	1
Diámetro de tobera	100 mm
Diámetro de tubería de viento	160 mm
Orificio de escoriado	No

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 18.** Horno de cubilote del Taller 1.

Fuente: Taller de fundición en Sullana.

2.1.2. Taller 2

Ubicada en la ciudad de Sullana, esta empresa posee un (01) horno de crisol para piezas de fundición gris clase 20 ó 25. Cuenta con dos (02) hornos de cubilote, uno con capacidad de fusión de 2 ton/h y otro de 3 ton/h. El diseño de los hornos fue realizado con el apoyo de un equipo técnico de ingenieros de la Universidad de Piura.

En la Tabla 15, se aprecian los datos tomados del primer horno del Taller 2. En la Tabla 16, se aprecian los datos tomados del segundo horno del Taller 2.

Tabla 15. Parámetros actuales del horno de cubilote 01 del Taller 2.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	740 mm
Diámetro interno	550 mm
Espesor de refractario	85 mm
Altura base-toberas	670 mm
Altura efectiva	2450 mm
Caja o anillo de viento	Sí
Toberas	4
Diámetro de tobera	50 mm
Diámetro de tubería de viento	200 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Parámetros actuales del horno de cubilote 02 del Taller 2

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	1030 mm
Diámetro interno	800 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	700 mm
Altura efectiva	2130 mm
Caja o anillo de viento	Sí
Toberas	4
Diámetro de tobera	150 mm
Diámetro de tubería de viento	300 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 19.** Horno de cubilote 01 del Taller 2.

Fuente: Taller de fundición en Sullana.



Figura 20. Horno de cubilote 02 del Taller 2.

Fuente: Taller de fundición en Sullana.

2.1.3. Taller 3

La empresa labora en la ciudad de Piura y cuenta con un (01) horno de cubilote revestido con una capacidad de producción de 0.5 ton/h. En la Tabla 17, se aprecian los datos obtenidos en el horno del Taller 3.

Tabla 17. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 3.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	700 mm
Diámetro interno	600 mm
Espesor de refractario	30 mm
Altura base-toberas	800 mm
Altura efectiva	1200 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	1
Diámetro de tobera	100 mm
Diámetro de tubería de viento	100 mm
Orificio de escoriado	No

Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Horno de cubilote del Taller 3
Fuente: Taller de fundición en Piura.

2.1.4. Taller 4

La empresa ubicada en la ciudad de Chiclayo, posee dos (02) hornos de cubilote revestidos. El diseño de los hornos fue realizado gracias a su experiencia técnica en este sector.

En la Figura 22, se muestra a la izquierda uno de los hornos con una capacidad de producción de 1.25 ton/h; mientras que el horno mostrado a la derecha de la imagen tiene una capacidad de producción de 2 ton/h.

En la Tabla 18, se muestran los datos obtenidos en el primer horno del Taller 4. En la Tabla 19, se muestran los datos obtenidos en el segundo horno del Taller 4.

Tabla 18. Parámetros actuales del horno de cubilote 01 del Taller 4.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	800 mm
Diámetro interno	600 mm
Espesor de refractario	85 mm
Altura base-toberas	900 mm
Altura efectiva	1800 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	2
Diámetro de tobera	150 mm
Diámetro de tubería de viento	150 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Parámetros actuales del horno de cubilote 02 del Taller 4.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	1230 mm
Diámetro interno	1000 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	1100 mm
Altura efectiva	2100 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	2
Diámetro de tobera	250 mm
Diámetro de tubería de viento	300 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 22.** Hornos de cubilotes del Taller 4.

Fuente: Taller de fundición en Chiclayo.

2.1.5. Taller 5

Ubicada en la ciudad de Trujillo, esta empresa cuenta con un (01) horno de cubilote revestido con una capacidad de producción de 0.5 ton/h. El diseño del mismo fue realizado gracias a su experiencia en este sector. En la Tabla 20, se muestran los datos obtenidos en el primer horno del Taller 5.

Tabla 20. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 5.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	960 mm
Diámetro interno	800 mm
Espesor de refractario	63 mm
Altura base-toberas	1600 mm
Altura efectiva	1700 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	2
Diámetro de tobera	100 mm
Diámetro de tubería de viento	200 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Horno de cubilote del Taller 5.
Fuente: Taller de fundición en Trujillo.

2.1.6. Taller 6

La empresa que realiza sus labores en la ciudad de Trujillo, cuenta con un (01) horno de cubilote revestido con dos toberas, su capacidad de fusión es de 2 ton/h. El diseño del mismo fue realizado gracias a su experiencia técnica en este sector. En la Tabla 21, se muestran los datos obtenidos del horno del Taller 6.

Tabla 21. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 6.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	950 mm
Diámetro interno	780 mm
Espesor de refractario	70 mm
Altura base-toberas	670 mm
Altura efectiva	1540 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	2
Diámetro de tobera	250 mm
Diámetro de tubería de viento	140 mm
Orificio de escoriado	No

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Horno de cubilote del Taller 6.
Fuente: Taller de fundición en Trujillo.

2.1.7. Taller 7

Esta empresa de la ciudad de Trujillo, cuenta con un (01) horno de cubilote revestido con capacidad de fusión de 1.8 ton/h. El diseño del mismo fue realizado gracias a su experiencia técnica en este sector. En la Tabla 22, se muestran los datos obtenidos en el horno del Taller 7 y en la Figura 25 se observa el cubilote con el cual laboran.

Tabla 22. Parámetros actuales del horno de cubilote del Taller 7.

Parámetro	Medida
Diámetro exterior	760 mm
Diámetro interno	630 mm
Espesor de refractario	50 mm
Altura base-toberas	870 mm
Altura efectiva	4000 mm
Caja o anillo de viento	No
Toberas	2
Diámetro de tobera	100 mm
Diámetro de tubería de viento	100 mm
Orificio de escoriado	Sí

Fuente: Elaboración propia.



Figura 25. Horno de cubilote del Taller 7.
Fuente: Taller de fundición en Trujillo.

2.2. Descripción del funcionamiento de los hornos en el norte del Perú.

Es necesario describir el funcionamiento de los hornos de cubilote para lograr entender cómo es que se obtienen las piezas de fundición gris en el norte del Perú. A continuación se muestra el procedimiento seguido por los talleres de fundición para poder operar el horno de cubilote. Puesto que sólo uno de los talleres brindó información detallada sobre cómo se realiza el procedimiento se va a describir el mismo incluyendo los datos recabados en cada una de las visitas realizadas a los siete talleres.

- **Preparación y operación del horno:**

- **Sanado de refractario:** Con objeto de poder trabajar se hace necesario el parchado o sanado del revestimiento refractario. Se pica las zonas dañadas o afectadas por la escoria o combustible adheridos para lograr que el parchado se pueda adherir sobre una base firme de refractario. Otra manera de sanar el refractario, es tumbar el refractario utilizado anteriormente y reemplazarlo por ladrillos de sílice.



Figura 26. Procedimiento de sanado de refractario.

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.

- **Precalentamiento:** Previamente al proceso de fundición, se coloca madera de árbol o leña durante un periodo de 1 1/2 hora con el objetivo de realizar el encendido y precalentamiento del horno. Posteriormente, se agrega combustible de manera intermitente en el lapso de una (01) hora.
- **Inyección de aire soplado:** Se procede a taponar todos los agujeros de salida, y a encender el ventilador. El ventilador que está conectado directamente a la tubería, es por donde el aire se reparte por medio del semi-anillo de viento a las toberas.



Figura 27. Detalle de la conexión de la tubería que va desde el ventilador hasta el semi-anillo de viento.

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.

- **Modo de operación:** El combustible utilizado por el taller ingresa al horno con sacos, los cuales generan grandes emisiones de humo al quemarse dentro del horno. Además, la materia prima (chatarra) se coloca en el horno por la parte superior, sin una previa limpieza ni selección. Al cargarse los materiales, se utiliza fundente conocido como caliza (compuesto de carácter básico).

El proceso de sangrado se realiza de manera intermitente, consiste en dejar acumular metal y escoria fundida en el horno durante 45 min. Después, se abre el tapón y el metal pasa por un canal y es recogido en una callana. El primer caldo no sale totalmente líquido por lo que se descarta por ser un hierro frío, pero se vuelve a fundir al igual que la escoria.

Al finalizar el llenado de las callanas, se corta el caldillo y se procede a vaciar el caldo en los moldes preparados previamente.



Figura 28. Ingreso de la materia prima por la parte superior del horno de cubilote.

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.



Figura 29. Recepción del hierro fundido en una callana.

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.



Figura 30. Proceso de grandes trozos extracción de escoria en un molde abierto.

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.

- **Desfondado de horno de cubilote:** Para desfondar el horno se quitan los seguros y pilares de madera colocados en la parte inferior del mismo, con el objeto de soportar el peso de todas las cargas. En caso que el horno se deje enfriar demasiado, el hierro fundido empieza su proceso de solidificación y se hace muy difícil quitar el fondo, incluyendo escoria, carbón en piedra y hierro fundido excedente. Finalmente, el horno quedará sin fondo con todo el exceso en el suelo del horno.



Figura 31. Horno de cubilote sin fondo con carga en exceso en el suelo.
Fuente: Taller 3 en la ciudad de Piura.

2.3. Diagnóstico de los hornos de cubilote en el norte del Perú.

2.3.1. Diagnóstico de los hornos de cubilote participantes.

Luego de haber presentado los datos del diseño de los hornos de cubilote usados en el norte del Perú, para la obtención de piezas de fundiciones grises, se ha procedido a verificar si los mismos son los correctos. A continuación, se muestran los datos calculados en base a lo explicado en el capítulo 1.

a. Taller 1

En la Tabla 23 se muestran los valores calculados de los parámetros establecidos en el capítulo 1.

Tabla 23. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 1.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	710 mm
Diámetro interno	500 mm
Espesor de refractario	90 mm
Altura base-toberas	500 mm
Altura efectiva	2500 mm
Toberas	2
Diámetro de tobera	130 mm
Diámetro de tubería de viento	138 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 24, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño del horno de cubilote.

Tabla 24. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 1.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	500 mm	500 mm
D_e	710 mm	730 mm
e_{ref}	90 mm	100 mm
h_t	500 mm	570 mm
H_e	2500 mm	1830 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	2	1
d_{tobera}	130 mm	100 mm
d_c	138 mm	160 mm
$C_{mín}$	1 ton/h	1 ton/h
$C_{máx}$	1.75 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.49 m ³ /h/ton	0.35 m ³ /h/ton
$I_{p, mín}$	0.28 m ³ /h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 24 se puede observar que la capacidad de producción máxima de hierro colado de esta empresa es de 1 ton/h, esta es la producción mínima esperada para un cubilote con estas dimensiones. Este cubilote tiene la capacidad de producir entre 1 ton/h y 1.75 ton/h.

Para el cubilote como el que se estudia, la altura efectiva deberá ser de 2500 mm como mínimo, el cubilote del Taller 1 cuenta con una altura efectiva de 1830 mm. Un indicador de que la altura efectiva se encuentra por debajo de lo recomendado, es un bajo índice de precalentamiento, sin embargo, como se observa en la Tabla 24, este parámetro está dentro del rango debido a que se está produciendo de acuerdo a la capacidad que se recomienda en la tabla anterior.

Ausencia de sombrero atrapa chispas, lo cual indica una posible contaminación a las zonas cercanas. La puerta de carga coincide con la chimenea del cubilote, en la Figura 32 la circunferencia roja se observa esta característica. Como muestra la circunferencia amarilla en la Figura 32, solo cuenta con tres columnas de apoyo, la recomendación es de cuatro columnas.

El espesor del refractario es mayor al mínimo recomendado, lo cual es beneficioso puesto que no genera pérdidas por radiación. El material refractario ácido utilizado, no es el correcto ya que al utilizar un fundente como la caliza, existe una reacción entre ambos que va destruyendo al refractario. La disposición de los ladrillos refractarios es irregular, posibilitando el choque entre este y las cargas.

No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la tobera. Según muestra la Tabla 24, el número de toberas es menor al mínimo recomendado. La tobera existente está conectada directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado. Esto genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y se disperse, causando que la zona de combustión sea irregular. Un mínimo de 2 toberas garantiza un reparto uniforme del aire ingresante al horno.



Figura 32. Horno de cubilote de Taller 1.

Fuente: Taller 1 en la ciudad de Sullana.

b. Taller 2

El Taller 2 presenta dos hornos de cubilote, en la Tabla 25 se muestran los valores calculados de los parámetros para el primer horno.

Tabla 25. Parámetros calculados para el horno de cubilote 01 del Taller 2.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	750 mm
Diámetro interno	550 mm
Espesor de refractario	85 mm
Altura base-toberas	550 mm
Altura efectiva	2750 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	142 mm
Diámetro de tubería de viento	152 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 26, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño este cubilote.

Tabla 26. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 01 de Taller 2.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	550 mm	550 mm
D_e	750 mm	740 mm
e_{ref}	95 mm	85 mm
h_t	550 mm	670 mm
H_e	2750 mm	2450 mm
Anillo de viento	Sí	Si
N_T	3	4
d_{tobera}	142 mm	50 mm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 01 de Taller 2. (Continuación)

Parámetro	Calculado	Medido
d_c	152 mm	160 mm
$C_{mín}$	1.21 ton/h	2 ton/h
$C_{máx}$	2.12 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.54 m ³ /h/ton	0.29 m ³ /h/ton
$I_{p, mín}$	0.31 m ³ /h/ton	
Orificio de escoria	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 26 se puede observar que la capacidad de producción de hierro colado de esta empresa usando este horno es de 2 ton/h. Según sus dimensiones, la capacidad de producción de este horno estará entre 1.21 ton/h y 2.12 ton/h. Esto indica que su capacidad de producción real está dentro de lo esperado.

Para el cubilote como el que se estudia, la altura efectiva deberá ser de 2750 mm como mínimo; el cubilote 01 del Taller 2, como muestra la Tabla 26, cuenta con una altura efectiva de 2450 mm, por tanto, se encuentra por debajo de lo recomendado y esto afecta al índice de precalentamiento, el cual se observa que está por debajo del rango que se recomienda en la Tabla 26. Esto quiere decir que la zona de precalentamiento tiene un dimensionamiento erróneo, con lo cual se pierde una gran cantidad de calor que podría ser utilizada para precalentar la carga.

Cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador con el anillo de viento se observa en la Figura 33. El número de toberas es mayor al mínimo recomendado. Esto facilita la distribución de aire en la zona de combustión y hace que la fusión de la materia prima metálica sea eficiente.



Figura 33. Detalle de la conexión del ventilador a la caja de viento.

Fuente: Taller 02 en la ciudad de Sullana.

Cuenta con un orificio de escoriado y una piquera de escoriado, lo cual facilita la salida de la escoria y el vaciado del caldo a la temperatura adecuada en los moldes. Sin embargo, en este horno de cubilote, el orificio de escoriado, se encuentra a 180° del canal de colada y a 10 cm por debajo del plano de las toberas. Una de las consecuencias negativas de colocar el orificio de escoriado muy cerca de las toberas, es que la escoria se enfría más rápido y se hace menos fluida, lo que puede taponar el orificio de escoriado e incluso las toberas.

En la Tabla 27, se muestran los valores calculados de los parámetros para el segundo horno del Taller 2.

Tabla 27. Parámetros calculados para el horno de cubilote 02 del Taller 2.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	1050 mm
Diámetro interno	800 mm
Espesor de refractario	110 mm
Altura base-toberas	800 mm
Altura efectiva	4000 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	206 mm
Diámetro de tubería de viento	221 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 28, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el dimensionamiento del segundo horno de cubilote.

Tabla 28. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 02 de Taller 2.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	800 mm	800 mm
D_e	1050 mm	1030 mm
e_{ref}	110 mm	100 mm
h_t	800 mm	700 mm
H_e	4000 mm	2130 mm
Anillo de viento	Sí	Sí
N_T	3	4
d_{tobera}	207 mm	150 mm
d_c	221 mm	300 mm
$C_{mín}$	2.56 ton/h	3 ton/h
$C_{máx}$	4.48 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.78 m^3h/ton	0.36 m^3h/ton
$I_{p, mín}$	0.45 m^3h/ton	
Orificio de escoria	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 28 se puede observar que la capacidad de producción máxima de hierro colado de esta empresa usando este horno de cubilote es de 3 ton/h. Según los cálculos recomendados, este cubilote tiene una capacidad de producción entre 2.56 ton/h y 4.48 ton/h.

Para el cubilote en estudio, la altura efectiva deberá ser de 4000 mm como mínimo, el cubilote 02 del Taller 2 cuenta con una altura efectiva de 2130 mm.

Este mal dimensionamiento de altura efectiva, genera que el índice de precalentamiento, el cual se observa en la Tabla 28, esté muy por debajo del rango debido. Este dimensionamiento erróneo de la zona de precalentamiento ocasiona una gran pérdida de calor y hará que la zona de fusión se desplace con riesgo de baja temperatura en el caldo.

Cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador con el anillo de viento ayuda a que el aire se precaliente debido a la radiación. El número de toberas es igual al mínimo recomendado. Esto facilita la distribución de aire en la zona de combustión y hace que la fusión de la materia prima metálica sea eficiente.

La puerta lateral permite el fácil encendido y limpieza del horno. Este cubilote, no cuenta con esta puerta, pues el proceso de encendido y limpieza lo realiza por el pico de colada, lo que debilita las paredes del refractario.

Cuenta con un orificio de escoriado. Sin embargo, en este horno de cubilote, el orificio de escoriado, se encuentra a 180° del canal de colada y a 10 cm por debajo del plano de las toberas. Una de las consecuencias negativas de colocar el orificio de escoriado muy cerca de las toberas, es que la escoria se enfría más rápido y se hace menos fluida, lo que puede taponar el orificio de escoriado e incluso las toberas.

c. Taller 3

En la Tabla 29, se muestran los valores calculados de los parámetros establecidos en el capítulo 1.

Tabla 29. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 3.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	830 mm
Diámetro interno	600 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	600 mm
Altura efectiva	3000 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	155 mm
Diámetro de tubería de viento	166 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 30, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño de este horno.

Tabla 30. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 3.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	600 mm	600 mm
D_e	830 mm	700 mm
e_{ref}	100 mm	30 mm
h_t	600 mm	800 mm
H_e	3000 mm	1200 mm
Anillo de viento	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 3. (Continuación)

Parámetro	Calculado	Medido
N_T	3	1
d_{tobera}	155 mm	100 mm
d_c	166 mm	100 mm
$C_{mín}$	1.44 ton/h	0.5 ton/h
$C_{máx}$	2.52 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.59 m ³ /h/ton	0.11 m ³ /h/ton
$I_{p, mín}$	0.34 m ³ /h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 30 se puede observar que la capacidad de producción de hierro colado de esta empresa es de 0.5 ton/h. Según las dimensiones, este cubilote tiene la capacidad de producir entre 1.44 ton/h y 2.52 ton/h. Esto indica que la capacidad de fusión del cubilote está siendo completamente desperdiciada. El horno tiene capacidad para poder fundir más de acuerdo a sus dimensiones. Para el cubilote como el que se estudia, la altura efectiva deberá ser de 3000 mm como mínimo, el cubilote del Taller 3 cuenta con una altura efectiva de 1200 mm. Como consecuencia, el índice de precalentamiento, el cual se observa en la Tabla 30, está muy por debajo del rango debido, también, a que no se aprovecha toda su capacidad de producción. El espesor del refractario es mucho menor al mínimo recomendado, esto genera grandes pérdidas de calor y dificulta la fusión de materiales.

No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la única tobera. La tobera existente está conectada directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado. Lo anterior genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y causando que la zona de combustión sea irregular. El número de toberas mínimo recomendado debido a sus dimensiones es de 3 para garantizar un flujo de aire constante y repartido.



Figura 34. Mal sistema de alimentación de viento (amarillo). Chimenea y puerta de carga (rojo).

Fuente: Taller 3 en la ciudad de Sullana.

d. Taller 4

Al igual que el Taller 2, el Taller 4 tiene dos hornos de cubilote. En la Tabla 31, se muestran los valores calculados de los parámetros para el primero de ellos.

Tabla 31. Parámetros calculados para el horno de cubilote 01 del Taller 4.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	830 mm
Diámetro interno	600 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	600 mm
Altura efectiva	3000 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	155 mm
Diámetro de tubería de viento	166 mm

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 32, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño del horno.

Tabla 32. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 01 del Taller 4.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	600 mm	600 mm
D_e	830 mm	800 mm
e_{ref}	100 mm	85 mm
h_t	600 mm	900 mm
H_e	3000 mm	1800 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	3	2
d_{tobera}	155 mm	150 mm
d_c	166 mm	150 mm
$C_{mín}$	1.44 ton/h	1.25 ton/h
$C_{máx}$	2.52 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.59 m ³ /ton	0.17 m ³ /ton
$I_{p, mín}$	0.34 m ³ /ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 32 se puede observar que la capacidad de producción máxima de hierro colado de esta empresa es de 1.25 ton/h, según datos del taller. Sin embargo, debido a sus dimensiones, es capaz de producir entre 1.44 ton/h y 2.52 ton/h, por tanto hay un amplio rango de producción que el horno no cubre.

La altura efectiva de este cubilote deberá ser de 3000 mm como mínimo, sin embargo, el valor medido es de 1800 mm. El índice de precalentamiento, el cual se observa en la Tabla 32, está muy por debajo del esperado debido a que no se aprovecha su capacidad de producción y al mal dimensionamiento de su altura efectiva. Como se observa en la Figura 35 existe un pequeño desvío en la torre del horno de cubilote.

El espesor del refractario es menor al mínimo recomendado, lo cual causa pérdidas de calor y dificulta la fusión de materiales.

No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la tobera. El número de toberas es menor al mínimo recomendado. Las dos toberas están conectadas directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado. Esto genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y se disperse, causando que la zona de combustión sea irregular y la zona de fusión disminuya. Es necesario tener como mínimo 3 toberas para garantizar una equitativa entrada de aire.



Figura 35. Disposición del horno 01 del Taller 4
Fuente: Taller 4 en la ciudad de Chiclayo.

En la Tabla 33, se muestran los valores calculados de los parámetros para el segundo horno del Taller 4.

Tabla 33. Parámetros calculados para el horno de cubilote 02 del Taller 4.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	1280 mm
Diámetro interno	1000 mm
Espesor de refractario	125 mm
Altura base-toberas	1000 mm
Altura efectiva	5000 mm
Toberas	4
Diámetro de tobera	224 mm
Diámetro de tubería de viento	240 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 34, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño este cubilote.

Tabla 34. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote 02 del Taller 4.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	1000 mm	1000 mm
D_e	1280 mm	1230 mm
e_{ref}	125 mm	100 mm
h_t	1000 mm	1100 mm
H_e	5000 mm	2100 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	4	2
d_{tobera}	224 mm	250 mm
d_c	240 mm	300 mm
$C_{mín}$	1 ton/h	2 ton/h
$C_{máx}$	1.75 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.56 m ³ h/ton	0.82 m ³ h/ton
$I_{p, mín}$	0.98 m ³ h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de producción de hierro colado de esta empresa es, según muestra la Tabla 34, de 2 ton/h. Sin embargo, por las dimensiones que presenta, la capacidad de producción de este horno debe estar entre 1 ton/h y 1.75 ton/h. Se observa que la producción del horno excede a lo esperado. Asimismo, la altura efectiva deberá ser como mínimo de 5000 mm, valor que no se encuentra en la realidad pues, la medida este parámetro es de 2100 mm. El índice de precalentamiento, se encuentra dentro del rango debido principalmente a que, se está trabajando a la máxima capacidad de producción del horno. No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la tobera. El número de toberas es menor al mínimo recomendado. La tobera existente está conectada directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado. Lo anterior genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y se disperse, causando que la zona de combustión sea irregular.



Figura 36. Sistema de alimentación de aire con conexión directa al ventilador.

Fuente: Taller 4 en la ciudad de Chiclayo.

e. Taller 5

En la Tabla 35, se muestran los valores calculados de los parámetros establecidos para el horno de cubilote.

Tabla 35. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 5.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	1050 mm
Diámetro interno	800 mm
Espesor de refractario	110 mm
Altura base-toberas	800 mm
Altura efectiva	4000 mm
Toberas	4
Diámetro de tobera	207 mm
Diámetro de tubería de viento	222 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 36, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño del horno.

Tabla 36. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 5.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	800 mm	800 mm
D_e	1050 mm	960 mm
e_{ref}	110 mm	63 mm
h_t	800 mm	1600 mm
H_e	4000 mm	1700 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	3	2
d_{tobera}	207 mm	100 mm
d_c	222 mm	200 mm
$C_{mín}$	2.56 ton/h	0.5 ton/h
$C_{máx}$	4.48 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.78 m ³ h/ton	1.7 m ³ h/ton
$I_{p, mín}$	0.45 m ³ h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de producción de hierro colado de esta empresa, según datos de la empresa, es de 0.5 ton/h. Este cubilote tiene la capacidad de producir entre 2.56 ton/h y 4.48 ton/h, por tanto, este horno está trabajando muy por debajo de la capacidad establecida por su diseño.

Para el cubilote como el que se estudia, la altura efectiva deberá ser de 4000 mm como mínimo, el cubilote del Taller 5 cuenta con una altura efectiva de 1700 mm. La altura efectiva se encuentra por debajo de lo recomendado pero el índice de precalentamiento, como se observa en la Tabla 36, se encuentra sobre el rango, debido a que al existir un valor de producción menor al recomendado y con las dimensiones de diseño, la carga precalienta de manera eficiente.

El espesor del refractario es menor al mínimo recomendado, lo cual causa pérdidas de calor y dificulta la fusión de materiales.

No cuenta con un sistema de alimentación de aire (encerrado de amarillo en la Figura 37). La conexión del ventilador es directo con la tobera. El número de toberas es menor al mínimo recomendado. La tobera existente está conectada directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado. Lo anterior genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y se disperse, causando que la zona de combustión sea irregular.



Figura 37. Horno de cubilote mostrando sus fallas en el diseño.
Fuente: Taller 5 en la ciudad de Trujillo.

f. Taller 6

En la Tabla 37 se muestran los valores calculados de los parámetros necesarios en el horno de cubilote.

Tabla 37. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 6.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	1010 mm
Diámetro interno	780 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	780 mm
Altura efectiva	3900 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	202 mm
Diámetro de tubería de viento	216 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 38, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño del horno a estudiar.

Tabla 38. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 6.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	780 mm	780 mm
D_e	1010 mm	950 mm
e_{ref}	100 mm	70 mm
h_t	780 mm	670 mm
H_e	3900 mm	1540 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	3	2
d_{tobera}	202 mm	250 mm
d_c	216 mm	140 mm
$C_{mín}$	2.43 ton/h	2 ton/h
$C_{máx}$	4.26 ton/h	
$I_{p, máx}$	0.76 m ³ /h/ton	0.38 m ³ /h/ton
$I_{p, mín}$	0.44 m ³ /h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos entregados por el taller, el horno de cubilote trabaja con una capacidad de fusión de 2 ton/h. Según lo mostrado en la Tabla 38, la capacidad de producción del horno, debido a sus dimensiones, está entre 2.43 ton/h y 4.26 ton/h. Esto demuestra que el horno no trabaja dentro del rango recomendado.

La altura efectiva deberá ser de 3900 mm como mínimo, el cubilote del Taller 6 cuenta con una altura efectiva de 1540 mm. El valor de altura efectiva se encuentra por debajo de lo recomendado.

Junto con una baja capacidad de producción, originan que el índice de precalentamiento, como se observa en la Tabla 38, se encuentre fuera del rango. Esto generará problemas en la fusión, ya que las cargas necesitarán mayor calor para fundir.

El espesor del refractario es menor al mínimo recomendado, lo cual causa pérdidas de calor y dificulta la fusión de materiales. La puerta de carga coincide con la chimenea del cubilote (encerrado de rojo en la Figura 38).

No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la tobera (encerrado de amarillo en la Figura 38). El número de toberas es menor al mínimo recomendado. Es necesario contar con 3 toberas como mínimo ya que con 2 toberas, no se logra una distribución homogénea del aire.

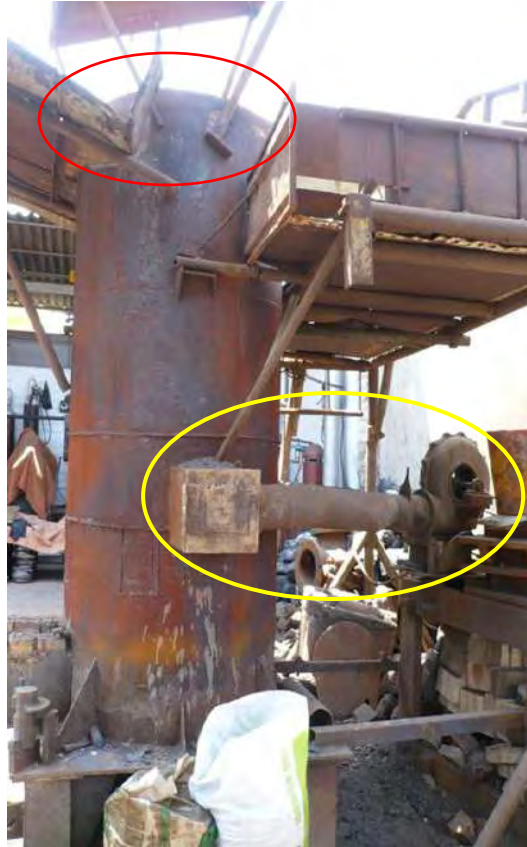


Figura 38. Horno de cubilote del Taller 6 mostrando las deficiencias más resaltantes.
Fuente: Taller 6 en la ciudad de Trujillo.

g. Taller 7

En la Tabla 39, se muestran los valores calculados de los parámetros necesarios para el horno de cubilote del Taller 7.

Tabla 39. Parámetros calculados para el horno de cubilote del Taller 7.

Parámetro	Calculado
Diámetro exterior	860 mm
Diámetro interno	630 mm
Espesor de refractario	100 mm
Altura base-toberas	630 mm
Altura efectiva	3150 mm
Toberas	3
Diámetro de tobera	163 mm
Diámetro de tubería de viento	174 mm

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 40, se tiene la comparación de los principales parámetros para poder caracterizar el diseño de este cubilote.

Tabla 40. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 7.

Parámetro	Calculado	Medido
D_i	630 mm	630 mm
D_e	860 mm	760 mm
e_{ref}	100 mm	50mm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Comparación de los parámetros calculados y medidos para el horno de cubilote del Taller 7. (Continuación)

Parámetro	Calculado	Medido
h_t	630 mm	870 mm
H_e	3150 mm	4000 mm
Anillo de viento	Sí	No
N_T	3	2
d_{tobera}	163 mm	100 mm
d_c	175 mm	100 mm
$C_{mín}$	1.59 ton/h	1.8 ton/h
$C_{máx}$	2.78 ton/h	
$I_p, máx$	0.62 m ³ /h/ton	0.69 m ³ /h/ton
$I_p, mín$	0.35 m ³ /h/ton	
Orificio de escoria	Sí	No

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 40 se puede observar que la capacidad de producción de hierro colado de esta empresa es de 1.8 ton/h. Este cubilote tiene la capacidad de producir entre 1.59 ton/h y 2.78 ton/h, debido a su dimensiones. Esto significa que la capacidad de producción del horno está dentro del rango recomendado.

El cubilote del Taller 7 debe presentar una altura efectiva de 3150 mm como mínimo, pero este valor medido es de 4000 mm. El sobredimensionamiento de la altura efectiva conlleva a un mejor índice de precalentamiento.

La Tabla 40 muestra que el índice de precalentamiento es mayor al rango recomendado, esto se traduce en que las cargas estarán lo suficientemente calientes para fundir y una mejor eficiencia del proceso.

No cuenta con un sistema de alimentación de aire. La conexión del ventilador es directo con la tobera. El número de toberas es menor al mínimo recomendado. Las toberas están conectadas directamente con el ventilador pero el diámetro de la tubería es mayor al recomendado.

Lo anterior genera que el flujo de aire al ingresar sea lento y se disperse, causando que la zona de combustión sea irregular. Además sin la presencia de un anillo de viento, el aire ingresa frío y sumado a un reparto irregular de aire, esto supone que la zona de fusión disminuya y origine baja temperatura en el caldo.

El espesor del refractario es menor al mínimo recomendado, lo cual causa pérdidas de calor y dificulta la fusión de materiales.



Figura 39. Interior del horno del Taller 7, distribución incorrecta del refractario.

Fuente: Taller 7 en la ciudad de Trujillo.

Cada horno de cubilote presenta problemas puntuales respecto a su dimensionamiento pero existen problemas que se hacen común a todos los hornos del norte peruano.

Un problema en común a todos los hornos es la mala selección de material refractario. Se utiliza arcilla refractaria en forma de ladrillo de construcción, este material tiene un comportamiento ácido; los talleres usan como fundente a la caliza que tiene un comportamiento básico. Debido a la temperatura que se trabaja, la reacción entre ambos, se ve favorecida, causando el consumo del refractario. Esto último supone una pérdida de calor necesario para la fusión de materia prima y aparición de escoria resultante de la reacción, en exceso.

Otro problema que presentan los hornos respecto del refractario utilizado, es la disposición del mismo dentro de los hornos. Al no colocarse de manera correcta, se corre riesgo que las cargas de materia prima choquen con este y se originen partículas de refractario y originen defectos por inclusiones de sedimentos o repercutan sobre la desulfuración, debido a su carácter ácido.

Exceptuando a los hornos del Taller 2, los hornos restantes presentan ausencia del orificio de escoriado en el horno. Este orificio de escoriado debe ubicarse a 15 cm por debajo del plano de toberas. Es necesario la existencia de un orificio de escoriado para poder evitar defectos en la pieza final debido a inclusiones. Además, la puerta de carga coincide con la chimenea de gases, esto genera que el procedimiento de carga no se realice de manera correcta.

2.3.2. Diagnóstico de hornos de cubilote.

En base a los datos obtenidos en los puntos anteriores se han comparado los parámetros de diseño y materiales utilizados durante el funcionamiento del horno de cubilote. A través de un análisis FODA se pretende indicar las ventajas y desventajas de los hornos de cubilote en el proceso de fundición en el norte del Perú a partir de los puntos críticos (tomando como referencias las debilidades y amenazas) y de los aspectos positivos (tomando como referencia las fortalezas y oportunidades).

Tabla 41. Análisis FODA del diseño de hornos de cubilote del norte del Perú.

Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de fusión. Pese a las deficiencias técnicas de sus hornos son capaces de obtener productos. - Poseen coraza soldada que le permite soportar mayor presión en el cubilote. - Cumplen con tener un revestimiento refractario. 	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño de los hornos de cubilote no es el adecuado, lo que se traduce en menor eficiencia y mayor inversión en mantenimiento y combustible para obtener el metal fundido. - El horno de cubilote sin chimenea atrapa gases es dañino porque emite gases contaminantes a altas temperaturas. - Las empresas corren el riesgo de tener problemas con los alrededores por las emisiones. - Desaprovechamiento de la carga y del combustible
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> - En la mayoría de hornos es posible mejorar su altura para poder mejorar su índice de precalentamiento. - Existe la posibilidad de incluir anillos o cajas de viento y aumentar toberas con la inclinación necesaria. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los riesgos que se corren por la falta de control de gases de emisión es muy alta. - La contaminación al medio ambiente es altísima y un organismo regulador podría cerrar el taller. - Algunas corazas son puestas con remaches y la presión ejercida muchas veces es tan alta que podría explotar.

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de: Datos tomados de: “Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú”. Guerrero, 2018)

Los puntos críticos del diseño se presentan a continuación:

- Deficiencia en la altura recomendada del horno de cubilote.
- Inadecuado sistema de ventilación (toberas, tuberías, anillo o caja de viento).
- Ausencia de orificio y piquera de escoriado.
- Falta de chimenea atrapa gases.

Un punto que destaca, al igual que los anteriores, en los cubilotes empleados no cuentan con un plan de mantenimiento establecido. En el caso del refractario, se reemplazan las partes dañadas y no operan en condiciones óptimas.

Problemas prioritarios

Los problemas prioritarios se mencionan a continuación:

- **Altura del horno de cubilote:** En la mayoría de casos, la altura de hornos no guarda relación con los estándares de fabricación, pues es menor que la mínima

recomendada. Esto dificulta el precalentamiento de la carga metálica, disminuyendo la capacidad de producción del horno de cubilote.

- **Sistema de alimentación de aire:** Para garantizar la llegada de aire necesaria para la combustión, el sistema de alimentación de aire deberá estar dimensionado adecuadamente. En el norte del Perú, el sistema de ventilación es inadecuado ya sea por su mal dimensionamiento o por la falta de elementos instalados (anillo o caja de viento, tuberías de distribución de aire y la mala disposición de las toberas), que no permiten la llegada de aire necesario para la combustión.
- **Material refractario:** El material utilizado en los hornos de cubilote no es el adecuado para la operación del horno puesto que, los fundidores en el norte emplean un refractario de carácter ácido (ladrillo de construcción de sílice) que se ve atacado por el fundente de carácter básico (caliza) que utilizan durante la operación del horno de cubilote.
- **Instalación del refractario:** La distribución del refractario está relacionada con la forma del ladrillo utilizado. En el norte, se emplean retazos de ladrillos de construcción y su distribución alrededor del cubilote es ineficiente. Además, se desgastan tan rápido que deben cambiarse después de cada operación, aumentando los costos de mantenimiento del horno de cubilote.
- **Orificio de escoriado:** La ausencia de este orificio genera que una mayor cantidad de escoria salga con el caldo al momento de vaciarse en los moldes, ocasionando en las piezas defecto del tipo de inclusiones de escoria, sedimento o fundente.
- **Chimenea atrapa-gases:** Los hornos de cubilote del norte del Perú no cuentan con un sistema de reducción de emisiones al ambiente, por lo que los talleres ubicados en zonas céntricas pueden tener problemas por la contaminación que genera el funcionamiento de los hornos. Una chimenea atrapa gases cumple con la función de retener los gases contaminantes que salen a altas temperaturas y disminuir la contaminación ambiental.

Consecuencias principales

Las consecuencias principales se mencionan a continuación:

- **Deficiencia en la altura del horno de cubilote:** Los hornos no cumplen esta premisa, muchos de ellos no superan el mínimo necesario del diseño del horno de cubilote. Esta deficiencia hace disminuir la capacidad de producción, el índice de precalentamiento y el tiempo necesario para la fusión de la materia prima metálica. Una altura insuficiente no garantiza el tiempo necesario para que el material esté en contacto con el combustible ardiente y es posible que se obtenga hierro sin fundir o que el caldo de colado no tenga las propiedades necesarias para ser vertido.

- **Inadecuado sistema de alimentación de aire:**
 - a. **Anillo o caja de viento:** La mayoría de hornos de cubilote no cuentan con este sistema, lo cual genera que el aire ingresante sea insuficiente y que el caldo de colada salga con una menor temperatura a la requerida. Adicionalmente a esto, se desperdicia el combustible puesto que no se aprovecha al máximo su poder calorífico.
 - b. **Tuberías de distribución de aire:** Las dimensiones de las tuberías del sistema de distribución de aire en los hornos de cubilote son deficientes. Su mal dimensionamiento causa problemas relacionados a la entrada de aire al sistema del horno de cubilote. Si su dimensión es menor a la necesaria, el aire ingresante tendrá una mayor velocidad generando flujos turbulentos que afectan la zona de fusión de metal. Esto causa un movimiento de las zonas y que el funcionamiento del horno sea pésimo. Si su dimensión es mayor a la requerida, la cantidad de aire ingresante tendrá una menor velocidad y no favorecerá a la zona de combustión, lo cual causa que la zona de fusión se reubique y origine puntos de baja temperatura.
 - c. **Toberas:** Muchos de los hornos no cuentan con la cantidad necesaria de toberas, esto dificulta el reparto uniforme de aire soplado y perjudica la combustión, y por ende, a la fusión de la materia prima metálica. La cantidad de toberas está en función del diámetro interno del cubilote; así, a mayor diámetro es necesario una mayor cantidad de toberas. Otro problema que se presentan es la falta de inclinación de toberas, que permite la entrada de escoria y de materia fundida que al enfriar solidifica e impide el paso de aire. Se recomienda una inclinación de 8°, esto impide el ingreso de elementos contaminantes a la zona de toberas.
 - d. **Ausencia de orificio de escoriado:** La realidad de los procesos de fundición en el norte del Perú es que muchos de los hornos no cuentan con un orificio de escoriado. Cuando el caldo de colada deja el horno y los operarios remueven la escoria con varillas, se corre el riesgo de que el caldo enfríe, lo cual causa que, al momento de vaciar el caldo en los moldes, la temperatura sea insuficiente. Una temperatura por debajo de la necesaria genera defectos de solidificación en las piezas.
- **Chimenea atrapa-gases:** En los hornos de cubilote participantes, la chimenea es algo inexistente, los gases salen al medio ambiente sin control de algún tipo. Esta mala práctica genera una contaminación de mayor grado que puede llevar a una amonestación del organismo regulador correspondiente.

Capítulo 3

Incidencia del horno de cubilote y combustible en la calidad de las piezas obtenidas.

3.1. Macrodefectos de fusión.

Los defectos que se presentan en la fundición tienen su origen en diversos aspectos del procedimiento en sí mismo. Desde la selección de materias primas e insumos hasta la falta de ferroaleaciones que mejoren la calidad de las piezas obtenidas.

A continuación, se muestran los principales defectos en las fundiciones grises originados en el funcionamiento del horno, analizados macroscópicamente, teniendo como referencia técnica el análisis acerca del origen metalúrgico ofrecido por el Comité Internacional de la Asociación Norteamericana de Fundidores (American Foundry Society). Ver Anexo H.

Los defectos encontrados se dividen en cinco (05) categorías básicas: 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).

3.1.1. Cavidades

a. Sopladuras y picaduras (B 111)

Este tipo de defecto puede aparecer a lo largo de toda la sección de la fundición y se presenta como cavidades de pared suave, generalmente de forma esférica. Las cavidades de mayor tamaño, que muchas veces no están en contacto con la superficie externa de la fundición, se les conocen como sopladuras. Por otro lado, las cavidades más pequeñas, picaduras, aparecen en grupos de dimensiones variadas. Además, las paredes interiores de las cavidades suelen ser brillantes, más o menos oxidadas, y en el caso del hierro fundido, pueden estar cubiertas de una capa delgada de grafito.

Aunque su aparición se le atribuye a la humedad del molde de arena, el horno influye puesto que las características del caldo que las causan son: baja temperatura y nivel de oxidación.

La temperatura baja del caldo se debe a que la energía generada en la zona de combustión no es la suficiente o a un inadecuado precalentamiento de cargas. El precalentamiento de cargas viene determinado por el índice de precalentamiento, este último es función de la altura del horno. Una menor altura genera un menor índice de precalentamiento y, caso contrario, una altura mayor genera un mejor índice de precalentamiento. Si las cargas no están suficientemente calientes, la energía generada por el combustible se consumirá en las cargas metálicas, causando que la temperatura del caldo disminuya. Otro motivo por el cual el caldo enfría es debido a la humedad del aire ingresante al horno, al ingresar el calor generado por el combustible también se consume al calentar el aire necesario para la combustión. Esto se origina debido a la falta de anillo de viento que, como se menciona en el Capítulo 1, este ayuda al precalentamiento de aire. El motivo final que disminuye la temperatura del caldo es la humedad del refractario de la piqueta de sangrado.

Un caldo oxidado es resultado de que el aire entrante tiene alto contenido de humedad debido a que no presenta un precalentamiento previo a su ingreso y que la materia prima ingrese con un grado de oxidación alto.

En la Figura 40, se presenta un fragmento de capa de cilindro de hierro fundido en arena en verde, mostrando sopladura que aparecieron durante el mecanizado.

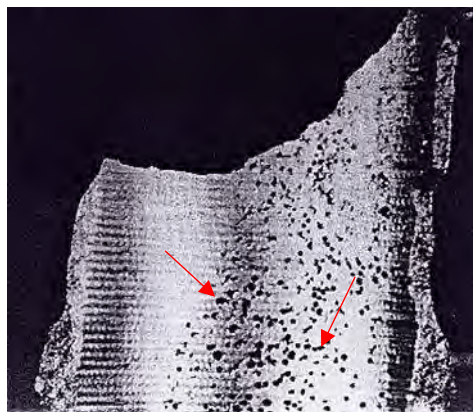


Figura 40. Fragmento de una capa de cilindro de hierro, mostrando sopladuras que aparecieron durante el mecanizado.

Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

b. Sopladuras de escorias (B 113)

Este tipo de defecto tiene la misma apariencia que el defecto identificado como sopladuras (B 111), pero acompañadas por inclusiones de escoria (G 122). Al no existir un orificio de escoriado es muy probable que durante el vertido del caldo haya presencia de escoria y este genere defectos en la pieza final. En la Figura 41, se presenta una sección de una caja de válvulas de acero fundido con

inclusiones de escoria en forma de gota. Estas sopladuras de escoria se deben a un grado de oxidación del caldo y la presencia de escoria en la salida del caldo.



Figura 41. Sección de una caja de válvulas, mostrando sopladuras de escoria.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

c. Picaduras en superficie (B 123)

Se presenta como pequeñas cavidades agrupadas en la superficie de la fundición, como se muestra en la Figura 42. Estas cavidades pueden ser: cavidades esféricas que son removidas por mecanizado de 1 a 2 mm desde la superficie, y cavidades prolongadas que son vistas en la sección transversal, cerca de la superficie de la fundición (picaduras sub-superficiales). El caldo presenta un grado de oxidación y temperatura baja.

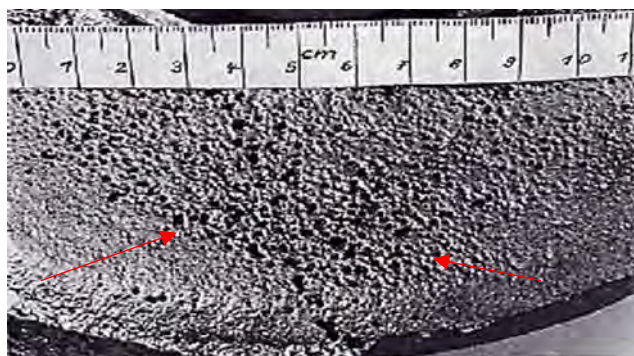


Figura 42. Picaduras superficiales sobre hierro fundido.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

3.1.2. Superficie defectuosa

a. Hendidura o cicatriz (D 113)

Se presenta como ranuras que parecen marcas de pliegues de poca profundidad sobre la superficie de la pieza. Esto se origina cuando el caldo está frío y presenta una baja fluidez al momento de ser vertido. El caldo no está lo suficientemente caliente debido a que las cargas entran frías a la zona de fusión, la altura del horno no garantiza un tiempo de permanencia suficiente para un precalentamiento, la energía generada en la zona de combustión no es la suficiente.

En la Figura 43, se muestra una cubierta de hierro fundido de 250 mm de longitud, donde se observan rebabas.



Figura 43. Hierro fundido mostrando rebabas.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

b. Darta, expansión de darta (D 231)

Es una proyección metálica irregular de superficie áspera, con varios milímetros de espesor, como se observa en la Figura 44. Aparece generalmente, en bordes agudos y paralela a la superficie de la fundición. Este defecto está pegada a la pieza en pocos puntos. Además, la superficie debajo de este defecto muestra una depresión. El origen de este defecto es causado por el grado de oxidación del caldo y la fluidez de la escoria.

Como se ha explicado previamente el grado de oxidación del caldo se debe a la limpieza de la materia prima metálica y a la humedad del aire ingresante. La fluidez de la escoria se debe al material utilizado en el refractario. Si el refractario utilizado es de carácter ácido, esto favorece a que la escoria sea de muy alta viscosidad y por ende, espesa.

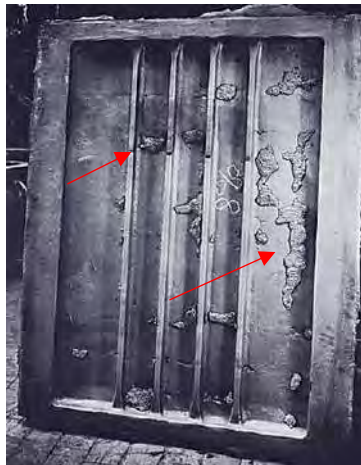


Figura 44. Base de máquina de hierro fundido mostrando darta.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

3.1.3. Fundición incompleta

a. Fundición rota (E 221)

La fundición rota se refiere a piezas fundidas, que se han roto o agrietado por acción mecánica, manejo brusco o choque térmico. En la Figura 45, se observa la discontinuidad de la fundición. Cuando el caldo presenta un altísimo

grado de oxidación o un caldo con presencia de gases. Debido a que estos generan porosidades, al tener una alta concentración generan una concentración de defectos a mayor escala, llegando a la separación de la pieza.

El motivo de oxidación del caldo es debido a que el aire ingresante al sistema del cubilote está demasiado húmedo al no existir un anillo de viento. Puesto que el oxígeno del aire reacciona con el combustible, el oxígeno del agua contenida en el aire evapora y reacciona con la materia prima y debido a la atmósfera de alta temperatura, se favorece la oxidación de la carga. Al existir agua, el hidrogeno que la conforma se gasifica y crea un ambiente gaseoso que afecta al caldo.

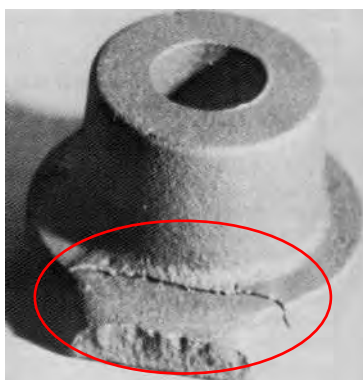


Figura 45. Pieza de fundición gris con defecto de rotura.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

3.1.4. Inclusiones

a. Exudación interna, exudación fosforosa (G 113)

Son inclusiones metálicas, generalmente esféricas y superficie suave y brillante. Se encuentran en el interior de sopladuras o cavidades internas. Estas inclusiones tienen una composición química diferente del metal base, muy cercana a la eutéctica. Este defecto es causado en su mayoría por la composición química pero la razón de que se encuentre dentro de una sopladura o cavidad es debido a la oxidación del caldo.

En la Figura 46, se muestra una sopladura con inclusiones metálicas esféricas en el cierre de una válvula de hierro fundido de alto contenido de fósforo.

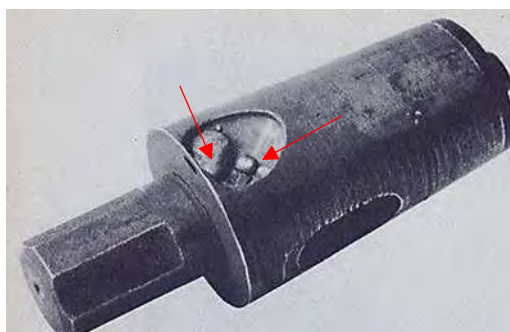


Figura 46. Cierre de válvula mostrando inclusiones metálicas dentro de una sopladura.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

b. Inclusiones de escoria, sedimento o fundente (G 121)

Son inclusiones de forma irregular, no metálicas parecen escoria o sedimento formado en el horno de fundición o en las cucharas. Las inclusiones se pueden dar en la superficie de la fundición o dentro de las paredes de la fundición. Las fuentes de inclusiones, pueden ser escorias finales o material fundente. El exceso de uso de material fundente, el estado del refractario y la ausencia de un orificio de escoriado son el causal de este tipo de defectos en las piezas finales. Los tres mencionados anteriormente son fácilmente retirables por diferencia de densidades.

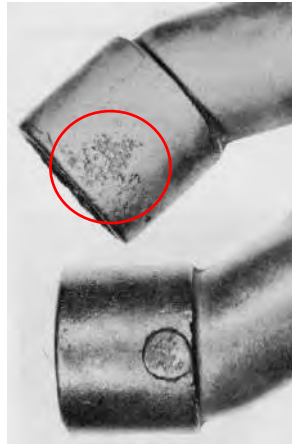


Figura 47. Hierro fundido mostrando inclusiones.
Fuente: Atlas Internacional de Defectos de Fundición.

Luego de haber identificado los macrodefectos más comunes generados por el horno de cubilote y el combustible durante el proceso de fundición, se identifican las piezas entregadas por cada taller. Las piezas del Taller 2 no son consideradas dentro de este estudio debido a que fueron obtenidas por fusión en crisol.

3.2. Impacto de las características de los hornos en la generación de defectos.

3.2.1. Taller 1

La pieza entregada por el Taller 1 ha sido denominada M1. A continuación, se presentan los datos obtenidos luego de una caracterización a los defectos que presenta esta pieza. Las dimensiones de la pieza entregada se muestran en la Tabla 42:

Tabla 42. Muestra entregada por Taller 1.

Entrega	Muestra	Descripción
Única	M1	Barra maciza de Ø32 mm x 300 mm de largo.

Fuente: Elaboración propia.

- **G 121:** En la Figura 48, se presenta cavidades irregulares en la sección transversal de la pieza conectadas a la superficie de la barra 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.

El horno del Taller 1 no presenta orificio de escoriado, lo cual origina la aparición de este tipo de defectos sobre las piezas, puesto que la escoria sale con el caldo.



Figura 48. Sección transversal, se muestra cavidades de forma irregular.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Taller 3

Las piezas entregadas por el Taller 3 han sido denominadas M2, M3, M4 y M5. Las medidas de las piezas entregadas son mostradas en la Tabla 43 :

Tabla 43. Muestras entregadas por Taller 3.

Entrega	Muestra	Descripción
Primera	M2	Barra maciza a partir de modelo de $\varnothing 23$ cm x 55 mm de largo.
Segunda	M3	Barra maciza a partir de modelo de $\varnothing 23$ cm x 55 mm de largo.
Tercera	M4	Barra maciza a partir de modelo de $\varnothing 23$ cm x 55 mm de largo.
	M5	

Fuente: Elaboración propia.

- M2

- a. **B 111:** Las pequeñas cavidades (picaduras), que se muestran en la Figura 49, 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. Se originan debido a la presencia de gases en el caldo y al grado de oxidación.



Figura 49. Cavidades esféricas cercanas a las superficies.
Fuente: Elaboración propia.

- **M3**

- a. **G 121:** En la Figura 50, se muestran cavidades rellenas sobre la superficie externa de la barra fabricada por el Taller 3. Estas cavidades de deben a la falta de un orificio de escoriado y presencia de sedimentos que no son removidos del caldo.



Figura 50. Cavidades irregulares y rellenas sobre la superficie de la barra.

Fuente: Elaboración propia.

- **M4**

La probeta M4 no presenta defectos relacionados al diseño y funcionamiento del horno de cubilote.

- **M5**

- a. **G 121:** En la Figura 51, se muestran cavidades rellenas en la superficie de la barra proporcionada por el taller 3. Se originan debido a que la escoria, sedimentos o fundentes corren con el caldo, puesto que no existe un orificio de salida; y enfrían junto con el caldo.



Figura 51. Cavidades sobre la superficie que han sido rellenas.

Fuente: Elaboración propia.

- b. **B 123:** En la Figura 52, se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por maquinado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición. Se obtienen debido a la alta humedad del refractario y del aire ingresante que no está precalentado, debido a que no existe un anillo de viento.



Figura 52. Cavidades huecas sobre uno de los extremos de la barra.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Taller 4

Las dimensiones de las piezas entregadas por el Taller 4 han sido denominadas M6 y M7, y se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44. Muestras entregadas por el Taller 4.

Entrega	Muestra	Descripción
Primera	M6	Barra maciza a partir de modelo de Ø55 cm x 230 mm de largo.
Segunda	M7	Barra maciza a partir de modelo de Ø55 cm x 300 mm de largo.

Fuente: Elaboración propia.

Los defectos que presentan estas piezas son los siguientes:

- **M6**

- a. **B 111:** En la Figura 53, se observan pequeñas cavidades generadas en el borde y superficie de la pieza. Puesto que los hornos del Taller 4 no presentan una altura efectiva adecuada, genera que el caldo no tenga la temperatura adecuada.



Figura 53. Cavidades en el borde de la pieza.

Fuente: Elaboración propia.

- **M7**

- a. **B 123:** En la Figura 54, se presenta pequeñas cavidades. La formación de estas picaduras se da por las 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, que se obtiene debido a la alta humedad del refractario y del aire ingresante; debido a que no existe un precalentamiento del aire, este ingresa con un contenido alto de humedad.

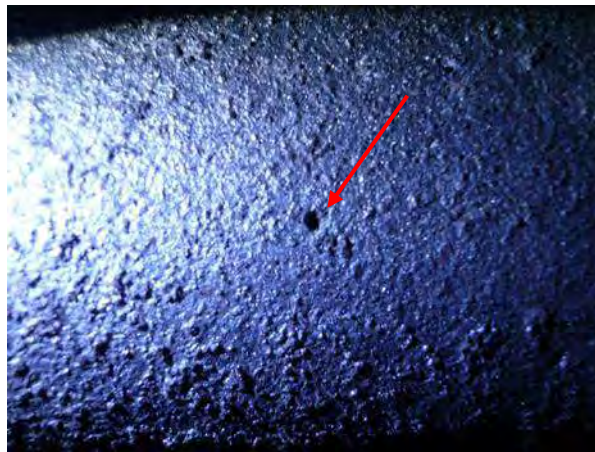


Figura 54. Cavidades esféricas en la superficie de la barra.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Taller 5

Las piezas entregadas por el Taller 5 han sido denominadas M8, M9 y M10. La pieza M9 no se analizó debido a que el tamaño de la muestra fue un trozo pequeño de hierro gris. La Tabla 45 muestra las dimensiones de las piezas entregadas por el taller.

Tabla 45. Muestras entregadas por Taller 5.

Entrega	Muestra	Descripción
Primera	M8	Trozo de cocina mejorada
	M9	Trozo de aro base
Segunda	M10	Barra maciza a partir de modelo de Ø55 cm x 300 mm de largo.

Fuente: Elaboración propia.

Los defectos que presentan las piezas entregadas, se discuten a continuación:

- **M8**

- a. **D 113:** En la Figura 55, 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. Debido a que la

temperatura alcanzada no es la correcta, la colabilidad del caldo no es buena y se forman estos pliegues. Esto se debe al mal dimensionamiento de la altura efectiva del horno.



Figura 55. Irregularidad en la superficie.

Fuente: Elaboración propia.

- b. B 111:** En la Figura 56, se muestran agrupamientos de cavidades (picaduras) en dimensiones variadas. La formación de estas picaduras se da por las 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.



Figura 56. Cavidades esféricas en la superficie.

Fuente: Elaboración propia.

- **M10**

- a. B 111:** En la Figura 57, se muestran agrupamientos de cavidades (picaduras) en dimensiones variadas. La formación de estas picaduras se da por las 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. que se

obtiene debido a la alta humedad del refractario y del aire ingresante que no está precalentado.



Figura 57. Cavidades en la superficie de la pieza entregada.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Taller 6

Las piezas entregadas por el Taller 6 han sido denominadas M11. En la Tabla 46 se presentan las dimensiones de la pieza M11.

Tabla 46. Muestras entregadas por el Taller 6.

Entrega	Muestra	Descripción
Única	M11	Barra maciza sin dimensiones regulares.

Fuente: Elaboración propia.

Los defectos que presenta esta pieza son los siguientes:

- M11

- a. **D 231:** La Figura 58 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.

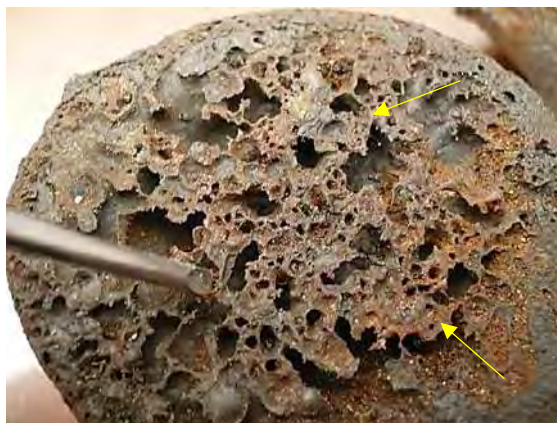


Figura 58. Darts presentes en la superficie de la pieza entregada.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.6. Taller 7

Las piezas entregadas por el Taller 7 han sido denominadas M12, M13 y M14, sus dimensiones se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Muestras entregadas por Taller 7.

Entrega	Muestra	Descripción
Primera	M12	Barra maciza de $\text{Ø}66$ mm x 400 mm de largo.
	M13	Barra maciza pero de 150 mm de longitud.
Segunda	M14	Barra maciza a partir de modelo de $\text{Ø}55$ cm x 300 mm de largo.

Fuente: Elaboración propia.

Los defectos que presentan estas piezas son los siguientes:

- **M12**

- a. **E 221:** La Figura 59, muestra el extremo opuesto de la barra, donde se puede apreciar la apariencia de una fractura con un alto grado de oxidación. Esto se debe a que el caldo presenta un muy alto grado de oxidación y facilita la aparición de sopladuras que conllevan a una separación de la pieza.



Figura 59. Fractura en uno de los extremos de la pieza entregada.

Fuente: Elaboración propia.

- b. **B 123:** En la Figura 60, se presenta pequeñas cavidades esféricas. La formación de estas picaduras se da por las 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, que se obtiene debido a la alta humedad del refractario y del aire ingresante que no está precalentado.



Figura 60. Picaduras en la superficie lateral de la barra.
Fuente: Elaboración propia.

- **M13**

- a. **G 121:** En la Figura 61, se presenta cavidades irregulares en la superficie de la barra 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. Debido a la falta de orificio es escoriado, la escoria corre con el caldo y al enfriar forma parte de la pieza.



Figura 61. Cavidades en forma irregular sobre la superficie de la pieza.
Fuente: Elaboración propia.

- **M14**

- a. **B 123:** En la Figura 62, se presenta pequeñas cavidades esféricas que pueden ser removidas por maquinado de 1 a 2 mm desde la superficie de la fundición. Este defecto es originado debido a que el caldo no tiene la suficiente temperatura para poder colar, además de la presencia de gases que originan pequeños orificios. Esto es debido a que la altura efectiva del horno no es la suficiente y la temperatura del caldo no alcanza a ser la necesaria.



Figura 62. Cavity esférica conectada a la superficie.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 48 se muestra un resumen de los principales defectos originados por el mal dimensionamiento o diseño de los hornos de cubilote utilizado durante la producción de piezas en el norte peruano.

Tabla 48. Resumen de defectos macrográficos en muestras del norte peruano.

DEFECTO	CAUSA	MUESTRA	TALLER
B111: Sopladuras y picaduras	Altura efectiva del horno Anillo o caja de viento Número de toberas Refractario húmedo	M2	Taller 3
		M6	Taller 4
		M8	Taller 5
B123: Picaduras en superficie	Altura efectiva del horno Anillo o caja de viento Número de toberas Refractario húmedo	M5	Taller 3
		M7	Taller 4
		M12	Taller 7
D113: Hendidura o cicatriz	Altura efectiva del horno Anillo o caja de viento Número de toberas	M8	Taller 5
D231: Darta o expansión de darta	Altura efectiva del horno Anillo o caja de viento Material de refractario	M11	Taller 6
E221: Fundición rota	Altura efectiva del horno Anillo o caja de viento	M12	Taller 7
G121: Inclusiones de escoria, sedimento o fundente	Orificio de escoriado Material refractario	M1	Taller 1
		M3, M5	Taller 3
		M13	Taller 7

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha discutido anteriormente, estos defectos que presentan las piezas están relacionados con la temperatura del caldo, grado de oxidación y a la presencia de contaminantes en el caldo. Los principales defectos presentes son aquellos que están relacionados con la ausencia de elementos o al mal dimensionamiento del horno de cubilote.

Se observa que las razones en común de los defectos en las piezas son la altura efectiva del horno y al anillo o caja de viento.

La falta de altura efectiva en el horno, la ausencia del anillo o caja de viento y el refractario húmedo tienen efecto sobre la temperatura de caldo y la oxidación del caldo.

Los defectos de inclusiones son causadas por la ausencia del orificio de escoriado o el estado del refractario. La ausencia del orificio escoriado hace que la escoria salga con el caldo y ambos enfríen juntos obteniéndose defectos como incrustaciones. El estado del refractario influye sobre la aparición de sedimentos en la escoria, al desmoronarse por no presentar una buena compactación.

A excepción del defecto de fundición rota (E221), estos defectos están presentes en la superficie de la pieza. Este tipo de defectos son fáciles de retirar con mecanizado pero supone un gasto mayor para los talleres puesto que la pieza final debe estar proyectada a un mayor volumen que garantice la remoción de estos defectos, y esto significa desperdicio de material.

3.3. Influencia del combustible utilizado en la calidad de las piezas.

Como se muestra en el Capítulo 1, las características del combustible afectan las propiedades de las piezas de fundición gris sobre todo en cuanto al contenido de azufre. En cuanto al contenido de cenizas, humedad y materias volátiles en el combustible, estas tienen efectos perjudiciales pero a menor escala.

Las cenizas pasarán a formar parte de la escoria, las materias volátiles consumirán parte de la energía necesaria para la fusión de los materiales, oxidarán el caldo a menor escala e incluso formarán una atmósfera dañina para el horno. La humedad contenida en el combustible deberá tratarse con suma delicadeza puesto que al contener agua, uno de los elementos más dañinos es el hidrógeno. Este último puede generar defectos e incluso incrementar la zona de reducción durante el funcionamiento del horno de cubilote.

En el norte peruano, la adquisición de combustibles se realiza sin una previa selección de la calidad y evaluación de características. Se adquiere el combustible disponible en el mercado, que suele ser antracita de baja calidad. Sin embargo, como se menciona en el capítulo 1, el combustible ideal para trabajar en el horno de cubilote es el coque.

Para evaluar las características del combustible usado se analizaron dos muestras, cuya composición química se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49. Análisis de composición química de combustibles entregados por talleres.

Características		Muestra 1	Muestra 2
Humedad total %		6.91	7.74
Humedad gruesa %		4.32	5.00
Humedad fina %		2.59	2.74
Volátiles %	tal como recibido	5.97	6.75
	base seca	6.12	6.95
Cenizas %	tal como recibido	3.21	11.00
	base seca	3.29	11.31
Carbón fijo %	tal como recibido	88.17	79.43
	base seca	90.52	81.67
Azufre %	tal como recibido	1.70	1.86
	base seca	1.74	1.91
Poder calorífico*	tal como recibido	7622	6928
	base seca	7825	7123
Cloro %		0.019	0.282

*tcr: tal como recibido, bs: base seca.

Fuente: “Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú”. Guerrero. (2018)

En base a los resultados mostrados en la Tabla 49, la muestra 1 de combustible cumple las características de una antracita, específicamente una semi-antracita. La muestra 2 es un bituminoso bajo volátil o, conocido comúnmente como hulla.

Los valores de humedad de ambas muestras están por encima de los parámetros necesarios para un combustible óptimo para fundición. Al haber una cantidad alta de humedad, existe un mayor consumo de energía durante la operación del cubilote. Esto se traduce a una menor temperatura del caldo y posibles consecuencias de enfriamiento rápido.

Los valores de materias volátiles sobrepasan los límites permitidos. Aunque el encendido será más rápido, existe el problema de auto ignición y de materias explosivas que disminuyan la calidad del combustible, puesto que al auto encender se pueden originar fisuras dentro del combustible.

El porcentaje de cenizas entre ambas muestras difiere de manera exagerada. Mientras que la muestra 1 está por debajo, la muestra 2 está cercano al rango permitido. Si bien ambas muestras cumplen con este parámetro, la muestra 2 presenta una mayor cantidad de impurezas como contenido de cenizas, disminuyendo la calidad de este combustible ya que generará mayor cantidad de componentes para la escoria durante el funcionamiento del cubilote.

El porcentaje de carbón fijo representa la porción del combustible que libera calor durante la combustión. Entonces a mayor cantidad de carbón fijo, mayor será el calor liberado y que podrá ser utilizado. La muestra 1 es de mejor calidad bajo la evaluación de este parámetro.

En cuanto al azufre, los valores de ambas muestras exceden los límites permitidos. Este parámetro es un índice de calidad del combustible ya que del azufre absorbido por el hierro dependerán las propiedades de las piezas. A mayor cantidad de azufre se originarán defectos que disminuirán las propiedades mecánicas de las piezas de fundición gris. Las muestras analizadas presentan valores de poder calorífico aceptables y mayores al rango permitido, por lo cual su performance durante la combustión entregará mayor energía en forma de calor y permitirá la fusión de la materia prima.

Como se menciona en el capítulo 1, el porcentaje de cloro tiene efecto sobre la característica de desulfuración del calcio. La muestra 1 con 0.019% de Cl no presenta mayor problema durante la fusión puesto que no genera problema en la desulfuración usando al calcio, mientras que la muestra 2 con 0.282% de Cl presentará un problema durante la desulfuración en el horno, puesto que por cada 0.25% de Cl, el rango de desulfuración disminuirá en un 12%.

Tabla 50. Composición química de las muestras entregadas por los talleres participantes.

Taller	Muestra	%C	%Si	%Mn	%S	%P
Taller 1	M1	3.270	1.54	0.26	0.162	0.452
Taller 3	M2	3.573	1.94	0.40	0.126	0.072
	M3	3.700	1.81	0.56	0.100	0.034
	M4	3.630	1.95	0.56	0.090	0.055
	M5	3.630	1.95	0.56	0.090	0.055
	M6	3.323	1.77	0.46	0.152	0.117
Taller 4	M7	3.750	1.74	0.38	0.150	0.117

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de: "Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú". Guerrero, 2018)

Tabla 50. Composición química de las muestras entregadas por los talleres participantes.
(Continuación)

Taller	Muestra	%C	%Si	%Mn	%S	%P
Taller 5	M8	3.452	1.49	0.33	0.269	0.222
	M9	3.336	1.60	0.35	0.217	0.333
	M10	3.490	1.85	0.43	0.100	0.199
Taller 6	M11	3.415	1.87	0.40	0.171	0.107
Taller 7	M12	3.382	1.81	0.50	0.168	0.081
	M13	3.391	1.77	0.50	0.167	0.076
	M14	3.050	1.89	0.53	0.083	0.095

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de: “Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú”. Guerrero, 2018)

En la Tabla 50 se presenta la composición química de las muestras entregadas por los talleres. Tomando como base la Tabla 3 del Capítulo 1, el contenido de C no debe sobrepasar el 3.4%. Las muestras M2, M3, M4, M5, M7, M8, M10 exceden este valor máximo necesario para la obtención de piezas de calidad estándar de fundición gris. En cuanto al contenido de silicio, la mayoría de talleres cumple con el rango permitido exceptuando a M1, M6, M7, M8, M9 y M13. Sin embargo, las muestras que están dentro de límite, tienen valores que se encuentran muy cercanos al límite inferior, lo cual facilita la solidificación metaestable (aparición de fundición blanca) en piezas delgadas o de sección pequeña.

A pesar que el contenido de manganeso se encuentra dentro de los límites permitidos, excepto en aquellas que están por debajo del límite, como las muestras M1, M2, M6, M7, M8, M9, M10 y M11; el contenido de este elemento queda supeditado por la cantidad de azufre en las piezas. Se observa que la mayoría de piezas exceden el límite permitido 0.05-0.12 %S, esto genera problemas en la pieza final, debido a los defectos causado por el azufre. En el caso del fósforo, este elemento no excede su límite permitido.

En la Tabla 51, se evalúa las muestras que cumplen o no con el rango permitido para que la fundición gris mantenga sus propiedades y no se vea afectada por los efectos del azufre.

Tabla 51. Relación entre azufre y manganeso de las muestras entregadas por los Talleres.

Muestra	%S	Límite	%Mn	%Mn _{requerido}	Neutraliza
M1	0.162	No cumple	0.26	0.5754	No cumple
M2	0.126	No cumple	0.40	0.5142	No cumple
M3	0.100	Cumple	0.56	0.47	Cumple
M4	0.090	Cumple	0.56	0.453	Cumple
M5	0.090	Cumple	0.56	0.453	Cumple
M6	0.152	No cumple	0.46	0.5584	No cumple
M7	0.150	No cumple	0.38	0.555	No cumple
M8	0.269	No cumple	0.33	0.7573	No cumple
M9	0.217	No cumple	0.35	0.6689	No cumple
M10	0.100	Cumple	0.43	0.47	No cumple
M11	0.171	No cumple	0.40	0.5907	No cumple
M12	0.168	No cumple	0.50	0.5856	No cumple
M13	0.167	No cumple	0.50	0.5839	No cumple
M14	0.083	Cumple	0.53	0.4411	Cumple

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de “Influencia de la materia prima en las características de las fundiciones grises del norte del Perú”, Erick Vargas, 2017).

De la Tabla 51, se puede observar que de las 14 muestras entregadas por los siete talleres participantes, solo 5 cumplen con el rango permitido en contenido de azufre y las 9 restantes están por encima de rango. Según esta tabla, de la muestras obtenidas por fusión en horno de cubilote, se puede afirmar que el 35.71% de las piezas obtenidas en los talleres del norte del Perú cumplen con el contenido de azufre, mientras que el 64.29% excede el contenido de este elemento. Otro dato importante a deducir de la Tabla 51, es la gran variedad de contenido en azufre que existe en las muestras, ya que va desde 0.083%S hasta 0.269%S.

Puesto que el manganeso tiene la función de neutralizar los efectos del azufre a través de la formación de sulfuros de manganeso, es necesario analizar la cantidad de este en las piezas. De la Tabla 51, se observa que de las 14 muestras entregadas, solo 4 presentan el contenido de manganeso necesario para neutralizar el contenido de azufre, mientras que las 10 restantes apenas cubren lo necesario para neutralizarlo. Se puede afirmar que el 28.57% de las piezas producidas por el norte del Perú logra neutralizar el azufre por contenido de manganeso mientras que el 71.43% de las piezas producidas no logra este objetivo. Este dato es vital, puesto que en aquellos que el manganeso no sea suficiente, se espera que aparezcan sulfuros de hierro. Estos últimos, como se ha mencionado anteriormente, causan que las propiedades mecánicas disminuyan y generan un aumento en la dureza y en la fragilidad. Además de esto, el azufre favorece a la aparición de cementita debido a que limita el crecimiento del grafito y favorece el fenómeno del blanqueo. Se debe tener en cuenta que no es suficiente con neutralizar el azufre, el contenido de estos elementos debe mantener cierta relación como se muestra en la Figura 7 del Capítulo 1, y así evitar la aparición de microporos y microrechupes, debido a que el azufre disminuye la fluidez del caldo. Este último problema se comprueba con la muestra M8, esta tiene el mayor contenido de azufre y como se observa en el análisis de macrográfico, la muestra presenta el defecto de hendidura o cicatriz (D 113).

Como se menciona en el Capítulo 1, la composición química de las piezas de fundición gris está influenciada y depende del combustible y del material metálico de partida, la chatarra. Se ha realizado un análisis de composición química las chatarras utilizadas como materia prima metálica por los talleres participantes, como se muestra en la Tabla 52.

Tabla 52. Composición química de las chatarras entregadas por los talleres.

Chatarra	%C	%Si	%Mn	%S	%P
C1	3.571	2.28	0.48	0.145	0.249
C2	3.281	2.13	0.65	0.189	0.02
C3	3.314	2.22	0.92	0.045	0.009
C4	3.251	1.77	0.71	0.106	0.01
C5	3.276	1.46	0.54	0.235	0.113
C6	3.34	1.37	0.77	0.0914	0.074
C7	3.16	1.65	0.75	0.04	0.03
C8	3.28	2.16	0.6	0.08	0.028
C9	3.45	2.27	0.55	0.08	0.015
C10	3.42	2.4	0.24	0.04	0.017
C11	3.4	2.17	0.61	0.06	0.017

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de: “Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú”. Guerrero, 2018)

Puesto que la pieza final se verá influenciada por el material usado para su obtención, es necesario analizar la composición química de la materia prima metálica o chatarra.

En la Tabla 52 se muestra que el contenido de azufre de las chatarras es menor en comparación al contenido de azufre en las piezas entregadas. En el caso de C1, C2 y C5 existe azufre sobre el rango permitido pero en la mayoría de casos las chatarras presentan azufre dentro del rango permitido de 0.05 a 0.12%. Tomando esto en cuenta, se deduce que el origen del azufre en las piezas resultantes no es proveniente de la materia prima metálica sino del combustible.

3.3.1. Comportamiento del azufre en el horno de cubilote

La dinámica de fusión en el horno de cubilote, mostrada en el Capítulo 1, consiste en colocar capas alternantes de combustible, fundente y metal; mientras el combustible quema, el metal ingresante por la parte superior va derritiendo. El metal derretido baja entrando en contacto con el combustible y recibe directamente la influencia este último. Existe una explicación físico – química que fundamenta que, a mayor cantidad de azufre en el combustible mayor contenido en el caldo de la pieza a obtener.

El comportamiento del azufre empieza en la zona de combustión. El azufre contenido en el combustible empieza a reaccionar según la Ecuación 47, debido al aumento de temperatura generado por la ignición del combustible. Este azufre formado, deja el combustible y lo rodea. Se observa que a mayor contenido de azufre en el combustible, mayor será la cantidad de azufre generado en la zona de combustión.



El azufre empieza a salir del combustible y reacciona con el oxígeno presente en el aire utilizado para la combustión, formando un gas de anhídrido sulfuroso según la Ecuación 48.



Posterior a esto, el anhídrido sulfuroso generado sube a través del horno hasta llegar a la zona de precalentamiento y se encuentra con las cargas metálicas. Estando aquí, parte del anhídrido sulfuroso logra reaccionar con la superficie de las cargas según la Ecuación 49. Bajo esta reacción se forman dos compuestos: sulfuro de hierro (FeS) y óxido de hierro (FeO). La materia prima al encontrarse en estado sólido es menos propensa a absorber el azufre pero si a oxidarse debido a la temperatura del metal sólido.



Cuando el metal ha empezado a fundir en la zona de fusión, este entra en contacto directo con el combustible y por ende con el azufre que lo rodea, generado por la Ecuación 47. Aquí se presenta un fenómeno conocido como sulfuración del caldo. El hierro y el manganeso del material fundido, reaccionan con el azufre según las Ecuaciones 50 y 51.



Como se logra observar, con esto se comprueba que a mayor contenido de azufre en el combustible, el caldo presentará mayor tendencia a absorber azufre.

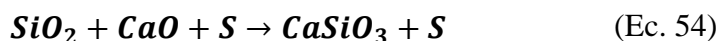
Durante el funcionamiento del cubilote, hay ciertas consideraciones que tienen efecto sobre el comportamiento del azufre. Si durante la etapa de fusión en el cubilote se ha utilizado caliza como fundente, por descomposición debido a la temperatura se ha obtenido óxido de calcio (CaO). Este compuesto tiene un comportamiento desulfurante, teniendo como resultado sulfuros de calcio que suben como escoria, y se desarrollan según las Ecuaciones 52 y 53:



El éxito de las reacciones anteriores dependerá del material utilizado en el refractario. El óxido de calcio es de carácter básico, si se encuentra con un refractario básico no habrá mayor problema y el índice de desulfuración será mayor; si el refractario usado es de carácter ácido, estos reaccionarán causando que el índice de desulfuración de las ecuaciones 52 y 53 sea casi nulo.

En caso el refractario utilizado sea básico, el éxito de la reacción definida por la ecuación 52 dependerá de la temperatura del caldo, si esta es mayor a la de fusión del MnS, la reacción será exitosa.

Cuando el combustible o las cargas han sido mal colocados en el horno y chocan con el refractario, esto puede causar un problema de erosión del refractario. Se origina un polvo de refractario, si el refractario es de carácter ácido, será del tipo SiO₂, este polvo cae y al encontrarse con el caldo provoca una reacción que perjudica el carácter desulfurante del óxido de calcio. La formación de silicatos origina que el azufre pueda reaccionar según las ecuaciones 52 y 53. La ecuación 54 muestra la reacción de formación de silicatos.



Los silicatos dejan el caldo al subir y forman parte de la escoria, conocido como sedimento. El azufre de los productos de la ecuación 54, pasa a ser parte del caldo y vuelve a reaccionar según las ecuaciones 50 y 51.

Luego de que el caldo ha fundido y ha ganado azufre por el íntimo contacto con el combustible, pasa a la zona de crisol. Aquí está listo para dejar el horno y ser recibido en una cuchara para luego ser vertido en un molde.

Si antes de ser vertido, el caldo es tratado con algún desulfurante, dependiendo del desulfurante, su comportamiento vendrá dado por el tipo de refractario usado en la cuchara.

Queda en evidencia que existe un exceso de azufre en las piezas, los datos teóricos – experimentales corroboran este hecho, la chatarra nos muestra que debido a su contenido en azufre no influye en su mayoría, pero el combustible alto en azufre, sí.

Además, la teoría demuestra que un combustible con alto contenido de azufre resulta en un caldo con alto contenido de azufre; esto será motivo para obtener piezas con defectos como baja fluidez, tendencia al blanqueo, microporos y microrechupes; y presencia de sulfuros de manganeso y hierro.

Debido a que el combustible genera un alto contenido de azufre en el caldo, es necesario contrarrestar los efectos generados por este elemento. El alto contenido de azufre debe ser controlado por el contenido de manganeso de acuerdo a la relación de $Mn = 1.7\%S + 0.3$, pero como se observan, las muestras apenas logran alcanzar un mínimo necesario y otros no logran contrarrestar su efecto. Otra forma de contrarrestar al azufre es a través de métodos desulfurantes, pero lamentablemente en el norte no se realizan debido a la falta de conocimiento en el área.

Esto explica la presencia de inclusiones de sulfuros, pero el azufre al estar en cantidades que sobrepasan los límites, parte de este no llega a ser neutralizado por completo y es probable que existan otros compuestos como los sulfuros de hierro presentes en el material. Queda en claro que, debido a la cantidad existente de azufre, existe una alta cantidad de sulfuros. La identificación de sulfuros se hace a través de la técnica de metalografía. Cuando la probeta se encuentra en estado de pulido sin ataque, se pueden apreciar los sulfuros de manganeso en forma de inclusiones.

Se han analizado las muestras que presentan un contenido alto, medio y bajo de azufre como se observa en la Tabla 53 para poder diferenciar el contenido de sulfuros en base al porcentaje de azufre.

Tabla 53. Muestras analizadas para detección de sulfuros.

Muestra	%S
M8	0.269
M10	0.1
M14	0.083

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras se prepararon según el procedimiento habitual mediante el desbaste en lijas de 80 hasta 800 y pulido con pasta de diamante de 3 μ m y 1 μ m.

Posterior a esto se realizó la toma de micrografías de las probetas en estado de pulido sin ataque, luego se procedió a realizar los ataques con los distintos reactivos y tomar las micrografías de la muestra sin ataque y con ataque.

Los reactivos usados durante las pruebas son mostrados en la Tabla 54. Luego de haber experimentado con los diferentes reactivos, los mejores resultados se obtuvieron con el reactivo de Kunkele. Un problema que se presenta con el uso del reactivo, es que durante mucha exposición a este reactivo, este quema la pieza haciendo casi imposible retirar el ataque con pulido y se debe recurrir al lijado de 600 y 800 para luego proceder al pulido.

Este reactivo oscurece a los sulfuros y a su alrededor aparece un aro de color blanco que facilita su identificación. Los resultados obtenidos se muestran en las micrografías de las Figuras 63, 64, 65, 66, 67 y 68. Como se puede ver, la muestra M8 que es la que mayor cantidad de azufre tiene, presenta una mayor cantidad de sulfuros, mientras que la muestra M14 al ser que la menor cantidad de azufre tiene, presenta

menor cantidad de sulfuros. La muestra M10 presenta una cantidad intermedia de sulfuros. Este reactivo ataca los sulfuros sin distinción alguna, por tanto para poder tener una idea de que sulfuros son de manganeso y cuáles de hierro, es necesario realizar un examen SEM-EDAX.

Tabla 54. Reactivos usados para ataque de muestras.

Ataque químico		
Reactivo	Composición	Efecto
Ácido oxálico al 0.2%	- 100mL de agua desionizada - 0.2 g de ácido oxálico	Ataca sulfuros. Sumergir la muestra durante 20 a 30 segundos.
Nitrato de plata	- 100mL de agua desionizada - 5 g de nitrato de plata	Método de Whiteley's para colorear sulfuros. Sumergir el paño Selvyt durante varios minutos en la solución acuosa de nitrato de plata. Luego de esto, lavar el paño bajo chorro de agua. Luego se coloca el paño en una luna de reloj, se frota suavemente la muestra con el paño por 15 segundos. Los sulfuros se pintan de blanco.
Kunkele	- 5g de gelatina - 20 mL de agua desionizada - 2 mL ácido sulfúrico - 0.8 g nitrato de plata - 20 mL de glicerol	Ataque a sulfuros. Oscurece los sulfuros y produce aros de color blanco alrededor de estos. Durante cierta exposición revela la microestructura de las piezas.

Fuente: Metallography and Microstructures ASM Handbook 9th Edition (1988).

a. M8

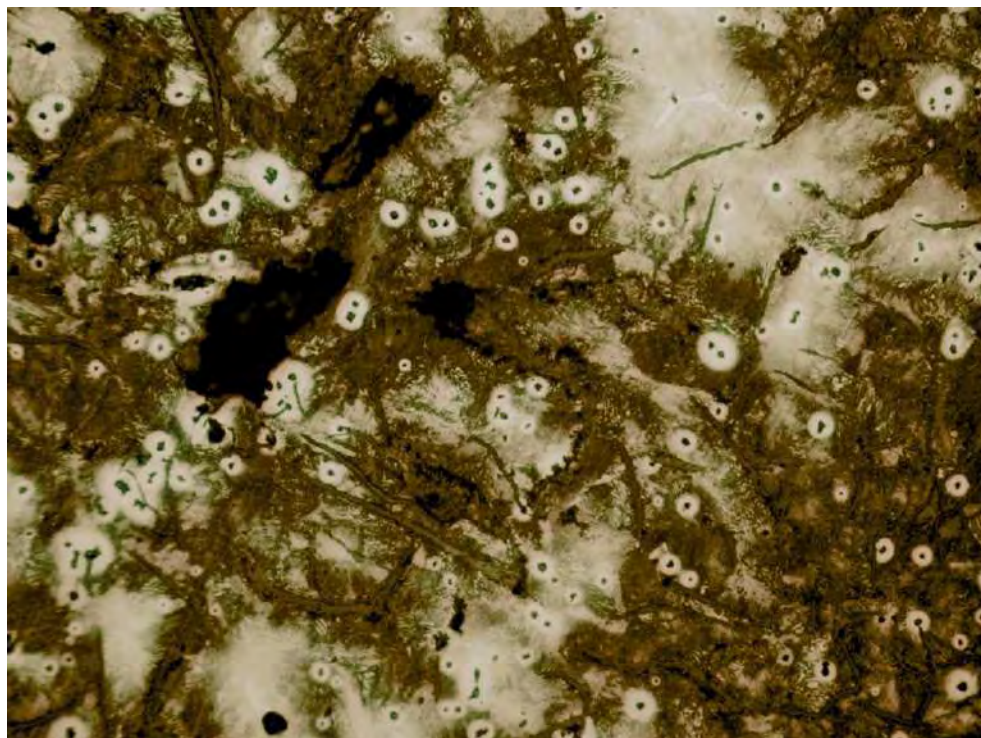


Figura 63. M8 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x

Fuente: Elaboración propia.

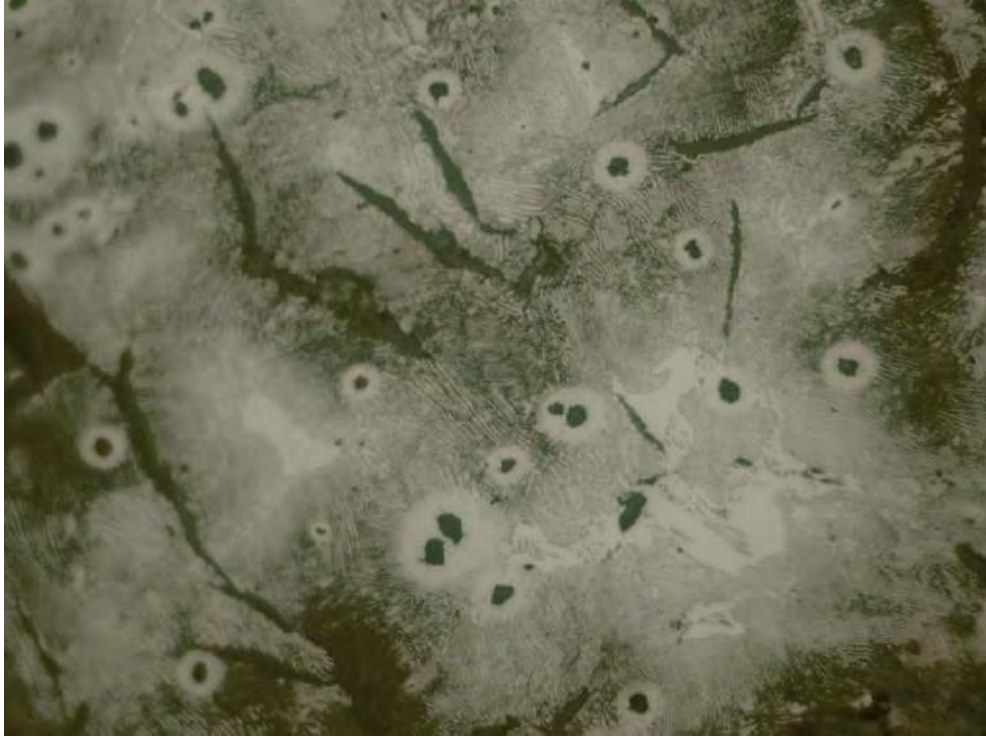


Figura 64. M8 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x
Fuente: Elaboración propia.

b. M10

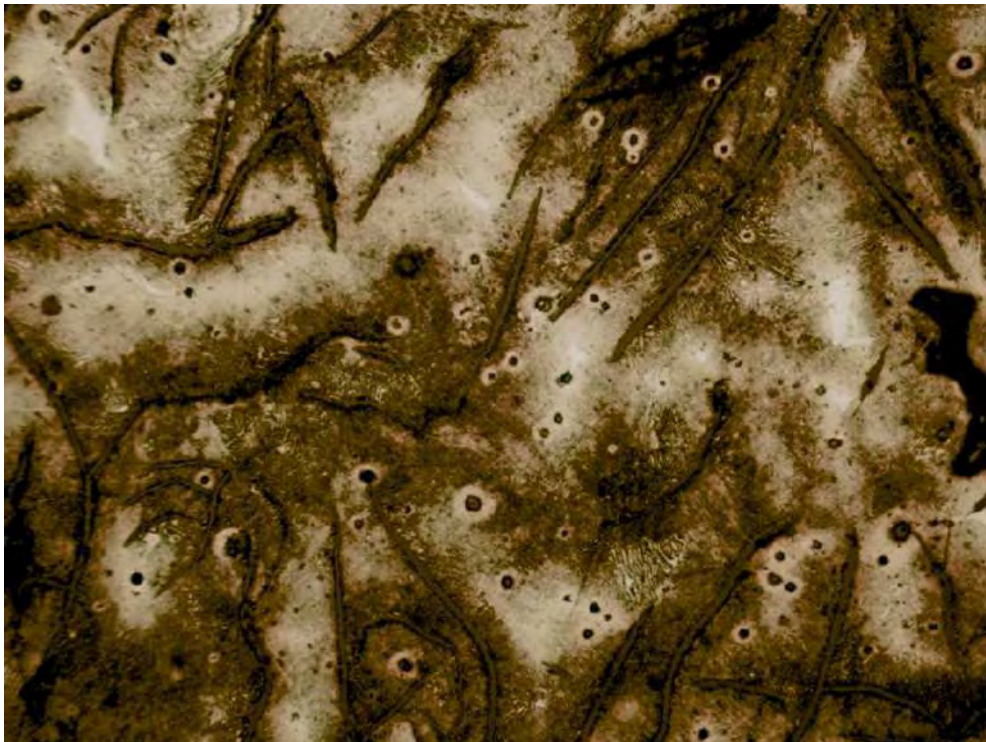


Figura 65. M10 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x
Fuente: Elaboración propia.

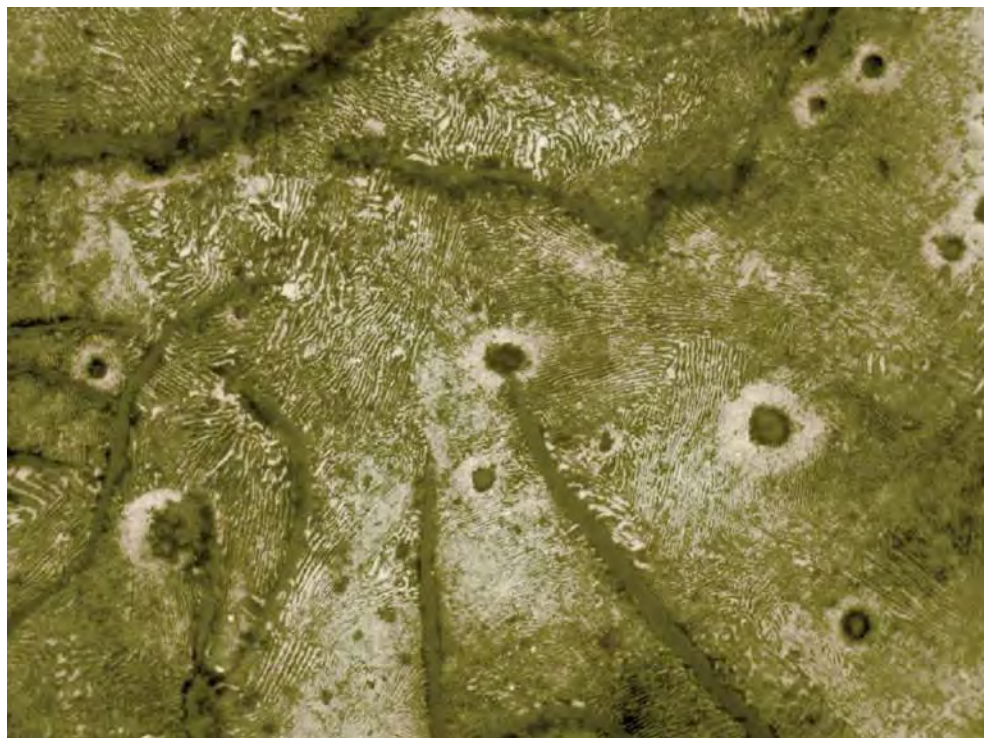


Figura 66. M10 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x
Fuente: Elaboración propia.

c. M14

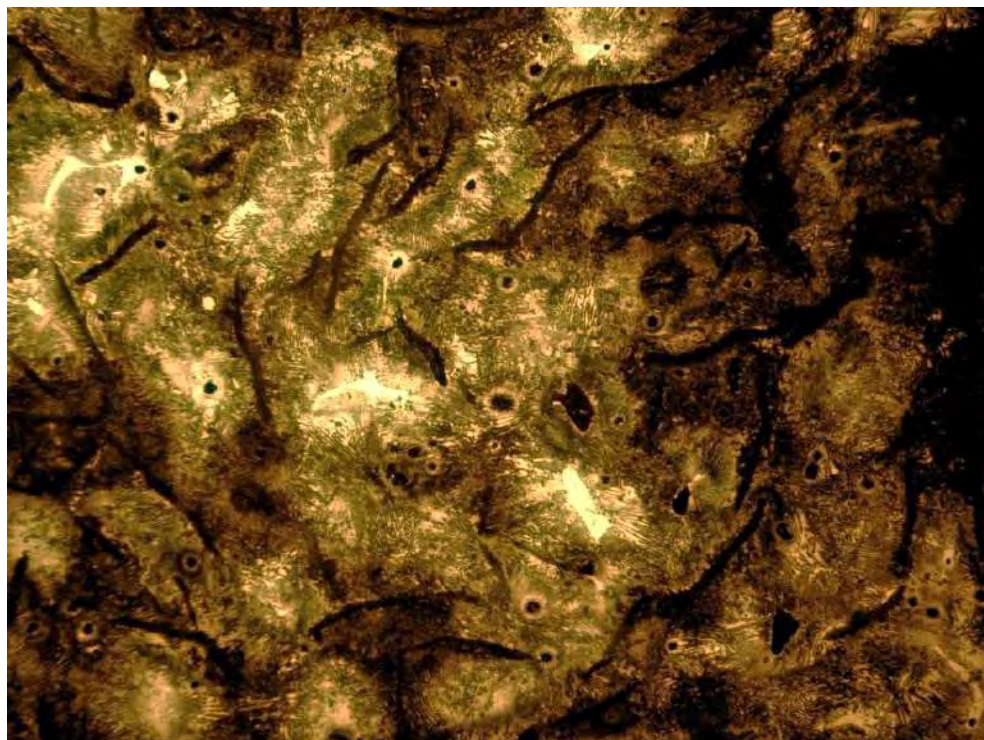


Figura 67. M14 atacado con Kunkele. Ampliación: 200x
Fuente: Elaboración propia.

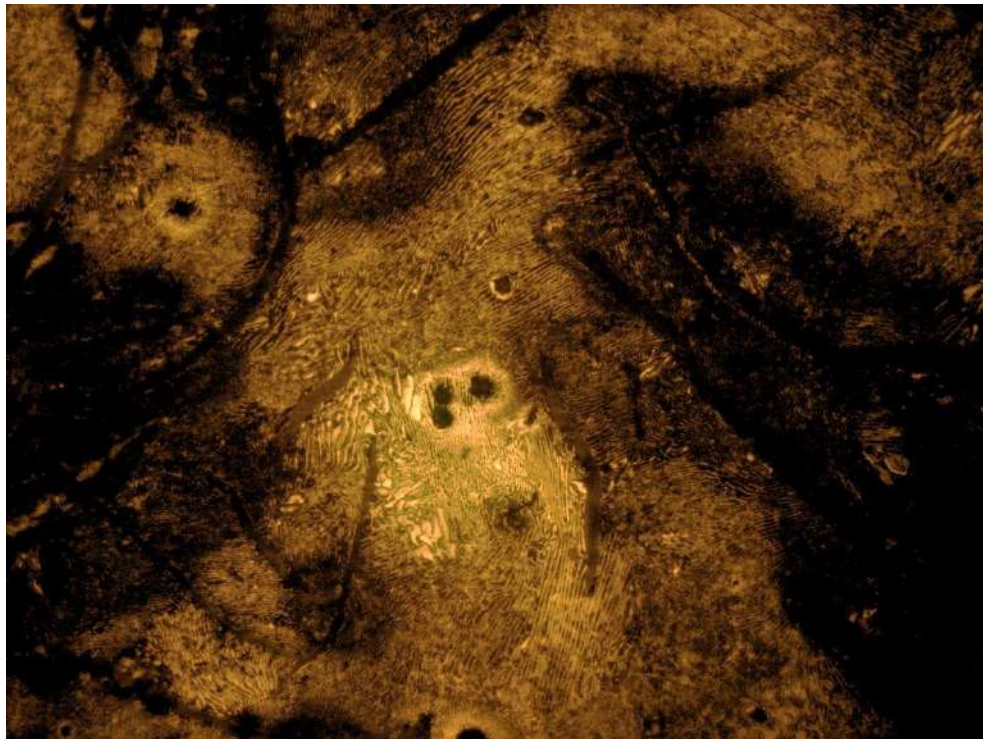


Figura 68. M14 atacado con Kunkele. Ampliación: 500x

Fuente: Elaboración

Capítulo 4

Propuestas de mejora.

4.1. Hornos de cubilote.

4.1.1. Relacionado al dimensionamiento.

A pesar de que el horno de cubilote no cuente con el dimensionamiento adecuado, se pueden aplicar ciertos ajustes para solucionar el presente problema y obtener un buen funcionamiento del horno de cubilote.

- a. **Altura del horno:** Como se menciona en el Capítulo 1, la altura es un parámetro de suma importancia puesto que influye sobre el precalentamiento de la carga. Para mejorar la eficiencia del proceso de fundición en el horno de cubilote es necesario que cumpla con la altura establecida en su diseño. Una manera sencilla y eficiente de arreglar este problema, es colocar el ladrillo refractario sobre la estructura ya existente hasta lograr la altura establecida por su diseño. Luego de esto se debe llenar los espacios que queden con un material refractario de tal manera que se asegure la no presencia de fugas. Posterior a esto se debe colocar la coraza y soldar entre planchas.



Figura 69. Aumento de altura de horno.
Fuente: <http://refractariosnitronsac.com>

- b. Instalación de anillo de viento:** El aire en este cinturón se vuelve una reserva y se mantiene caliente, además homogeniza la oxidación y combustión del carbono en el cubilote. Este dispositivo se instala de manera que se forme una estructura alrededor de la coraza que permita almacenar el aire ventilador. En la Figura 70, se observa un esquemático de la caja de viento en un horno de cubilote común.

Usualmente se suelda al acorazado del cubilote para evitar pérdidas de viento. En la Figura 71, se muestra el corte de un horno de cubilote y los puntos amarillos muestran el cordón de soldadura.

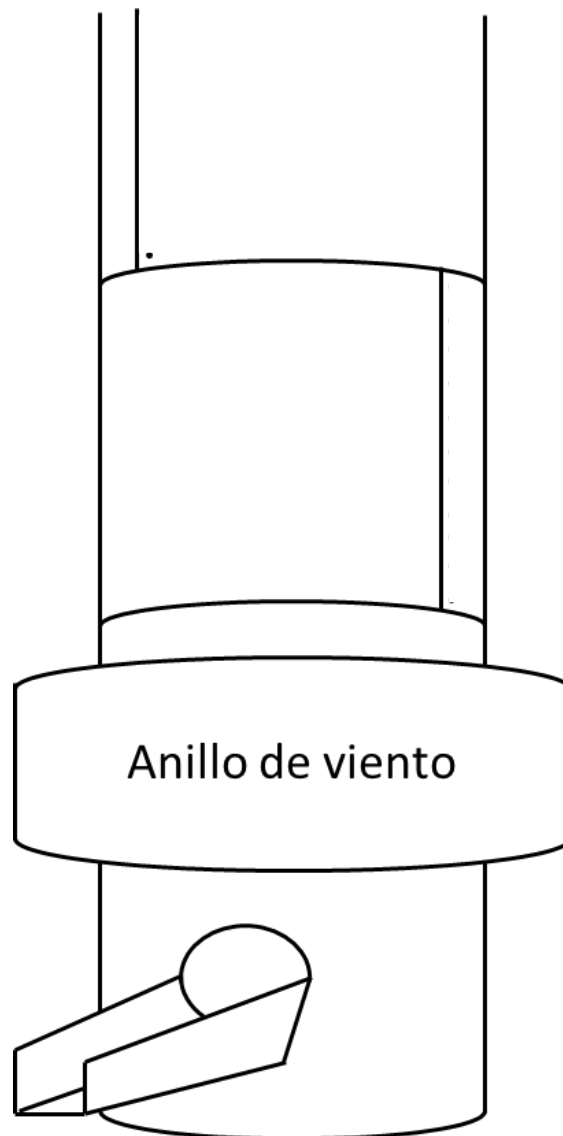


Figura 70. Esquema de un cubilote común.

Fuente: Elaboración propia.

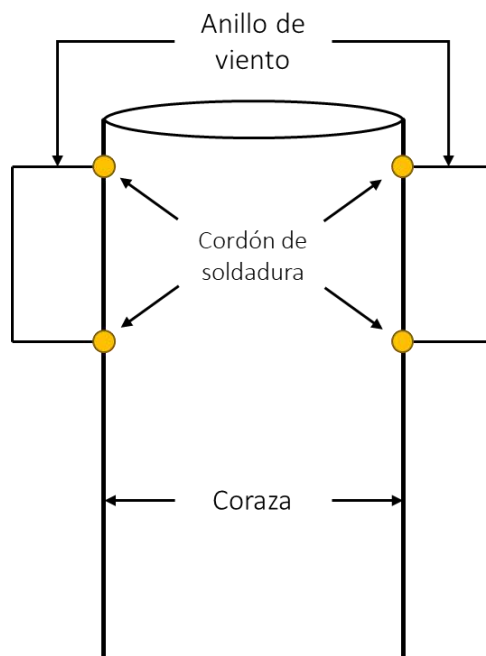


Figura 71. Esquemático del anillo o caja de viento.

Fuente: Elaboración propia.

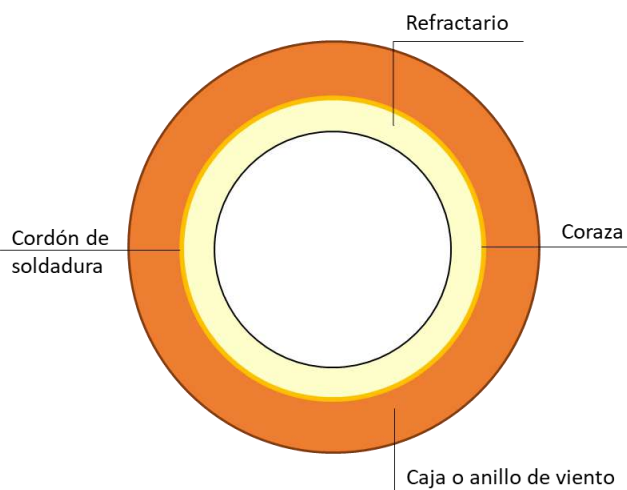


Figura 72. Esquemático con vista de planta del anillo o caja de viento

Fuente: Elaboración propia.

- c. **Orificio de escoriado:** Debe estar ubicado a unos 15 cm por debajo de la línea de toberas. Se puede obtener de dos maneras: si el revestimiento refractario está compuesto de ladrillos individuales, tallar uno de tal manera que se obtenga con las medidas necesarias y que se ubique a la altura necesaria. Si el revestimiento a utilizar es un monolito de refractario, el requerimiento de este debe ser tal que cumpla con los parámetros de diseño para el orificio de escoriado. En la Figura 72, se muestra el requerimiento de monolito refractario.

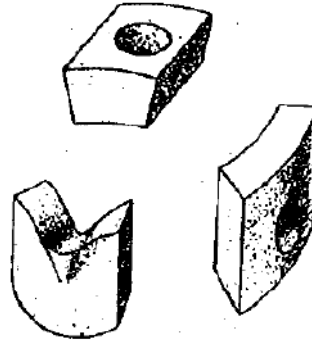


Figura 73. Piezas especiales de refractario.
Fuente: Tecnología de la fundición. Capello (1971).

- d. Inclinación de toberas:** Las toberas al formar parte del refractario, son sencillamente fáciles de adaptar. Si el refractario ya se tiene, se debe tallar el refractario hasta obtener la inclinación necesaria y el diámetro necesario. Este procedimiento consiste en tallar el refractario con una piqueta y un cincel hasta lograr que la tobera tenga una inclinación de 8° con la horizontal. En la Figura 74, se observa el esquemático de una tobera mal inclinada.

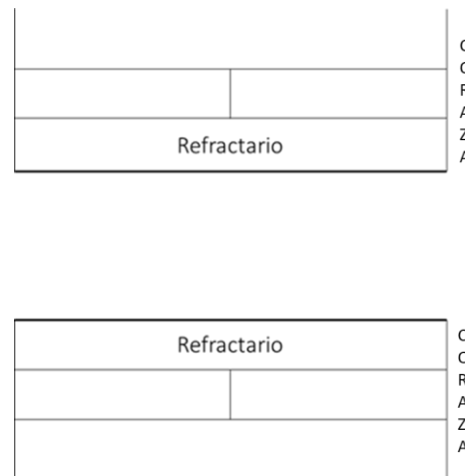


Figura 74. Esquemático de la inclinación incorrecta de una tobera.
Fuente: Elaboración propia.

En el esquemático de la Figura 75, se muestra de color azul, el material refractario a ser removido y de color mostaza, el material refractario a ser añadido.

En el esquema de la Figura 76 se muestra la correcta disposición de la inclinación de la tobera luego del trabajo del refractario.

Si el revestimiento a utilizar es un monolito de refractario, el requerimiento de este debe ser tal que cumpla con los parámetros de diseño para las toberas, es decir diámetro e inclinación.

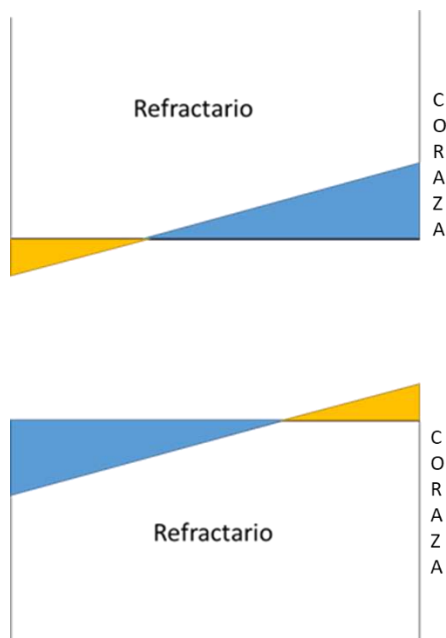


Figura 75. Esquemático de la remoción y adición de material refractario.
Fuente: Elaboración propia.

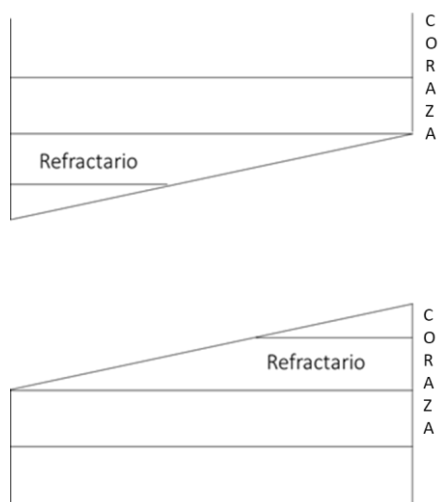


Figura 76. Esquemático de la correcta inclinación de una tobera.
Fuente: Elaboración propia.

- e. **Coraza:** Esta caja cilíndrica de acero debe ser capaz de contener y soportar el revestimiento refractario, cajas de viento, toberas, capuchón y sombrero supresor de chispas. Las placas de acero gruesas roladas en forma de secciones cilíndricas y remachadas, atornilladas o soldadas unas a otras con junta de traslape hacia abajo para proteger de las condiciones climáticas. En la Figura 77, se observa la instalación de las placas a junta de traslape y el cordón de soldadura (línea de color naranja).

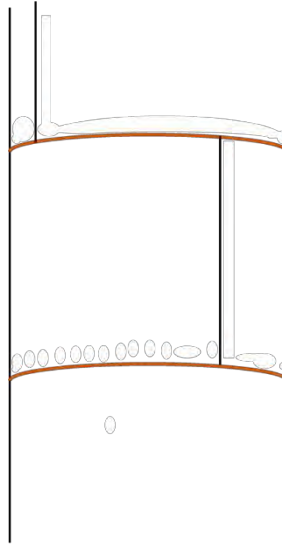


Figura 77. Esquemático de soldadura y remachado de la coraza
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Relacionado al diseño.

Es necesario que el diseño del cubilote cubra los diversos requerimientos o problemas que se pueda presentar durante o fuera de su funcionamiento. Por este motivo se hace necesario que algunos parámetros adicionales se cumplan.

- a. **Capuchón:** La parte superior de la coraza está reforzada con un anillo de ángulo de hierro, remachado contra la coraza de la tal manera que proporcione una protección contra la salpicadura de la lluvia entre el revestimiento y la coraza. Esta estructura protege también a las piqueras de colada y escoriado. En la Figura 78, se observa el capuchón, la inclinación más larga protege al lado de la piquera de sangrado y la pequeña, protege a la piquera de escoriado.

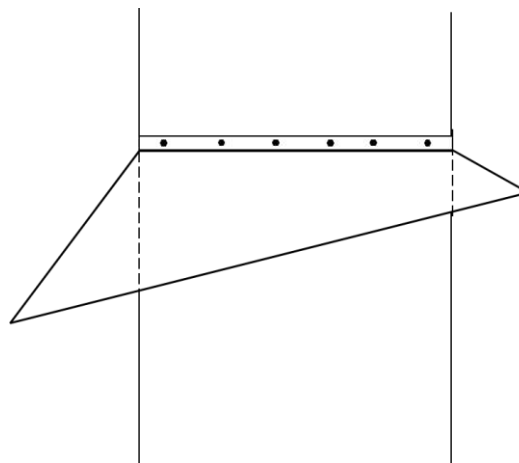


Figura 78. Esquemático del capuchón.
Fuente: Elaboración propia.

- b. Sombrero chino:** Para su diseño es necesario conocer el diámetro externo del horno de cubilote puesto que este es el dato de partida.

Para diseñar el sombrero se debe determinar el diámetro del sombrero y la altura del mismo. En las Ecuaciones 55 y 56 se plantean las medidas recomendadas:

$$D_{sombbrero} = 1.25D_e \quad (\text{Ec. 55})$$

$$h_{sombbrero} = 0.5D_e \quad (\text{Ec. 56})$$

Luego de haber establecido las medidas de altura y diámetro del sombrero chino, se debe determinar el radio de la estructura base haciendo uso del esquema base de la Figura 79:

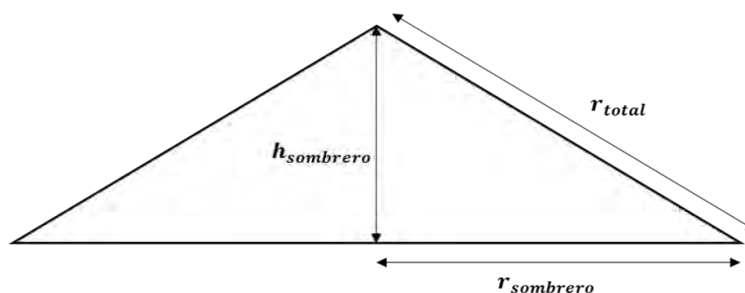


Figura 79. Esquema simplificado del sombrero.

Fuente: Elaboración propia.

La dimensión del radio se obtiene haciendo uso del teorema de Pitágoras, como se observa en la Ecuación 57:

$$r_{total} = \sqrt{(r_{sombbrero})^2 + (h_{sombbrero})^2} \quad (\text{Ec. 57})$$

Luego de haber calculado el radio de la estructura base, se procede a realizar el cálculo del área a retirar de la estructura base.

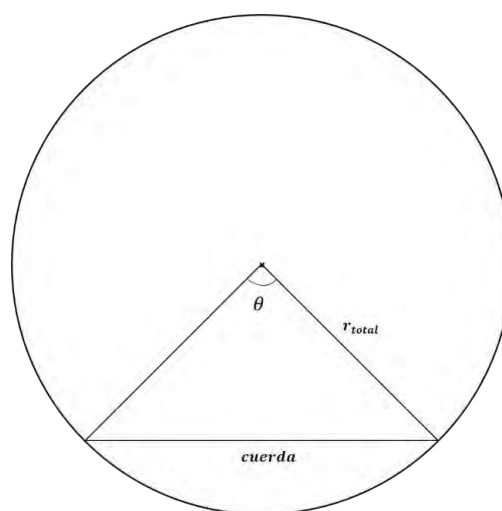


Figura 80. Esquema de la figura base para el sombrero chino.

Fuente: Elaboración propia.

Se calcula la abertura de la sección circular a retirar con la Ecuación 58, posterior a esto se obtiene la cuerda con la Ecuación 59, para unir los puntos de ambos radios y poder ser más exactos con la remoción del área.

$$\theta = 360 - \left(360 * \frac{r_{sombbrero}}{r_{total}} \right) \quad (\text{Ec. 58})$$

$$Cuerda = d_{total} * \sin \frac{\theta}{2} \quad (\text{Ec. 59})$$

Finalmente, luego de haber obtenido la pieza de material necesario, se procede a rolar la placa y obtener la estructura cónica. En la Figura 81, se observa un tentativo de la estructura final del sombrero chino. En el Apéndice 1, se observan las vistas de esta estructura.

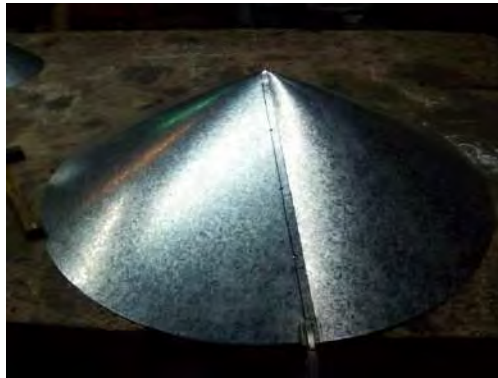


Figura 81. Esquema tentativo de la estructura del sombrero chino.

Fuente: Imagen extraída de vídeo.

- c. **Supresor de chispas:** A diferencia del sombrero chino, el supresor de chispas cuenta con dos niveles. La placa utilizada para su elaboración cuenta con pequeñas perforaciones necesarias para atrapar los residuos de materia inflamable que dejan el horno de cubilote durante su operación.

Para diseñar el sombrero se debe determinar el diámetro del sombrero y la altura del mismo. En las Ecuaciones 55 y 56 se plantean las medidas recomendadas. Luego de haber obtenido las medidas deseadas para el supresor de chispas, se procede a separar las dos estructuras.

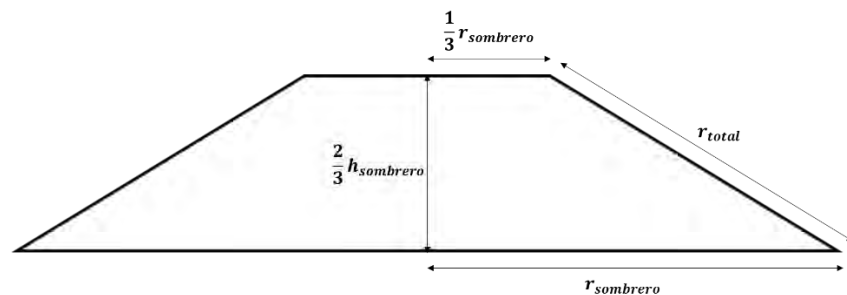


Figura 82. Parte inferior de supresor de chispas.

Fuente: Elaboración propia.

Para poder calcular los nuevos parámetros hacemos uso de la Ecuación 60:

$$r_{total} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}r_{sombbrero}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}h_{sombbrero}\right)^2} \quad (\text{Ec. 60})$$

La estructura final de la parte inferior deberá quedar como la Figura 83.



Figura 83. Esquemático de la parte inferior del supresor de chispas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la estructura superior, se debe garantizar que la base de este cubra una superficie mayor al espacio dejado por la estructura inferior. Puesto que la distancia vacía dejada es de $\frac{2}{3}$ de $r_{sombbrero}$, un factor de 1.5 garantiza que este espacio sea cubierto.

Con este nuevo dato se procede a calcular el material necesario para la estructura superior, haciendo uso de la Figura 84.

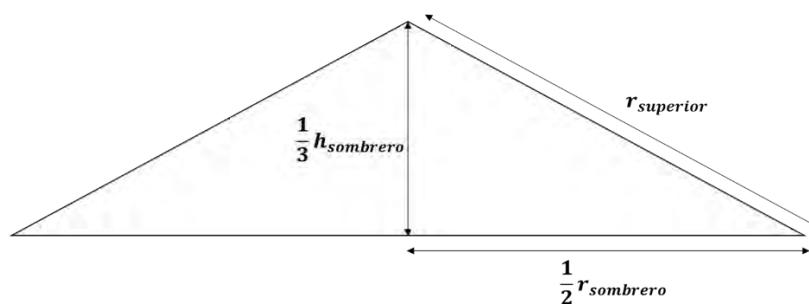


Figura 84. Esquema simplificado de la estructura superior.

Fuente: Elaboración propia.

La dimensión del radio se obtiene haciendo uso del teorema de Pitágoras, como se observa en la Ecuación 61:

$$r_{total} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}r_{sombbrero}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}h_{sombbrero}\right)^2} \quad (\text{Ec. 61})$$

Luego de haber calculado el radio de la estructura base, se procede a realizar el cálculo del área a retirar de la estructura base, haciendo uso de la Figura 85.

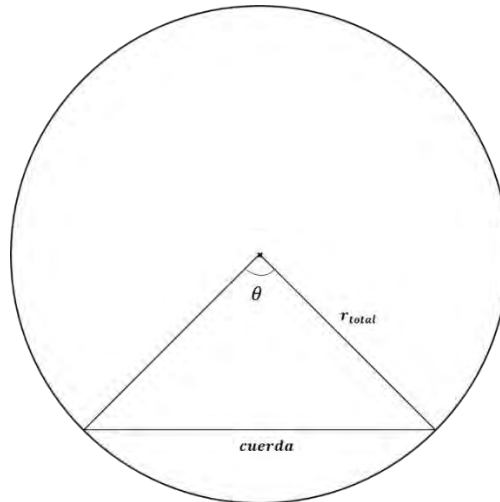


Figura 85. Esquema de la figura base para el sombrero chino.

Fuente: Elaboración propia.

Se calcula la abertura de la sección circular a retirar con la Ecuación 62, posterior a esto se obtiene la cuerda con la Ecuación 63, para unir los puntos de ambos radios y poder ser más exactos con la remoción del área.

$$\theta = 360 - \left(360 * \frac{r_{sombbrero}}{r_{total}}\right) \quad (\text{Ec. 62})$$

$$Cuerda = d_{total} * \sin \frac{\theta}{2} \quad (\text{Ec. 63})$$

Finalmente, luego de haber obtenido la pieza de material necesario, se procede a rolar la placa y obtener la estructura cónica. En la Figura 86, se observa un tentativo de la estructura final del supresor de chispas. En el Apéndice 2, se observan las vistas de esta estructura.

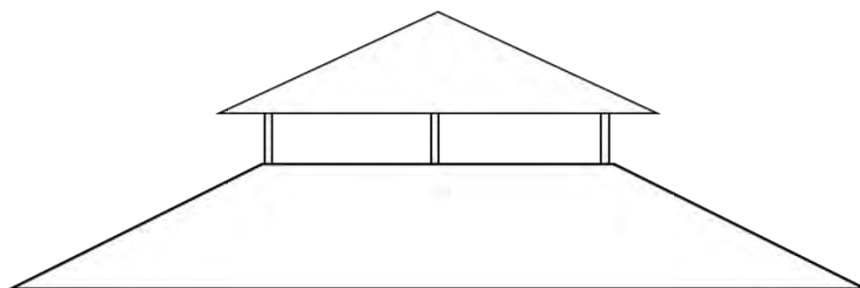


Figura 86. Esquemático del supresor de chispas.
Fuente: Elaboración propia.

- d. Material refractario:** Las empresas utilizan ladrillos de construcción (de sílice o arcilla) para el revestimiento de sus hornos. Este tipo de ladrillos constituyen un ambiente ácido en la zona interna del cubilote y, al reaccionar con el óxido de hierro de la chatarra sucia, la escoria producida en la fusión y los desulfurantes añadidos (de carácter básico), desgastan en, aproximadamente, 40% el revestimiento en cada operación del cubilote, aumentando los costos de mantenimiento del revestimiento, que es cambiado después de cada operación.

Por ello, se recomienda utilizar ladrillos de refractario básico o de alto contenido de alúmina, para disminuir el desgaste del revestimiento en, aproximadamente, 35%. En la Tabla 55, se muestran algunos tipos de ladrillos refractarios, especificando los precios del mercado. Los costos de inversión en ladrillos refractarios de mejor calidad se compensan con el tiempo de vida útil del revestimiento, la disminución de paradas por mantenimiento del horno y el ahorro en mano de obra por instalación de un revestimiento nuevo.

Por lo general, los ladrillos utilizados en el revestimiento de los hornos de cubilote son ácidos (ladrillos de construcción) cuyo precio oscila entre S/0.34 y S/0.40 la unidad, incluido IGV. Por lo que, haciendo una comparación con los ladrillos refractarios que se muestran en la Tabla 55, se puede afirmar que empleando un ladrillo refractario de alto contenido de alúmina, la vida útil del revestimiento del horno aumentará de tal manera que no será necesario cambiarlo hasta dentro de 4 meses.

Tabla 55. Ladrillos refractarios ofrecidos en la capital.

Insumo para Revestimiento	Descripción	Precio por unidad (S/.)
Ladrillo Refractario Básico NUCON 60	Ladrillo de magnesita cromo. Paredes superiores y bóvedas de hornos eléctricos de arco, zona de clinquerización de hornos rotatorios de cemento, hornos reverberos y convertidores de cobre.	45 + IGV

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de: Refractarios Peruanos S.A.)

Tabla 55. Ladrillos refractarios ofrecidos en la capital. (Continuación)

Insumo para Revestimiento	Descripción	Precio por unidad (S/.)
Ladrillo Refractario Básico	Ladrillo refractario básico. Aplicación para revestimiento de hornos metalúrgicos.	38 + IGV
Ladrillo Refractario del alto contenido de alúmina.	60% Al ₂ O ₃ . Hornos rotatorios de cal y cemento, calderos bagaceros, hornos metalúrgicos y hornos de recalentamiento. Altos hornos y estufas de altos hornos, carros torpedos, tanques de vidrio, hornos de inducción.	4.5 + IGV

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de: Refractarios Peruanos S.A.)

4.1.3. Relacionado a la operación.

a. Funcionamiento del horno de cubilote

- **Reparación:** Después de cada colada, el cubilote se debe dejar enfriar y, al día siguiente, se debe reparar: a este fin, con un cincel o una piqueta, se quita la escoria o el material refractario vitrificado adherido al revestimiento, que se presenta más o menos corroído en torno a las toberas hasta alcanzar el material refractario que no ha sufrido deterioro. Las partes afectadas se deben recubrir entonces con material nuevo, bien trabajado y dejado reposar por lo menos veinticuatro horas.
- **Encendido:** Se debe preparar la solera del horno con arena de moldear seca con agua y se seca con fuego de leña o llama de gas. Dos horas antes de dar inicio a la colada, se introduce leña seca que se enciende hasta obtener un fuego vivo y abundante, favorecido por los orificios abiertos del horno. En esta etapa se introduce el denominado combustible de encendido en capas, se debe adicionar entre el 5 al 10% de caliza. El combustible de encendido debe alcanzar entre 0.6 a 1m (Tecnología de la fundición. Capello, 1982) sobre el plano de toberas, para comprobar este parámetro, se recomienda usar un barra doblada en Z. Se debe dar viento durante 4 a 5 minutos, esto ayuda a desulfurar el combustible.
- **Carga del horno:** Se coloca sobre la capa de combustible de encendido una carga de combustible adicional a la necesaria, mezclada con fundente y encima, la carga metálica. A continuación se coloca una segunda carga de combustible con fundente y la segunda carga metálica, y así, alternativamente, hasta alcanzar la puerta de carga. Posterior a esto se debe mantener lleno el horno, con cargas alternas a medida que las otras cargas vayan descendiendo por efecto del consumo de combustible y de la fusión del metal.

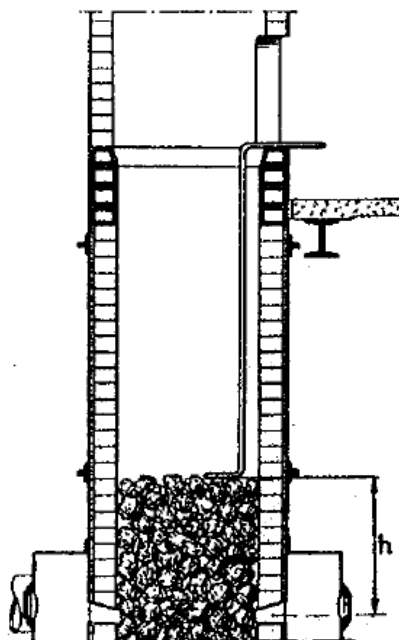


Figura 87. Comprobación de altura con barra doblada en Z.
Fuente: Tecnología de la fundición. Capello (1982).

La capa de combustible de encendido debe mantener su altura invariable durante toda la colada, su consumo se reintegra de un modo regular a través de las cargas sucesivas de combustible. Si no se diese una estabilidad de la capa de combustible encendido, se compensa con una falsa carga, es decir, una carga de combustible sin metal o, para no perder material fundido, disminuir la carga metálica y no alterar la de combustible.

- **Fin de la fusión:** Cuando ya se está cerca de obtener la cantidad de piezas totales, se introduce la última carga. Cuando el nivel de la carga alcanza el 75% de la altura del horno, se debe reducir la entrada de viento. Cuando la escoria ya aparece en la piqueta de sangrado, el horno debe empezar su vaciado.
- **Vaciado del horno:** Se abren las mirillas de las toberas, la puerta de limpieza, y se abre la puerta de descarga. La solera del horno cae al igual que los residuos de la capa de combustible y de material contenido. Estos restos se enfrían con chorros de agua y se retiran para que no estropeen el cubilote.

b. Selección de carga metálica

Mencionado anteriormente, la calidad de la chatarra utilizada define la calidad del metal elaborado. Se hace necesario cumplir ciertos criterios (Diseño, Operación y Control del Cubilote. Baquero, 2000) para poder definir la chatarra a ser usada:

- **Procedencia:** Se debe distinguir entre la chatarra que se produce y la adquirida. Tomando en cuenta este criterio, las chatarras pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

Tabla 56. Clasificación de chatarras según su procedencia

Chatarra producida	Chatarra adquirida
<ul style="list-style-type: none"> - Retornos de fundición (mazarotas, bebederos, etc.). - Retornos provenientes de la sección de mecanizado. - Viruta 	<ul style="list-style-type: none"> - Chatarras viejas - Chatarra pequeña (tuercas, tornillos, etc.) - Viruta - Lotes o piezas de material homogéneo adquirido de empresas.

Fuente: Diseño, Operación y Control del Cubilote. Baquero, 2000

- **Naturaleza física:** El criterio viene definido por las dimensiones de la chatarra, una chatarra grande introduce menos humedad, óxidos, tierra, aceite, grasa, pinturas, etc., que los productos delgados, que además son difíciles de analizar. A continuación se detallan los espesores de las chatarras.
 - **Chatarra delgada:** $3\text{mm} \leq e \leq 5\text{mm}$
 - **Chatarra moderada:** $5\text{mm} \leq e \leq 8\text{mm}$
 - **Chatarra gruesa:** $e \geq 8\text{mm}$
- **Origen:** Determinar la calidad de la chatarra es más difícil de precisar, puesto que la procedencia de la materia prima es diversa. Se hace necesario tener en cuenta ciertas consideraciones, como por ejemplo: si la chatarra presenta fractura blanca, es debido a un porcentaje de carbono y/o bajo contenido de silicio, o es el resultado de un alto contenido de cromo; o si la chatarra tiene una composición química desbalanceada como exceso de azufre, bajo contenido de manganeso y silicio deficiente.

Si la chatarra tuvo aplicaciones para herramientas, es evidente que tendrá elementos como cromo, vanadio, molibdeno, etc., y estos pueden volver inservible a la pieza final. Si la chatarra fue expuesta al calor durante largos periodos de tiempo (hornos, calderas, etc.), está fuertemente oxidada y son ricos en azufre. Bajo estas condiciones, se recomienda no utilizar como base prima para obtención de fundición gris.

c. Diseño de carga de un horno de cubilote.

La adecuada proporción de la carga de materia prima en el cubilote influye en la composición química del caldo de colada que se obtiene.

Lo que se propone a continuación, son posibles modos de cargar los hornos para obtener fundiciones de clase estándar (clase 25 y 35 para este caso), utilizando materiales disponibles en la región norte del Perú, ya que en la

literatura técnica las propuestas contemplan el uso de materiales no disponibles en nuestra realidad o cuya importación significaría costos muy elevados para los talleres norteños.

Es importante señalar las siguientes consideraciones:

- No se ha añadido ninguna ferroaleación, ya que en la realidad estudiada, los talleres del norte del Perú no los emplean normalmente. Existen excepciones como el caso de algunos talleres que sí los emplean cuando se les exige piezas de responsabilidad.
- En este caso, se ha asumido una pérdida de silicio del 8% del nivel cargado y una pérdida del 18% de manganeso. No se espera ningún cambio en el contenido de fósforo.
- La experiencia previa de operar el cubilote es el único método para determinar la absorción de azufre y, en este caso, se ha estimado en 0.03%.
- El hierro colado no se trata en la cuchara haciendo adiciones en la cuchara ya que según la realidad estudiada, ningún taller lo realiza.

En la Tabla 57 se muestra una hoja de cálculo para obtener una fundición gris estándar de clase 25 cargando el cubilote con chatarra que se encuentra en la localidad. Las proporciones de cargas se han fijado de acuerdo a lo que indica la literatura (Brown, 2000), aproximando la composición química de las chatarras a las sugerencias de piezas cargadas. En la Tabla 58 se muestran la sugerencia de carga del cubilote para obtener una tonelada de fundición de clase 25 por el método “Cálculo de la carga (por tanteo) para la fabricación de un hierro gris en un horno de cubilote con revestimiento ácido” (ESPE, 2017).

Tabla 57. Hoja de cálculo de carga para fundición de clase 25 sin arrabio

		Composición						Contribución a la carga					
		TC	Si	Mn	P	S		TC	Si	Mn	P	S	
Volante de Motor 1	30%	3.31	2.22	0.92	0.01	0.05	x0.30	0.99	0.67	0.28	0.00	0.01	
Retornos de clase 25	35%	3.20	2.40	0.60	0.10	0.08	x0.35	1.12	0.84	0.21	0.04	0.03	
Carcasa de bomba gruesa	20%	3.28	2.13	0.65	0.02	0.19	x0.20	0.66	0.43	0.13	0.00	0.04	
Cilindro de metal	15%	3.16	1.65	0.75	0.03	0.04	x0.15	0.47	0.25	0.11	0.00	0.01	
Ferroaleaciones													
Composición en la carga								3.24	2.18	0.73	0.05	0.09	
Cambio en la fusión		En el C suponemos aumento de 0.16 En el Si=0.08×2.18 En el Mn=0.18×0.73						+0.16	-0.17	-0.13			0.03
Composición después del cambio de fusión								3.40	2.01	0.60	0.05	0.12	
Adición en la cuchara													
Composición estimada								3.40	2.01	0.60	0.05	0.12	

Fuente: Elaboración propia. (Datos tomados de Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. Brown, 2000. Razonamiento basado en Cálculos tomados de fusión en la metalurgia. Pino Tarragó, Julio Cesar; Terán Herrera, Héctor Cochise; Mena Mena, Euro Rodrigo; Navas Medina, Efraín, 2017.)

Tabla 58. Pesos individuales para la hoja de cálculo de carga para fundición de clase 25.

300Kg	Volante de motor 1
350Kg	Retornos de fundición de clase 25
200Kg	Carcasa de bomba gruesa
150Kg	Cilindro de metal

Fuente: Elaboración propia

Los resultados anteriores muestran que, haciendo un adecuado balance de cargas con la materia prima disponible en la región norte del Perú, podría obtenerse una fundición estándar desde el punto de vista químico. Siguiendo esta sugerencia, los talleres pueden elevar la calidad de sus piezas sin tener que gastar más.

Es preciso indicar que los balances sugeridos serán exitosos si emplean un combustible de mejor calidad (con menor contenido de azufre) como el coque o antracita con menor índice de azufre.

- **Cálculo de carga de cubilote empleando ferroaleaciones.**

Las cargas, normalmente, se diseñan para 100 kg y al momento de ejecutarlas, se multiplica por un factor que le cumpla para que cantidad que se necesita fundir. Si diseñó para 100 kg pero solo requiere fundir 70 kg, multiplica por 0,7. Por el contrario, si requiere más de 100 kg, por ejemplo 300 kg, todo por 3.

$$kg_{necesarios\ de\ cada\ mat.prima} = \frac{\% \text{ necesario del elemento solicitado}}{\text{fracción de pureza} * \text{fracción de eficiencia}}$$

Se plantea el siguiente ejemplo:

El cliente está solicitando una fundición gris con 2,5% de silicio y 0,50% de manganeso.

En el cubilote, el caldo de colada aumenta su porcentaje de silicio en un 2% de Silicio, aprox. y su porcentaje de manganeso en un 0,20%.

Para una carga metálica de 150 kg. (De aprox. 70 cm de diámetro interno del cubilote).

Tabla 59. Resumen de la materia prima necesaria para fundir 150 kg de hierro con 2.5% Si y 0.5% Mn.

Materia prima	Proporción
Carga metálica	150 kg
Coque	22,5 kg de coque (150 kg*0.15)
Chatarra fundición gris	150 kg
Caliza	2,25 kg (1,5%*150 kg)
Ferrosilicio (FeSi al 70%)	2,15 kg (1,43*1,5kg)
Ferromanganeso (FeMn al 78%)	1,05 kg (0,7*1,5kg)

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del porcentaje de composición química, aproximada:

➤ **Silicio:**

$$kg_{FeSi} = \frac{0,5}{0,7 * 0,5} = 1,43kg \text{ de FeSi}$$

El valor obtenido es para una carga de 100 kg, para los 150 kg se debe multiplicar por 1.5:

$$kg_{FeSi} = 0,15 * 1,43kg \text{ de FeSi} = 2,15 kg \text{ de FeSi}$$

➤ **Manganeso:**

$$kg_{FeMn} = \frac{0,3}{0,78 * 0,55} = 0,7kg \text{ de FeSi}$$

El valor obtenido es para una carga de 100 kg, para los 150 kg se debe multiplicar por 1.5:

$$kg_{FeMn} = 0,15 * 0,7kg \text{ de FeMn} = 1,05 kg \text{ de FeMn}$$

d. Control de la fusión

En cuanto a la marcha de cubilote, se hace necesario controlar el proceso para obtener cierta regularidad en la calidad de las piezas finales.

La marcha del cubilote puede ser juzgada por el color de la llama en la boca de carga, gotas del caldo y, por el color y fractura de la escoria generada.

En lo que respecta al aspecto de la llama:

- **Ausencia de llama en la boca de carga:** Indica funcionamiento y proporciones de carga normales del horno.
- **Llama de color azul turquesa:** Indica un alto contenido de CO, se debe disminuir la cantidad de combustible entre cargas.
- **Llama blanca brillante:** Alto contenido de CO₂, se debe disminuir el flujo de viento.
- **Llama humosa:** Marcha lenta y exceso de combustible. Se debe aumentar el flujo de viento y disminuir la cantidad de combustible,

En lo que respecta al caldo, este debe ser evaluado a nivel de toberas:

- **Gotas fluidas incandescentes, pequeñas y redondas:** Indican un caldo caliente y un funcionamiento adecuado del horno. La cama de combustible, porcentaje de combustible entre cargas y el caudal del aire son los correctos.

- **Gotas menos fluidas, menos incandescentes, pequeñas y redondas:** Indican un caldo menos caliente, esto se traduce a un contenido excesivo de combustible entre cargas y un deficiente flujo de aire.
- **Gotas claras grandes y alargadas acompañadas con chorros oscuros menos incandescentes:** Indica que la fundición aún está caliente pero presenta tendencia a oxidación. Existe un exceso en el flujo de aire y el combustible se consume muy rápido que no permite fundir por completo la materia metálica, se debe disminuir el flujo de aire puesto que si continua, el valor de temperatura del caldo disminuirá y la oxidación de la fundición incrementará.
- **Gotas oscuras, no fluidas y alargadas:** Indica un desarreglo severo durante el proceso de fusión. El caldo saldrá frío y altamente oxidado, se hace necesario revisar todos los parámetros involucrados como el contenido de combustible y el flujo de aire.

En lo que respecta a la escoria:

- **Escoria fluida de color verde botella:** Buena marcha del horno y escasa oxidación del caldo.
- **Escoria demasiado fluida, con fractura quebradiza y oscura:** Indica un exceso de fundente en las cargas.
- **Escoria demasiado viscosa:** Indica escasez de fundente entre cargas.
- **Escoria compacta, parda, con fractura vítrea de color amarillento:** Indica una buena marcha del horno del cubilote pero con exceso de manganeso en el caldo.
- **Escoria negra:** Denota un grado excesivo en la oxidación del caldo debido a la presencia de óxidos de hierro (FeO) y óxidos de manganeso (MnO).

e. Medición de temperatura en el caldo

Luego de verificar que la marcha del horno es correcta, es necesario corroborar que la temperatura del caldo sea la adecuada. Hay diversos modos empíricos de aproximar la temperatura del caldo de colada. Muchas veces se vale de la inspección visual para decir si el caldo está listo para vaciarse. Se tiene una carta de colores que se muestra en la Figura 88.

Rojo apenas visible	475 °C	885 °F
Rojo oscuro	475-650 °C	885-1200 °F
Rojo cereza	650-750 °C	1200-1380 °F
Rojo cereza claro	750-815 °C	1380-1500 °F
Naranja	815-900 °C	1500-1650 °F
Salmón	900-1095 °C	1650-2000 °F
Amarillo	1095-1315 °C	2000-2400 °F
Amarillo claro	1315-1540 °C	2400-2800 °F
Amarillo pálido	1540-1600 °C	2800-3000 °F
Blanco	>1600 °C	>3000 °F

Figura 88. Carta de temperaturas de acuerdo al color del caldo.

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de: “El horno de cubilote y su operación”. American Foundrymen’s Society, 1985).

Otro criterio importante es el de la visualización de la nata sobre el baño, lo cual indica que en la superficie se están formando los primeros cristales y que se encuentra en la temperatura de líquido a sólido. En la mayoría de casos se prefiere que la temperatura del caldo sea muy alta, puesto que en la cuchara de vaciado, este se puede enfriar. Ante esto se recomienda calentar la cuchara antes de que reciba al metal para que mantenga la temperatura.

Para que el metal salga más caliente se debe poner una mayor cama de coque y al cubilote debe ingresar mayor cantidad de aire. Se propone, entonces, 15% de combustible entre carga para obtener metal caliente, siempre y cuando aportemos la suficiente cantidad de aire para quemarlo.

De todas maneras, el parámetro de temperatura debe de controlarse (no puede ser mayor de 1600°C), puesto que si está muy caliente puede romper las cucharas de vaciado, causar poros de humedad y rechupes. En la Tabla 60, se mencionan y describen más criterios empíricos.

Tabla 60. Métodos empíricos y cualitativos para aproximar temperatura del caldo.

Criterio	Observación visual
Color del caldo	Gotas más claras que el coque incandescente, pequeñas, redondas y numerosas indican una fundición caliente y un funcionamiento adecuado del horno. Si se presenta en el centro una línea continua de óxido más brillante que la fundición líquida, la T° normal es superior a 1470°.
Brillo del caldo	Más brillante y más blanco, mayor temperatura.
Fluidez del caldo	A mayor fluidez mayor temperatura.
Nata sobre el caldo	En superficie se están formando los primeros cristales, es decir, que el caldo se encuentra en la temperatura líquido-sólido.

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de Diseño, Operación y Control del Cubilote. Baquero, 2000).

También se conocen los métodos de las termocuplas bimetálicas, que pueden ser de tipo K (para bronce y aluminios, mide hasta 1250°) o tipo S (para fundiciones grises, nodulares y aceros, mide hasta 1700°) y conos de metales puros (cobre 1084°C, aluminio 660°C, zinc 431°C), que al ponerse en contacto con el caldo aproxima la temperatura de acuerdo al punto de fusión del elemento del que esté hecho. El cono pirométrico para fundiciones sigue un principio de funcionamiento bastante similar, son indicadores de temperatura colocados en la mirilla del horno que al doblarse indican que se ha llegado a la temperatura adecuada (1535°C). Están hechos de arcilla y fundentes.

La medición de temperatura se puede efectuar a través de: pirómetros de inmersión, láser y termocuplas. En la Tabla 61, se muestra la descripción de estos equipos, así como su precio tentativo, según datos obtenidos del proveedor.

Tabla 61. Equipos para determinar la temperatura del caldo.

Equipo	Principio	Precio tentativo (\$)
Pirómetro de inmersión	A través de un vástago, este ingresa al caldo y mide la temperatura.	6000 Considerando repuesto cerámicos.
Pirómetro láser	Tipo pistola. El pirómetro mide la energía que posee la radiación y posteriormente mediante un empleo de circuitos electrónicos de adaptación de señales se obtiene la medición de temperatura.	25000
Termocuplas	Las termocupla del tipo K mide temperaturas de hasta 1372°C con una mayor sensibilidad. La termocupla B mide temperaturas superiores a 1800°C, las termocuplas R y S miden hasta 1300°C. Estas termocuplas presentan un mayor rango de medida pero su sensibilidad es menor.	200

Fuente: Elaboración propia (Datos tomados de JV Industrial Technology).

4.2. Selección y adquisición de combustible.

Uno de los problemas encontrados en las fundiciones es el alto contenido de azufre que afecta la calidad de las piezas obtenidas porque induce una serie de defectos. Se ha constatado, a partir del análisis de la materia prima utilizada en el norte, que este aumento de azufre se debe, fundamentalmente, al combustible.

La calidad del combustible es el factor que más incide en la cantidad de azufre presente en el metal fundido. Por lo que adquirir carbón con menor contenido de azufre es un importante factor a definir durante la operación del cubilote. De ahí, la recomendación de comprar un tipo de carbón con menor contenido de azufre, como, por ejemplo: antracita de mejor calidad, coque metalúrgico, etc.

4.2.1. Especificaciones técnicas de antracita

En el norte del Perú, se utiliza carbón antracita o hulla con exceso de azufre, el mismo que es propulsor de defectos en las piezas de hierro fundido, menguando su calidad.

Es por ello que se recomienda comenzar a gestionar, de manera conjunta (entre todos los talleres de la zona norte), el aprovisionamiento de carbón coque.

En el Perú hay empresas dedicadas a la venta de coque importado de países como Colombia, por ejemplo.

Respecto a la antracita, hay diferentes calidades que podrían usarse si no se consigue coque, interesando específicamente los que presentan bajo azufre.

En el Anexo I, se observan las distintas ofertas que el mercado peruano ofrece respecto a los combustibles de mejor calidad.

4.3. Tratamiento del caldo

4.3.1. Desulfuración del caldo

La desulfuración es una operación mediante la cual se elimina azufre, por inyección de una mezcla química a una cuchara de colada llena de metal caliente (caldo). El azufre queda retenido en la escoria resultante. Se hace necesario puesto que, como se mencionó en el Capítulo 1 y se discutió en el Capítulo 3, este elemento otorga propiedades no deseadas como baja fluidez del caldo, limita el crecimiento del grafito y favorece el fenómeno del blanqueo.

Por otra parte, ajustando el contenido de azufre a los valores que indican las normas, se obtienen fundiciones de mejores características y propiedades, se evita la formación de sulfuros de hierro y sobre todo, facilita la fabricación de hierro nodular.

Hay características que controlan la desulfuración y garantizan su éxito, estas son:

- **Composición química del caldo:** A mayor contenido de azufre en el caldo, se hace necesario mayor cantidad de desulfurante.
- **Temperatura del caldo:** La cinética química de la reacción de desulfuración está determinada por la temperatura. A mayor temperatura, aumentará la eficiencia del desulfurante.
- **Agitación y tiempo de permanencia en el caldo:** El nivel de agitación asegura que el caldo esté en contacto con el desulfurante y aumente la reacción de desulfuración. El tiempo influye puesto que a mayor tiempo de permanencia, se asegura el contacto del caldo con el desulfurante.
- **Tipo de desulfurante:** Se recomienda que el desulfurante esté compuesto por un elemento alcalino o alcalinotérreo para asegurar su comportamiento básico y la fácil remoción de la escoria.

Estos parámetros influyen sobre la eficiencia de la desulfuración, la cual viene dada por la siguiente Ecuación 64:

$$E_s = \frac{\%S_i - \%S_f}{\%S_i} * 100 \quad (\text{Ec. 64})$$

Donde %S_i es el contenido de azufre en el caldo sin tratamiento, %S_f es el contenido de azufre luego del tratamiento de desulfuración.

El último parámetro es el más importante porque de este dependerá el comportamiento de la desulfuración del caldo. Existen diferentes agentes desulfurantes, en la Tabla 62 se mencionan algunos de ellos y el efecto de estos.

Tabla 62. Agentes desulfurantes y sus efectos.

Desulfurante	Efecto
Soda caustica (NaOH)	Es una sustancia altamente reactiva y por ende peligrosa. Puesto que reacciona de manera explosiva puede introducir gases al caldo y generar defectos en la pieza final.
Caliza (CaCO₃)	Al descomponerse tiene un efecto positivo sobre la desulfuración, pero se descompone bajo una reacción altamente endotérmica y disminuye la temperatura del caldo.
Carbonato de sodio (Na₂CO₃)	Posee una alta eficiencia de desulfuración, sin embargo al descomponerse necesita de energía térmica y disminuye la temperatura del caldo. Además por su comportamiento básico genera una escoria demasiado fluida dificultando su remoción en la cuchara.
Cianamida cálcica (CaCN₂)	Un elemento de desulfuración poco convencional y un medio de ingreso de nitrógeno a la composición, causante de defectos por sopladuras.
Cal (CaO)	Desulfurante más utilizado pero al ser una reacción endotérmica disminuye la temperatura del caldo y la escoria generada solidifica muy rápido.
Carburo de calcio (CaC₂)	Es el desulfurante más adecuado. Se requieren porcentajes de más o menos 1% para reducir el azufre desde 0.1% al 0.01%.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 62, los tres mejores agentes desulfurantes serán aquellos que no consuman demasiada energía que conlleve a un enfriamiento del caldo, aquellos que no introduzcan elementos que originen defectos sobre la pieza final. Bajo los criterios anteriores, los mejores desulfurante serán el carbonato de sodio, la cal y el carburo de calcio.

De los tres anteriores, es necesario escoger por uno que otorgue lo deseado: una temperatura adecuada del caldo, pocos defectos sobre la pieza final y sobre todo que el grado de desulfuración sea alto. En la Tabla 63, se comparan a los tres desulfurantes, bajo ciertos parámetros.

Tabla 63. Características de los desulfurantes más usados.

Factor	Carburo de calcio	Cal	Carbonato de sodio
Escoria producida	Granular. Fácil de remover.	Granular. Fácil remoción.	Muy fluida. Difícil remoción.
Producción de gases	Poco	Poco	Bastante
Pérdida de temperatura	Pequeña. Reacción exotérmica.	Apreciable	Apreciable – alta
Naturaleza del refractario	Indiferente	Básico	Básico
Costo	Alto	Barato	Medio
Almacenamiento	Regulaciones establecidas	Mantener seco	Mantener seco

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la Tabla 63, muestran que el mejor desulfurante será el carburo de calcio puesto que sus factores no influyen sobre la pieza final. Mientras que la cal y el carbonato de sodio disminuyen la temperatura del caldo, lo cual originaría defectos como los ya discutidos en el Capítulo 3. Además de esto, se observa que la cal y el carbonato de sodio necesitan de un refractario básico en cuchara, si el refractario es ácido se presenta el riesgo de reacción entre desulfurante y refractario. Los únicos factores limitantes son su costo y la rigurosidad de almacenamiento puesto que es un compuesto muy susceptible a cambios en su entorno, y esto podría dificultar su éxito como desulfurante.

Conclusiones

1. Entre los defectos que pueden presentarse en las piezas de fundición gris, hay algunos cuya causa está directamente relacionada con el diseño y características del horno de cubilote. Algunos de estos defectos son las sopladuras o cavidades, inclusiones, fundición incompleta y superficies defectuosas.
2. De los hornos de cubilote caracterizados, sólo dos cumplen con una altura efectiva adecuada para el funcionamiento del mismo además de cumplir con los parámetros que involucran a esta medida.
3. Los siete hornos de cubilote estudiados presentan valores de altura y número de toberas menores a los recomendados, ausencia de anillo o caja de viento, un mal dimensionamiento del sistema de viento y recubrimiento refractario inadecuado.
4. De los hornos de cubilote analizados solo el 11% cumple con una altura efectiva igual o mayor a la recomendada, 22% cumple presentar orificio de escoriado, número adecuado o superior de toberas, y tener instalado un anillo o caja de viento. El 100% de los hornos, de acuerdo al fundente utilizado, no cumplen con el material de refractario adecuado para la operación. Los porcentajes demuestran la poca instrucción existente en cuanto al correcto diseño y dimensionamiento del horno de cubilote.
5. El sistema de alimentación de aire (anillo o caja de viento, tuberías de viento, número y dimensionamiento de toberas) y la humedad de refractario tienen efecto directo sobre la temperatura del caldo, ya que sus efectos intervienen en la combustión y la fusión del material.
6. La falta de elementos como el orificio de escoriado, un mal estado de refractario y el material, inciden sobre la presencia de escoria y contaminantes sólidos ya que al momento del vaciar, estos salen junto con el caldo.

7. El mal dimensionamiento y una errónea capacidad de producción afectan directamente al índice de precalentamiento. Un correcto índice de precalentamiento favorece a la fusión del material, ya que las cargas ingresan a la zona de fusión a una temperatura adecuada y se facilita su fusión. Un incorrecto precalentamiento de cargas, disminuye la eficiencia del proceso y afecta los costos de producción, además de generar defectos sobre las piezas, debido a la baja temperatura del caldo.
8. De los hornos de cubilote estudiados, sólo el 33% cumple con un índice de precalentamiento correcto mientras que el 67% no logran cumplir con un índice de precalentamiento adecuado, esto explicaría porque aparecen defectos relacionados a la baja temperatura del caldo en las piezas.
9. Los defectos encontrados pertenecen a la clasificación B, D, E y G. Los defectos de tipo B, que involucran sopladuras y picaduras, están presentes en el 43% de las piezas; los del tipo G, que involucran defectos por inclusiones en la superficie, están presentes en el 29% de las piezas; los del tipo D que son defectos que se originan en la superficie, en el 14% y los del tipo E, que es una fundición rota, representan el 7%. El 7% restante representa a las piezas analizadas sin defectos originados por el horno de cubilote.
10. Los defectos del tipo B, son originados por la temperatura del caldo y grado de oxidación al igual que los defectos D y E, mientras que este último presenta cuando el grado de oxidación del caldo es muy alto. Los defectos del tipo G son originados por la ausencia del orificio de escoriado, tipo de material refractario y la estabilidad estructural del mismo.
11. Otro motivo de aparición de defectos con respecto a la temperatura baja del caldo es la falta de control de temperatura del caldo. Es necesario tener un control de esta para poder trabajar y evitar defectos en las piezas obtenidas.
12. Aunque los defectos de este tipo son fáciles de remover por mecanizado, esto supone un mayor gasto ya que se necesita garantizar una mayor cantidad de material y por ende, esto significa una pérdida en la economía del taller.
13. El combustible sólido más adecuado para fabricar fundiciones grises en horno cubilote es el coque, principalmente por su bajo contenido en azufre. En lugar de coque, los talleres utilizan hulla o antracita, cuyo contenido es muy elevado en comparación con el coque (1.74% y 1.91% de azufre en las dos muestras analizadas, frente a contenidos menores de 0.8% en coques de calidad), lo cual hace que el porcentaje de este elemento en la composición final de las piezas fundidas sea muy elevado, causando defectos que reducen las propiedades mecánicas de las piezas.
14. En las muestras de fundición gris, el contenido de azufre en el 64.29% de los casos, excede el límite permisible de 0.12%S, mientras que el 35.71% de las muestras cumple con el límite. El contenido extra de azufre en las piezas obtenidas, da paso a

una mayor presencia de sulfuros de hierro que ocasionan propiedades negativas en las piezas.

15. En las muestras de fundición gris, el manganeso cumple con neutralizar el porcentaje de azufre en el 28.57% de los casos. El contenido extra de azufre en las piezas obtenidas, ya no podrá ser neutralizado sólo por el contenido de manganeso presente en la materia prima metálica utilizada. Por esta razón, se hace necesario el uso de ferroaleaciones para equilibrar el manganeso y que exista la cantidad necesaria para contrarrestar el azufre.
16. Falta de aplicación de métodos de desulfuración y uso de ferroaleaciones para ajustar la composición química. En algunos casos se debe a la falta de conocimiento y/o dominio del procedimiento y, en otros casos, porque las características de sus procesos y el aumento de los costos impiden su realización.

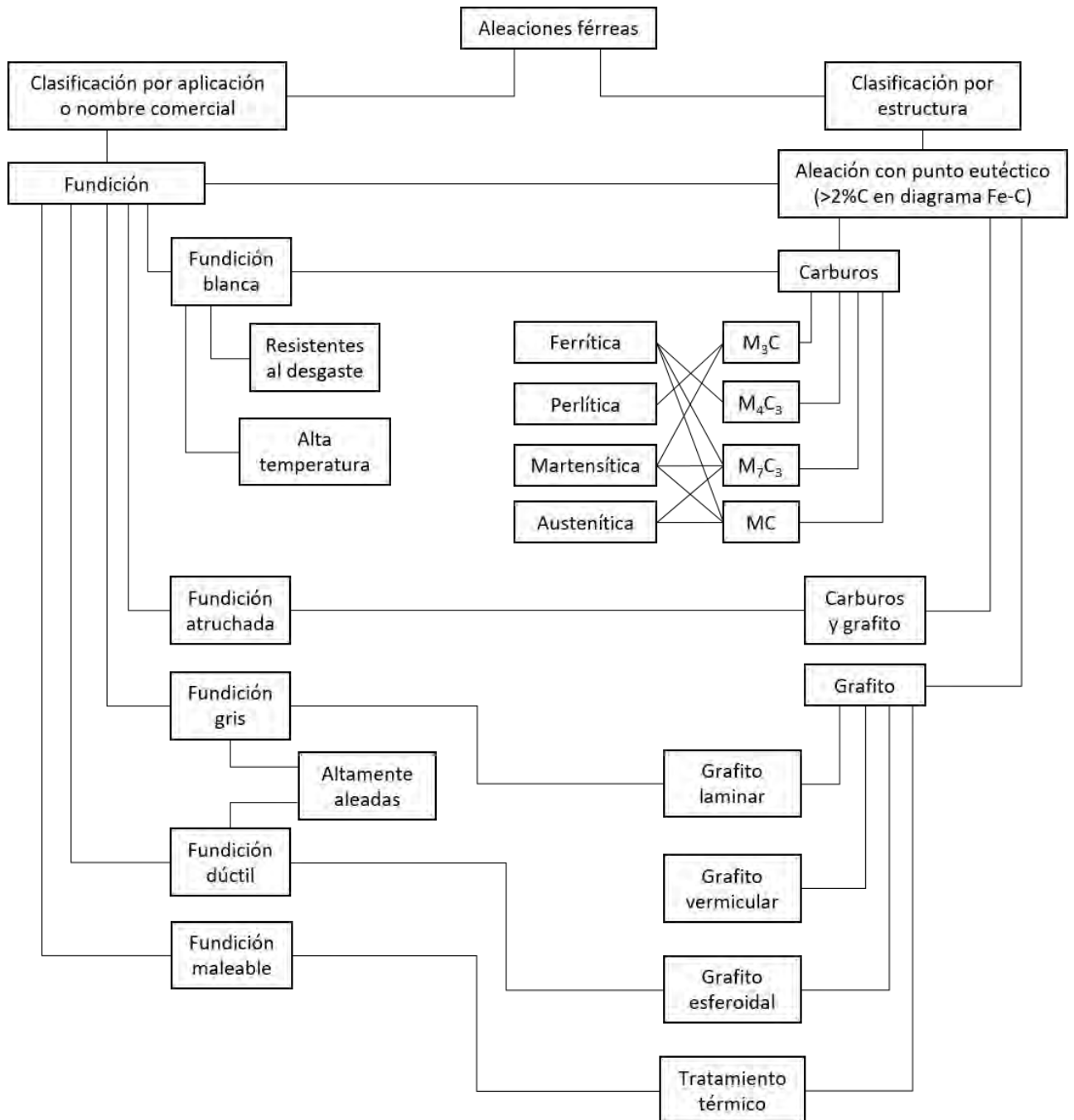
Bibliografía

1. ASM International, «ASM Handbook» de ASM Handbook Volume 15 Castings, vol. 15, EE.UU., ASM Publications, 1992.
2. American Foundrymen's Society, «El Horno de Cubilote y su Operación», México: Continental S.A., 1985.
3. A. A. Baquero, «Diseño, Operación y Control de Cubilote», Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones UIS, 2000.
4. S. Katz y S. K. Associates, «Slag's Effects on Cast Iron Productions», AFS Transactions, p. 13, 2004.
5. M. Maja, «Note di termodinamica e cinetica chimica», Libreria Editrice Universitaria Levrotto Bella, 1979.
6. L. F. Verdeja González, Siderurgia. 5º Año E.T.S.I.M.O, Oviedo: Universidad de Oviedo, 1991.
7. U. d. C. Departamento de Geología, «Sulphur in Coal,» vol. VI, nº 3, 1940.
8. P. A. Pérez Espita, Medellín, Antioquía: Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquía, 2007.
9. J. C. Medina López, J. H. Taco Tercera y F. Oviedo, Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, 2009.

10. R. E. Aristizábal Sierra, «Simulación del proceso de fusión y obtención de los diagramas de red para el horno de cubilote de la Universidad de Antioquía,» Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía N° 37, pp. 176-187, 2006.
11. R. Aristizábal Sierra, H. Mejía, C. Silva y D. A. Pineda, «Modelo de matemático para los fenómenos de combustión en un horno de cubilote,» Facultad de Ingeniería de Universidad de Antioquía N°36, pp. 70-84, 2006.
12. R. E. Aristizábal, P. A. Pérez, S. Katz y M. E. Bauer, «Studies of a Quenched Cupola,» International Journal of Metalcasting, vol. 8, n° 3, p. 10, 2014.
13. Universidad Industrial de Santander, «Desulfuración,» Bucaramanga, Colombia, 2013.
14. E. Fraś y M. Górný, «Mechanism of free sulfur influence on the eutectic cell count and transition from graphite to cementite eutectic in cast iron. Part I. Theoretical background.,» Archives of Foundry Engineering, vol. 10, n° 9/1, pp. 53-56, 2010.
15. E. Fraś y M. Górný, «Mechanism of free sulfur influence on the eutectic cell count and transition from graphite to cementite eutectic in cast iron. Part II. Experimental verification.,» Archives of Foundry Engineering, vol. 10, n° 10/1, pp. 57-62, 2010.
16. P. Andrea, «Evaluación Experimental de los perfiles de composición química del metal en un horno de cubilote y comparación con algunos modelos matemáticos», pp. 1-121, 2007.
17. R. Luis, «Hornos e Instalaciones. Memorias de la conferencia para el Sector de Fundición», pp. 1-22, 1993.
18. C. Mario, «Software educativo para el apoyo de la enseñanza del libro “Diseño, Control y Operación del Horno de Cubilote”», pp. 1-14, 2004.
19. C. Silvia, A. Ariel, «Diseño estructural y dimensionamiento de los diferentes elementos del cubilote de la empresa IDEA (Giron-Santander)», 2011.
20. Pero-Sanz Elorz, José Antonio, «Materiales para ingeniería. FUNDICIONES FERREAS». Ed. Dossat, Madrid, España, 1994.
21. American Foundrymen's Society, «Casting Defect Handbook», USA: Molding Methods and Materials Groups, Special Publications. 1997.
22. R. Guerrero Aslla, «Diagnóstico del sector fundición en el norte del Perú», Piura: Universidad de Piura, 2018.

Anexos

Anexo A: Clasificación de fundiciones férrreas.



Fuente: ASM Handbook, Castings Vol 15. ASM Publications (1982).

Anexo B: ASTM A-48

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: A48/A48M – 03 (Reapproved 2016)

Standard Specification for Gray Iron Castings¹

This standard is issued under the fixed designation A48/A48M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense. This specification replaces Federal Specification QQ-I-652.

1. Scope

1.1 This specification covers gray iron castings intended for general engineering use where tensile strength is a major consideration. Castings are classified on the basis of the tensile strength of the iron in separately cast test bars.

1.1.1 This specification subordinates chemical composition to tensile strength.

1.2 Castings produced to this specification are graded on the basis of minimum tensile strength obtained in special test coupons designed to standardize cooling rate. The tensile strength developed in certain casting sections may vary from test coupon values (see XI.2).

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
A644 Terminology Relating to Iron Castings
E8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- 2.2 *Military Standard:*
MIL-STD-129 Marking for Shipment and Storage²
- 2.3 *Federal Standard:*
Federal Standard No. 123 Marking for Shipment (Civil Agencies)²

3. Terminology

3.1 Definitions:

¹This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee A04 on Iron Castings and is the direct responsibility of Subcommittee A04.01 on Grey and White Iron Castings.

Current edition approved Nov. 1, 2016. Published November 2016. Originally approved in 1905. Last previous edition approved in 2012 as A48/A48M – 03 (2012). DOI: 10.1520/A0048_A0048M-03R16.

²Available from Standardization Documents Order Desk, DODSSDP, Bldg. 4, Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111-5098, <http://www.dodssp.daps.mil>.

3.1.1 Definitions for many terms common to gray iron castings are found in Terminology A644.

4. Classification

4.1 Castings ordered and produced in accordance with this specification are classified into a number of grades based on the properties of separately cast test bars (Tables 1 and 2). Each class is designated by a number followed by a letter. The number indicates the minimum tensile strength of the separately cast test bar, and the letter indicates the size of the test bar. Examples of proper designations are as follows:

- Gray Iron Castings, ASTM Specification A48, Class 30B.
- Gray Iron Castings, ASTM Specification A48, Class 40C.

5. Ordering Information

5.1 Orders for material to this specification shall include the following information:

- 5.1.1 ASTM designation number and year of issue,
- 5.1.2 Class of iron required (see 4.1, and Tables 1 and 2),
- 5.1.3 The size of the separately cast test bar (letter classification—A, B, C, or S) that best represents the thickness of the controlling section of the casting (see Table 3),
- 5.1.4 The tension test specimen (B or C) to be machined from test bar C (see 13.3, Table 4, and Fig. 1),
- 5.1.5 The tension test specimen to be machined from test bar S (see 13.4, Table 4, and Fig. 1),
- 5.1.6 Lot size (see Section 10),
- 5.1.7 Special requirements (see Section 6),
- 5.1.8 Saving tested specimens or unbroken test bars (see 15.1), and
- 5.1.9 Special preparation for delivery (see Section 19).

6. Special Requirements

6.1 When agreed upon in writing between the manufacturer and the purchaser, it may be necessary for the castings to meet special requirements as to hardness, chemical composition, microstructure, pressure tightness, radiographic soundness, dimensions, surface finish, and so forth.

7. Tensile Requirements

7.1 Test bars representing castings conforming to this specification shall meet the requirements for tensile strength as described in Tables 1 and 2.


A48/A48M – 03 (2016)
TABLE 1 Requirements for Tensile Strength of Gray Cast Irons in Separately Cast Test Bars (Inch-Pound)

Class	Tensile Strength, min, ksi	Nominal Test Bar Diameter, in.
No. 20 A	20	0.8
No. 20 B		1.2
No. 20 C		2.0
No. 20 S		Bars S ^A
No. 25 A	25	0.88
No. 25 B		1.2
No. 25 C		2.0
No. 25 S		Bars S ^A
No. 30 A	30	0.88
No. 30 B		1.2
No. 30 C		2.0
No. 30 S		Bars S ^A
No. 35 A	35	0.88
No. 35 B		1.2
No. 35 C		2.0
No. 35 S		Bars S ^A
No. 40 A	40	0.88
No. 40 B		1.2
No. 40 C		2.0
No. 40 S		Bars S ^A
No. 45 A	45	0.88
No. 45 B		1.2
No. 45 C		2.0
No. 45 S		Bars S ^A
No. 50 A	50	0.88
No. 50 B		1.2
No. 50 C		2.0
No. 50 S		Bars S ^A
No. 55 A	55	0.88
No. 55 B		1.2
No. 55 C		2.0
No. 55 S		Bars S ^A
No. 60 A	60	0.88
No. 60 B		1.2
No. 60 C		2.0
No. 60 S		Bars S ^A

^A All dimensions of test bar S shall be as agreed upon between the manufacturer and the purchaser.

8. Dimensional Requirements

8.1 The castings shall conform to the dimensions or drawings furnished by the purchaser, or, if there are no drawings, to the dimensions predicted by the pattern equipment supplied by the purchaser.

9. Workmanship and Finish

9.1 The surface of the casting shall be free of adhering sand, scale, cracks, and hot tears, as determined by visual examination.

9.2 No repairing by plugging or welding of any kind shall be permitted unless written permission is granted by the purchaser.

10. Sampling

10.1 A lot shall consist of one of the following:

TABLE 2 Requirements for Tensile Strength of Gray Cast Irons in Separately Cast Test Bars (Metric)

Class	Tensile Strength, min, ksi [MPa]	Nominal Test Bar Diameter, in. [mm]
No. 150A	150	20 to 22
No. 150B		30
No. 150C		50
No. 150S		Bars S ^A
No. 175A	175	20 to 22
No. 175B		30
No. 175C		50
No. 175S		Bars S ^A
No. 200A	200	20 to 22
No. 200B		30
No. 200C		50
No. 200S		Bars S ^A
No. 225A	225	20 to 22
No. 225B		30
No. 225C		50
No. 225S		Bars S ^A
No. 250A	250	20 to 22
No. 250B		30
No. 250C		50
No. 250S		Bars S ^A
No. 275A	275	20 to 22
No. 275B		30
No. 275C		50
No. 275S		Bars S ^A
No. 300A	300	20 to 22
No. 300B		30
No. 300C		50
No. 300S		Bars S ^A
No. 325A	325	20 to 22
No. 325B		30
No. 325C		50
No. 325S		Bars S ^A
No. 350A	350	20 to 22
No. 350B		30
No. 350C		50
No. 350S		Bars S ^A
No. 375A	375	20 to 22
No. 375B		30
No. 375C		50
No. 375S		Bars S ^A
No. 400A	400	20 to 22
No. 400B		30
No. 400C		50
No. 400S		Bars S ^A

^A All dimensions of test bar S shall be as agreed upon between the manufacturer and the purchaser.

10.1.1 All the metal poured from a single heating in a batch type melting furnace.

10.1.2 All the metal from two or more batch type melting furnaces poured into a single ladle or a single casting.

10.1.3 All the metal poured from a continuous melting furnace for a given period of time between changes in charge, processing conditions, or aim-for chemistry or 4 h, whichever is the shorter period.

10.1.3.1 The purchaser may agree to extend the 4-h time period to 8 h if the manufacturer can demonstrate sufficient process control to warrant such an extension.



A48/A48M – 03 (2016)

TABLE 3 Separately Cast Test Bars for Use When a Specific Correlation Has Not Been Established Between the Test Bar and the Casting

Thickness of the Wall of the Controlling Section of the Casting, in. [mm]	Test Bar
Under 0.25 [under 5]	S
0.25 to 0.50 [5 to 14]	A
0.51 to 1.00 [15 to 25]	B
1.01 to 2 [26 to 50]	C
Over 2 [over 50]	S

11. Cast Test Bars

11.1 Test bars shall be separate castings poured from the same lot as the castings they represent and shall have dimensions as shown in Table 4. Allowance may be made for reasonable pattern draft within the tolerances shown in Table 4. Test bars A, B, and C are all standard test bars in the form of simple cylinders. Test bar S is special and is intended for use where the standard bars are not satisfactory.

11.2 The test bars shall be cast in dried, baked, or chemically bonded molds made mainly of an aggregate of siliceous sand with appropriate binders. The average grain size of the sand shall approximate that of the sand in which the castings are poured. Molds for the test bars shall be approximately at room temperature when poured. More than one test bar may be cast in a single mold, but each bar in the mold shall be surrounded by a thickness of sand which is not less than the diameter of the bar. A suitable design for a mold is shown in Fig. 2.

NOTE 1—The intent of these provisions is as follows: to prohibit the casting of test bars in molds of metal, graphite, zircon, light-weight aggregates, or other materials which would significantly affect the tensile strength of the iron; to prohibit control of tensile strength of the test bars by manipulation of the grain size of the sand; and to prohibit the casting of test bars in molds preheated substantially above room temperature.

11.3 Test bars that are intended to represent castings that are cooled in the mold to less than 900°F [480°C], before shakeout, shall be cooled in their molds to a temperature less than 900°F [480°C]. They then may be cooled in still air to room temperature.

11.4 Test bars that are intended to represent castings that are hotter than 900°F [480°C], when shaken out of their molds, shall be cooled as described in 11.3 or (by agreement between the manufacturer and the purchaser) may be shaken out of their molds at approximately the same temperature as the castings they represent.

11.5 When castings are stress-relieved, annealed, or otherwise heat-treated, test bars shall receive the same thermal treatment and shall be treated adjacent to the castings they represent.

12. Number of Tests and Retests

12.1 The tension test shall be conducted in accordance with Test Method E8.

12.2 One tension test shall be performed on each lot and shall conform to the tensile requirements specified.

12.3 If the results of a valid test fail to conform to the requirements of this specification, two retests shall be made. If either retest fails to meet the specification requirements, the castings represented by these test specimens shall be rejected. A valid test is one wherein the specimen has been properly prepared and appears to be sound and on which the approved test procedure has been followed.

12.4 If sufficient separately cast test pieces are not available, the manufacturer shall have the option of removing a test specimen from a location of representative casting, as agreed upon between the manufacturer and purchaser.

12.5 If the first test results indicate that a heat treatment is needed to meet the test requirements, the entire lot of castings and the representative test specimens shall be heat treated together. Testing shall proceed in accordance with 12.1 – 12.3.

12.6 If, after testing, a test specimen shows evidence of a defect, the results of the test may be invalidated and another made on a specimen from the same lot.

13. Tension Test Specimens

13.1 For test Bar A, the tension-test specimen A, as shown in Fig. 1, shall be machined concentric with the axis of the test bar.

13.2 For test Bar B, the tension test specimen B, as shown in Fig. 1, shall be machined concentric with the axis of the test bar.

13.3 For test Bar C, tension test specimens B or C, as shown in Fig. 1, shall be machined concentric with the axis of the test bar. Unless the size of the tension test specimen to be machined from test bar C is specified in writing by the purchaser, the decision whether to use tension test specimen B or C shall be made by the manufacturer of the castings.

13.4 For test bar S, the nature and dimensions of the tension test specimen shall be determined by agreement between the manufacturer and purchaser.

14. Tension Test

14.1 Tension test specimens shall fit the holders of the testing machine in such a way that the load shall be axial.

14.2 The elapsed time from the beginning of loading in the tension test to the instant of fracture shall be not less than 15 s for test specimen A and not less than 20 s for specimens B and C.

15. Inspection

15.1 Unless otherwise specified in the contract or purchase order, the manufacturer shall be responsible for carrying out all the tests and inspections required by this specification, using his own or other reliable facilities, and he shall maintain complete records of all such tests and inspections. Such records shall be available for review by the purchaser.

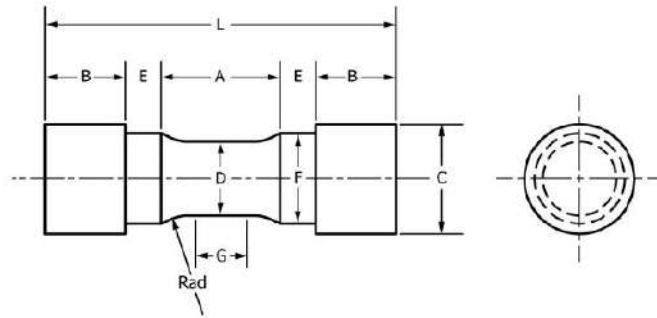
15.1.1 When agreed upon between the manufacturer and purchaser, tested specimens or unbroken test bars from the same lot shall be saved for a period of three months after the date of the test report.

ASTM A48/A48M – 03 (2016)

TABLE 4 Diameters and Lengths of Cast Test Bars

Test Bar	As-Cast Diameter, in. [mm]			Length, in. [mm]	
	Nominal (Mid-Length)	Minimum (Bottom)	Maximum (Top)	Minimum (Specified)	Maximum (Recommended)
A	0.88 [22.4]	0.85 [21.6]	0.96 [24.4]	5.0 [125]	6.0 [150]
B	1.20 [30.5]	1.14 [29.0]	1.32 [33.5]	6.0 [150]	9.0 [230]
C	2.00 [50.8]	1.90 [48.3]	2.10 [53.3]	7.0 [175]	10.0 [255]
S ^A

^A All dimensions of test bar S shall be as agreed upon by the manufacturer and the purchaser.



Dimensions, in. [mm]	Tension Test Specimen A	Tension Test Specimen B	Tension Test Specimen C
G—Length of parallel, min	0.50 [13]	0.75 [19]	1.25 [32]
D—Diameter	0.500 ± 0.010 [13 ± 0.25]	0.750 ± 0.015 [20 ± 0.4]	1.25 ± 0.025 [30 ± 0.6]
R—Radius of fillet, min	1 [25]	1 [25]	2 [50]
A—Length of reduced section, min	1¼ [32]	1½ [38]	2¼ [57]
L—Over-all length, min	3¼ [95]	4 [100]	6¾ [160]
C—Diameter of end section, approx	¾ [20]	1¼ [20]	1¾ [47]
E—Length of shoulder, min	¼ [6]	¼ [6]	5/16 [8]
F—Diameter of shoulder	5/8 ± 1/64	13/16 ± 1/64	1 1/16 ± 1/64
B—Length of end section	[16 ± 0.4]	[24 ± 0.4]	[36 ± 0.4]

^A Optional to fit holders on testing machine. If threaded, root diameter shall not be less than dimension F.

FIG. 1 Tension-Test Specimens

15.2 The purchaser reserves the right to perform any of the inspections set forth in the specification where such inspections are deemed necessary to ensure that supplies and services conform to the prescribed requirements.

16. Rejection and Resubmission

16.1 Any castings or lot of castings failing to comply with the requirements of this specification may, where possible, be reprocessed, retested, and reinspected. If the tests and inspections on the reprocessed casting(s) show compliance with this specification, the castings shall be acceptable; if they do not, they shall be rejected.


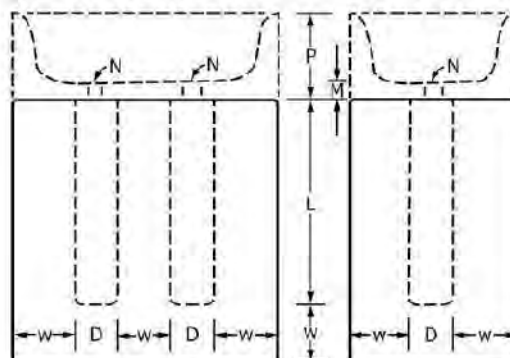
16.2 If the purchaser should find that a casting or lot of castings fails to comply with this specification subsequent to receipt at his facility, he shall so notify the manufacturer

promptly and in no case later than six weeks after receipt of the shipment, stating clearly the basis for rejection.

17. Certification

17.1 When specified by the purchaser's order or contract, a manufacturer's certification or compliance statement that the casting or lot of castings was made, sampled, tested, and inspected in accordance with this specification, including a report of test results shall be furnished at the time of shipment, and such certification or compliance statement shall be the basis for acceptance of the casting or lot of castings.

17.2 A signature is not required on the certification or test report. However, the document shall clearly identify the organization submitting the certification and the authorized agent of the manufacturer who certified the test results.


A48/A48M - 03 (2016)
**Required Features:**

1. Material—Aggregate of dry siliceous sand.
2. Position—Bars vertical.
3. L —See Table 4.
4. D —See Table 4.
5. W —Not less than diameter D .

Optional Features:

1. Number of test bars in a single mold—Two suggested.
2. Design of pouring cup.
3. P —2 in. [50 mm], suggested.
4. N — $\frac{3}{16}$ in. [8 mm] in diameter, suggested.
5. M —1.5 N , suggested.

FIG. 2 Suitable Design and Dimensions for Mold for Separately Cast Cylindrical Test Bars for Gray Iron

Notwithstanding the absence of a signature, the organization submitting the certification is responsible for its content.

18. Product Marking

18.1 When the size of the casting permits, each casting shall bear the identifying mark of the manufacturer and the part or pattern number at a location shown on the covering drawing or, if not shown on the drawing, at a location at the discretion of the producer.

19. Preparation for Delivery

19.1 Unless otherwise stated in the contract or order, the cleaning, preservation and packing of castings for shipment

shall be in accordance with the manufacturer's commercial practice. Packaging and marking shall also be adequate to identify the contents and to ensure acceptance and safe delivery by the carrier for the mode of transportation employed.

19.2 *U.S. Government Procurement*—When specified in the contract or purchase order, marking for shipment shall be in accordance with the requirements of Fed. Std. No. 123 for civil agencies and MIL-STD-129 for military activities.

20. Keywords

- 20.1 gray iron castings


APPENDIX**(Nonmandatory Information)****XI. MECHANICAL PROPERTIES OF CASTINGS**

X1.1 The mechanical properties of iron castings are influenced by the cooling rate during and after solidification, by chemical composition (particularly carbon equivalent), by the design of the casting, by the design and nature of the mold, by the location and effectiveness of gates and risers, and by certain other factors.

X1.2 The cooling rate in the mold and, hence, the properties developed in any particular section are influenced by the presence of cores; chills and chaplets; changes in section thickness; and the existence of bosses, projections, and intersections, such as junctions of ribs and bosses. Because of

the complexity of the interactions of these factors, no precise quantitative relationship can be stated between the properties of the iron in various locations of the same casting or between the properties of a casting and those of a test specimen cast from the same iron. When such a relationship is important and must be known for a specification application, it may be determined by appropriate experimentation.

X1.3 Gray iron castings in Classes 20, 25, 30 and 35 are characterized by excellent machinability, high damping capacity, low modulus of elasticity, and comparative ease of manufacture.


A48/A48M – 03 (2016)

X1.3.1 Castings in Classes 40, 45, 50, 55, and 60 are usually more difficult to machine, have lower damping capacity and a higher modulus of elasticity, and are more difficult to manufacture.

X1.4 When reliable information is unavailable on the relationship between properties in a casting and those in a separately cast test specimen, and where experimentation would be unfeasible, the size of the test casting should be so

selected as to approximate the thickness of the main or controlling section of the casting.

X1.5 If iron castings are welded (see 9.2), the microstructure of the iron is usually altered, particularly in the vicinity of the weldment. Therefore, the properties of the casting may be adversely affected by welding. Where practical, appropriate post-weld heat treatment may reduce this effect of welding.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

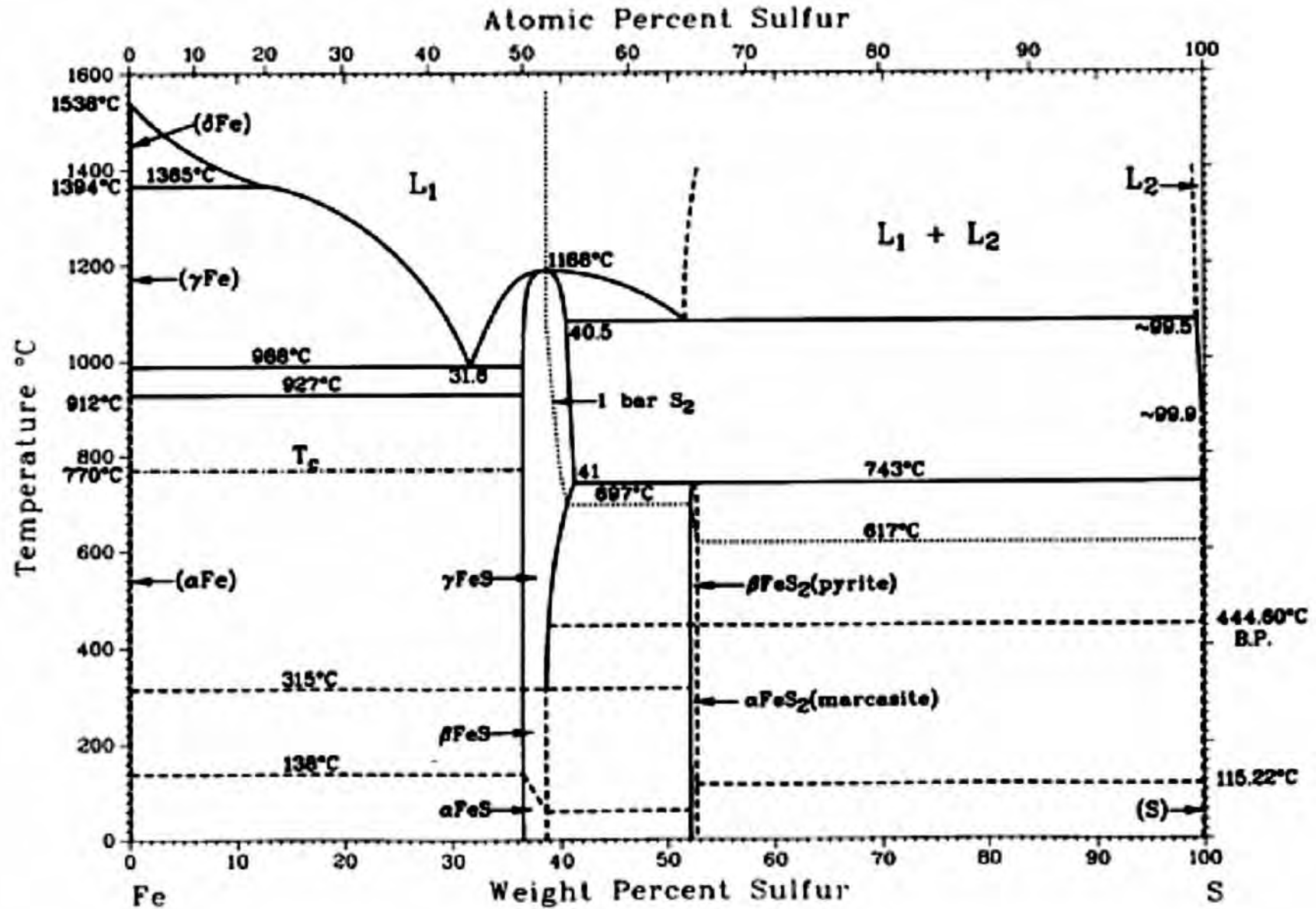
This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>.

Anexo C: Propiedades mecánicas de las fundiciones grises

Clase ASTM	Resistencia a la tracción		Resistencia a la torsión	Resistencia a la compresión	Dureza	Módulo de tracción	Módulo de compresión
	ksi	MPa	MPa	MPa	HB	GPa	GPa
20	22.0	152	179	572	156	66 – 97	27 – 39
25	26.0	179	220	669	174	79 – 102	32 – 41
30	31.0	214	276	752	210	90 – 113	36 – 45
35	36.5	252	334	855	212	100 – 119	40 – 48
40	42.5	393	393	965	235	110 – 138	44 – 54
50	52.5	362	503	1130	262	130 – 157	50 – 55
60	55.5	431	610	1293	302	141 – 162	54 – 59

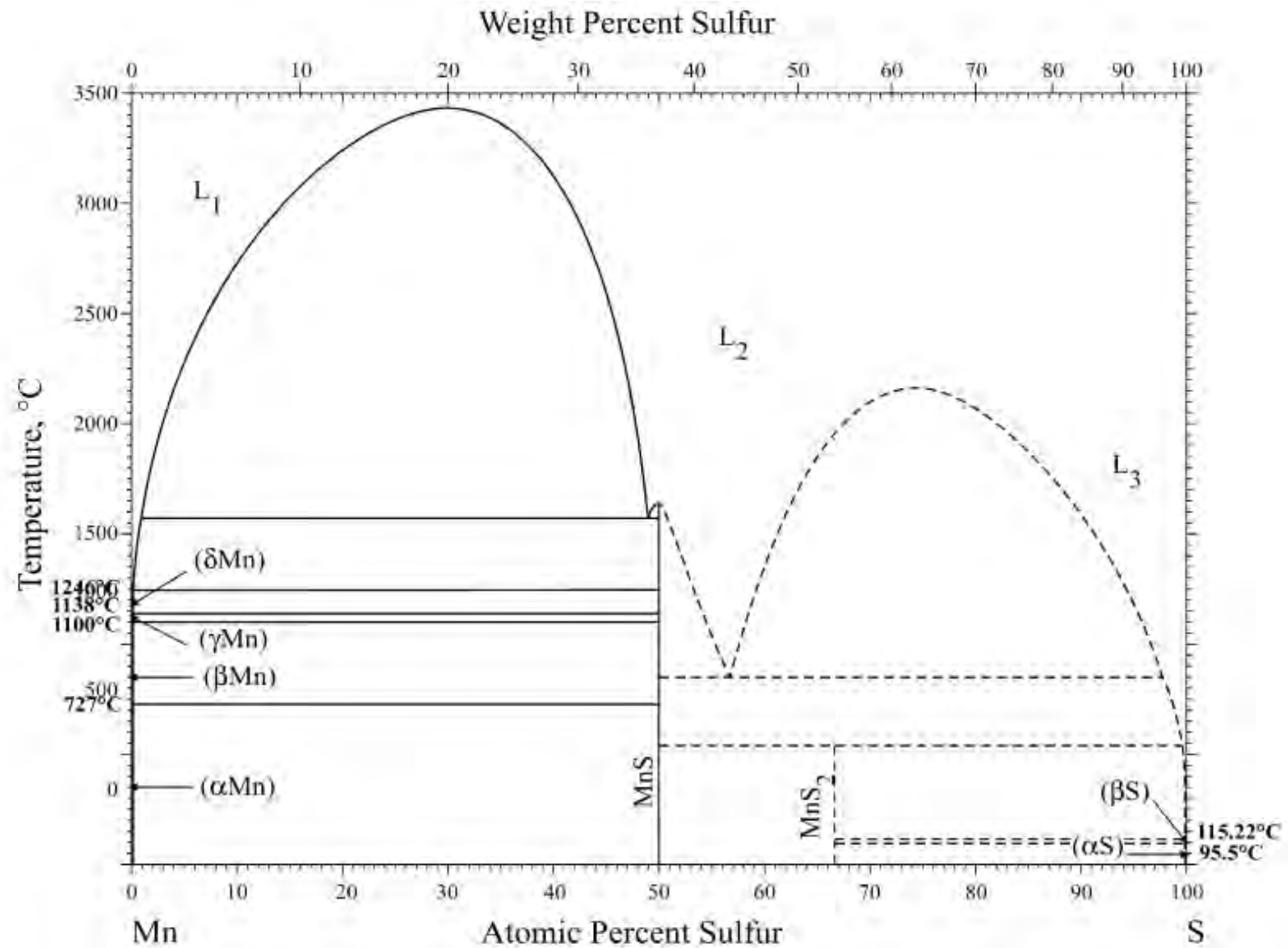
Fuente: Fundiciones férreas. Pero-Sanz Elorz. (1994).

Anexo D: Diagrama Fe-S

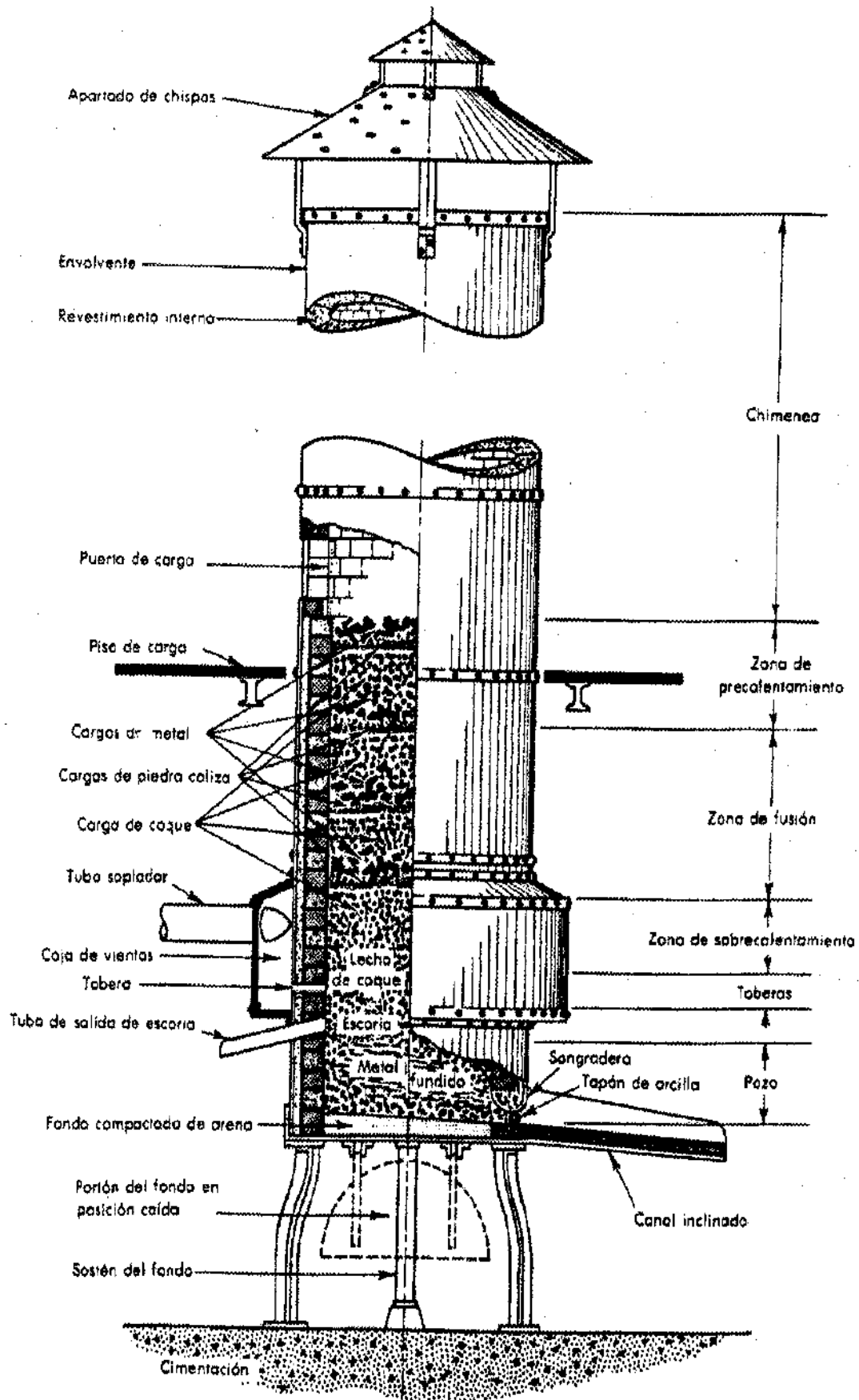


Fuente: ASM Handbook, Castings Vol 15. ASM Publications (1982).

Anexo E: Diagrama Mn-S

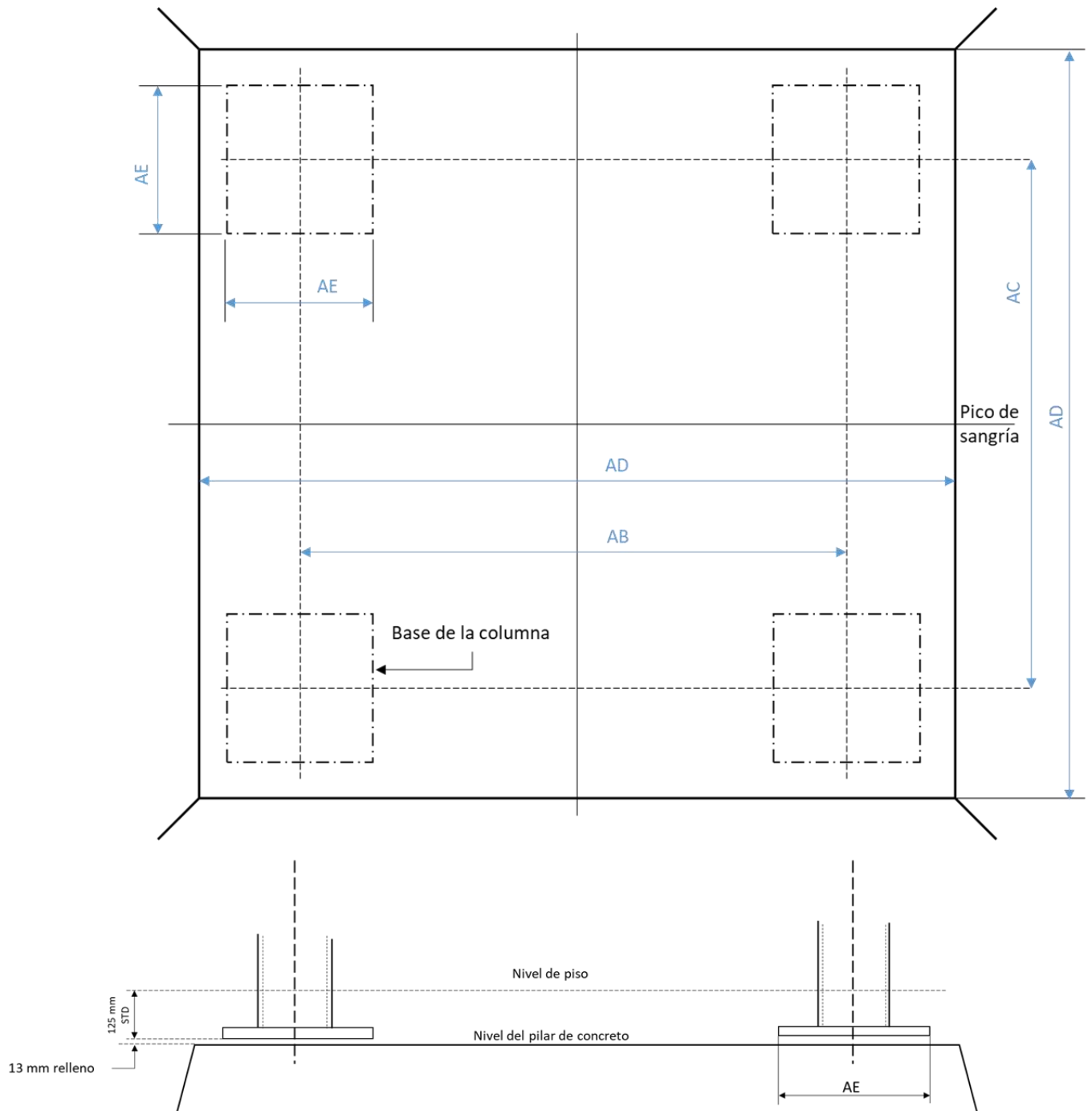


Anexo F: Esquemático completo del horno de cubilote



Fuente: Manual de funcionamiento del horno de cubilote. Argentina (2012).

Anexo G: Cimentaciones para horno de cubilote



Fuente: El horno de cubilote y su operación. American Foundrymen's Society (1982).

Anexo H: Atlas Internacional de 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 mismos.

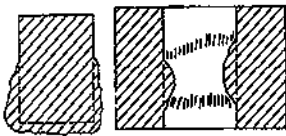
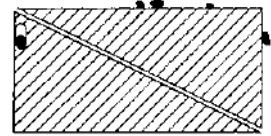
El sistema de clasificación usado está basado en la descripción física del defecto bajo consideración. Se intenta permitir una identificación hecha por observación directa del defecto de fundición o una descripción precisa del defecto implicando solamente el criterio de la apariencia, ubicación y dimensión.

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).




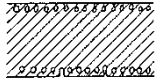


Cada categoría está dividida en grupos y subgrupos los cuales están designados por números. Dentro de cada subgrupo, un tercer número es asignado para especificar cada defecto particular.

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		

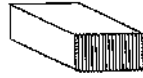
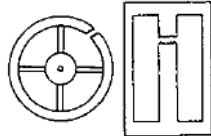
B221

Cavidad de forma irregular.
Pared muchas veces dendrítica

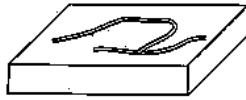
Contracción interna
o tapada



C. Discontinuidad

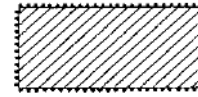
Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
C100	Discontinuidades causadas por efectos del metal (ruptura), que no parece ser resultado de una tensión interna		
C110	Formación normal de grieta		
C111	Apariencia de fractura normal, a veces con marcas idénticas adyacentes	Rompimiento en frío	
C200	Discontinuidades 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 superficie de la fundición es suave	Hendiduras o cicatriz	
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

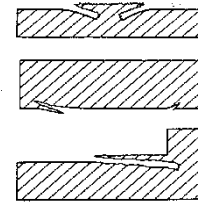
Vitrificación, sinterización



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


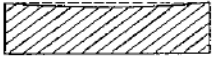
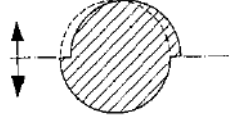
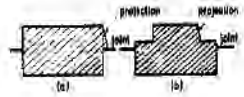
Dartas, dartas en expansión



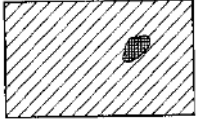
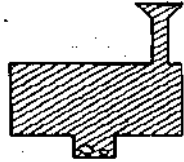
E. Fundición incompleta

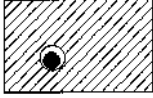

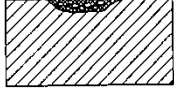

Designación	Descripción	Nombre común	Esquema
E100		Porciones perdidas de fundición (no fractura).	
E110		Variación superficial de la figura de modelo.	
E112	Bordes o contorno deformados debido a la mala reparación del molde o negligencia en la aplicación de pinturas de revestimiento	Revestimiento defectuoso	
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 cercanía 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	

Fuente: American Foundry Society (AFS). 1982.

Anexo I: Especificaciones técnicas de la antracita que venden en Trujillo.

- En el Perú, las grandes empresas importan coque para distribuirlo, por ejemplo de Colombia, donde el coque cuesta aproximadamente S/.4.20 soles el kilogramos.

ANTRACITA BRIQUETEADA								
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA								
DESCRIPCIÓN	Antracita aglomerada en forma de briquetas, fabricado en diferentes calidades y nivelador de carbón, reductor y formador de escoria espumosa.							
APLICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • En hornos de arco eléctrico (HEA) de fabricación de acero. • En hornos metalúrgicos, de cal, entre otros. 							
ANÁLISIS QUÍMICO Y FÍSICO	Cf(%)	Ce(%)	Vo(%)	S(%)	Hu(%)	Tamaño	PC (Kcal/kg)	
	87 Min	5,5 Max	7 Max	0,8 Max	2,0		7500	
	85 Min	7,5 Max	7 Max	0,8 Max	2,0		7300	
	83 Min	9,5 Max	7 Max	0,8 Max	2,0	11/16" = 90%	7100	
	81 Min	11,5 Max	7 Max	1,0 Max	2,0	1" = 90%	6900	
	79 Min	13,5 Max	7 Max	1,0 Max	2,0	1,5" = 90%	6700	
	77 Min	15,5 Max	7 Max	1,0 Max	2,0	2" = 90%	6500	
	75 Min	17,5 Max	7 Max	1,0 Mx	2,0	3" = 90%	6300	
<small>Legenda: Cf: Carbón Fijo; Ce: Cenizas; Vo: Volátiles; S: Azufre; Hu: Humedad; PC: Poder Calorífico.</small>								
EMBALAJE	En Super sacos de 1-1,2 TM							
<small>Observaciones: Los resultados técnicos no deben tomarse como máximo y mínimo para propósitos de especificaciones. Procesamos Antracita Briquetada a la granulometría solicitada.</small>								
								
								
Dirección:	Autopista Salaverry, Km3, Lote B, Sector Chorobal Trujillo - La Libertad - Perú.			Teléfonos de Oficina:	+58 2869941547 +58 2869940635 +51 44 702121		Correos:	director@sesuvecadelperu.com sales@sesuvecadelperu.com comercializacion@sesuvecadelperu.com
Telfs. Móvil:	+51 971447001 / +51 971448055			www.sesuvecadelperu.com				

Fuente: Sesuveca del Perú (2017).

ANTRACITA CLASIFICADA

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

DESCRIPCIÓN	Material carbonífero en base a antracita triturada, molida y clasificada, especialmente en tamaños y en calidades químicas diferentes.					
APLICACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Para espumar las escorias siderúrgicas de Horno de Arco Eléctrico (HEA). • En la fabricación de pellet de hierro. • Para nivelar los puntos de carbón del acero y fundición. • Eliminar parte del oxígeno disuelto en el acero. • Reductor en procesos químicos. • Carbón de carga en siderúrgicas y fundiciones. 					
ANÁLISIS QUÍMICO	Carbón Fijo (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Azufre (%)	Humedad (%)	Poder Calorífico (kcal/kg)
	92 Min	5 Max	3 Max	0,3 Max y 0,7 Max	2 Max	7650 Min
	90 Min	7 Max	3 Max	0,3 Max y 0,7 Max	2 Max	7550 Min
	88 Min	8,5 Max	3,5 Max	0,3 Max y 0,7 Max	2 Max	7450 Min
	86 Min	10,5 Max	3,5 Max	0,8 Max	2 Max y 4 Max	7300 Min
	84 Min	12 Max	4,0 Max	0,8 Max	2 Max y 4 Max	7150 Min
	82 Min	14 Max	4,0 Max	0,8 - 1,0 Max	2 Max y 4 Max	7000 Min
	80 Min	16 Max	4,0 Max	0,8 - 1,0 Max	2 Max y 4 Max	6800 Min
	78 Min	18 Max	4,0 Max	0,8 - 1,0 Max	2 Max y 4 Max	6600 Min
76 Min	20 Max	4,0 Max	0,8 - 1,0 Max	2 Max y 4 Max	6300 Min	
TAMAÑO DE GRANO	1	0-3 mm = 95% Min		7	0-1/2" = 90% Min	
	2	1 mm - 3 mm = 90% Min < 1 mm y > 6 mm = 10% Max		8	0-3/4" = 90% Min	
	3	3 mm - 6 mm = 90% Min < 3 mm y > 6 mm = 10% Max		9	1/4" - 3/4" = 90% Min < 1/4" y > 3/4" = 10% Max	
	4	1 mm - 6 mm = 90% Min < 1 mm y > 6 mm = 10% Max		10	1/2" - 1" = 90% Min < 1/2" y > 1" = 10% Max	
	5	3 mm - 12,5 mm = 90% Min < 3 mm y > 12,5 mm = 10% Max		11	3/4" - 1/2" = 90% Min < 3/4" y > 1/2" = 10% Max	
	6	6 mm - 12,5 mm = 90% Min < 6 mm y > 12,5 mm = 10% Max		12	1" - 3" = 90% Min < 1" y > 3" = 10% Max	
EMBALAJE	A granel y en big-bag de 1,2 TM - 1,5 TM					

Observaciones: Los resultados técnicos no deben tomarse como máximo y mínimo para propósitos de especificaciones. Procesamos Antracita Clasificada a la granulometría solicitada por los clientes.



Dirección: Autopista Salaverry, Km3, Lote B, Sector Chorobal Trujillo - La Libertad - Perú.
Telfs. Móvil: +51 971447001 / +51 971448055

Teléfonos de Oficina: +58 2869941547
+58 2869940635
+51 44 702121

Correos: director@sesuecadelperu.com
sales@sesuecadelperu.com
comercializacion@sesuecadelperu.com

www.sesuecadelperu.com

Fuente: Sesueca del Perú (2017).

Apéndices

Apéndice 1: Micrografías de análisis de sulfuros.**1.1. M3**

- **Estado:** Pulido sin ataque



Figura 89. M3 pulido sin ataque. 500x
Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía se observa la pieza de fundición gris en estado de pulido a una ampliación de 500x. Redondeados de rojo, se observan los sulfuros de manganeso. Los sulfuros de hierro a diferencia de los de manganeso, no se logran observar en estado de pulido. Debido al contenido de manganeso, este cumple con el requerido para poder neutralizar el azufre en forma de sulfuros de manganeso.

- **Estado:** Pulido atacado con Kunkle

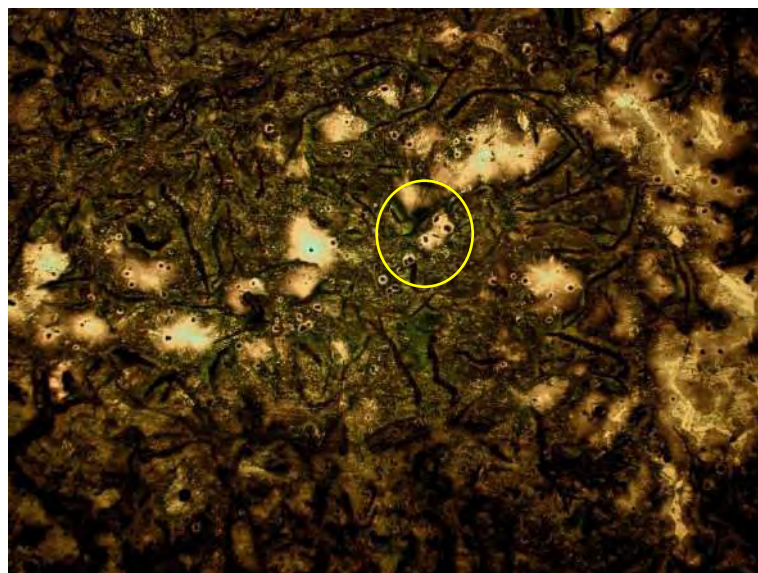


Figura 90. M3 atacado con Kunkle. 200x
Fuente: Elaboración propia.

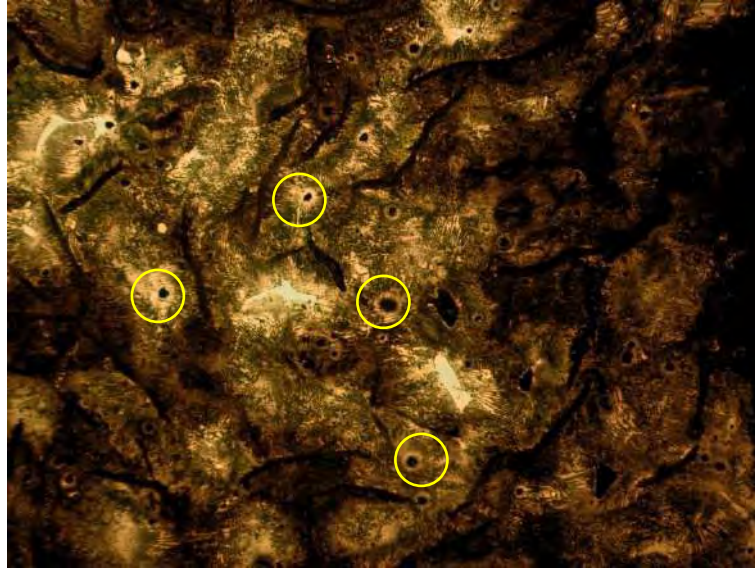


Figura 91. M3 atacado con Kunkele. 500x
Fuente: Elaboración propia.

En las micrografías anteriores se logra observar que el reactivo ha logrado detectar y sobresaltar a los sulfuros. En ambas, encerrados de amarillo, se ven que los sulfuros se ven oscurecidos y rodeados por un halo blanco que resalta.

1.2. M6

- **Estado:** Pulido sin ataque.



Figura 92. M6 pulido sin ataque. 100x
Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía se observa la pieza de fundición gris en estado de pulido a una ampliación de 500x. Redondeados de rojo, se observan los sulfuros de manganeso. Los sulfuros de hierro a diferencia de los de manganeso, no se logran observar en estado de pulido.

Debido al contenido de manganeso, no se cumple con el requerido para poder neutralizar el azufre en forma de sulfuros de manganeso. Por este motivo se observa una cantidad considerable de sulfuros de manganeso. La reducida cantidad de manganeso reaccionará en su totalidad para poder neutralizarlo. El restante se supone, se convertirá en sulfuros de fierros.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de ácido oxálico.



Figura 93. M6 atacado con ácido oxálico. 500x
Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía se ve que los sulfuros se ven de una tonalidad más clara. Los sulfuros son aquellos que están rodeados por una circunferencia roja.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de nitrato de plata.



Figura 94. M6 atacado con nitrato de plata. 200x
Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía anterior ha sido atacada por el reactivo de nitrato de plata. Durante 10 segundos se observa que este logra mostrar parte de la microestructura, se observa perlita cerca de las láminas de grafito (rojo). En cuanto a los sulfuros, a algunos los logra aclarar (amarillo) mientras que otros oscurecen (azul).

- **Estado:** Pulido atacado con reactivo Kunkeler.

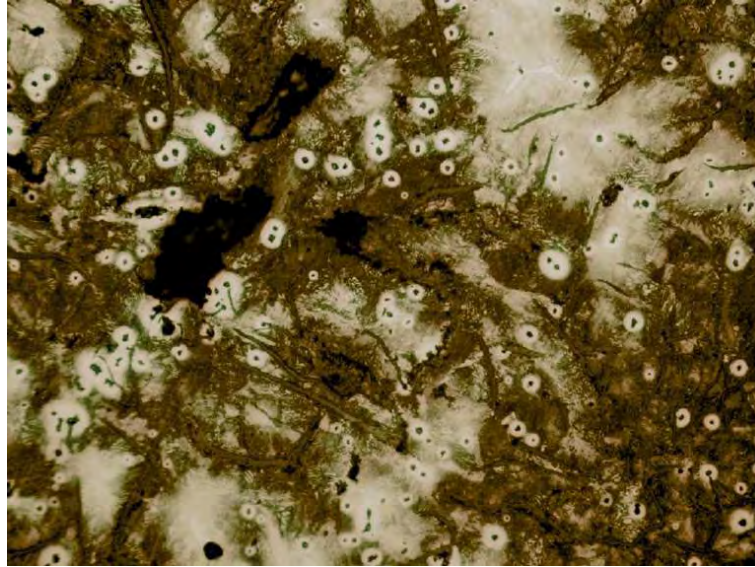


Figura 95. M6 atacado con Kunkeler. 200x

Fuente: Elaboración propia.



Figura 96. M6 atacado con Kunkeler. 500x

Fuente: Elaboración propia.

Debido al alto contenido de azufre, se espera que la cantidad de sulfuros sea mayor. El reactivo Kunkeler muestra que los sulfuros han sido oscurecidos y rodeados por un halo blanco que facilita su detección. A la vez ha sido capaz de pintar la microestructura de la pieza, mostrando perlita, ferrita y esteadita.

1.3. M7

- **Estado:** Pulido sin ataque



Figura 97. M7 pulido sin ataque. 100x

Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía se observa la pieza de fundición gris en estado de pulido a una ampliación de 500x. Redondeados de rojo, se observan los sulfuros de manganeso. Los sulfuros de hierro a diferencia de los de manganeso, no se logran observar en estado de pulido. Debido al contenido de manganeso, no se cumple con el requerido para poder neutralizar el azufre en forma de sulfuros de manganeso. Por este motivo se observa una cantidad considerable de sulfuros de manganeso. La reducida cantidad de manganeso reaccionará en su totalidad para poder neutralizarlo. El restante se supone, se convertirá en sulfuros de fierros.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de ácido oxálico



Figura 98. M7 atacado con ácido oxálico. 500x

Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía anterior, se ve que los sulfuros se ven de una tonalidad más clara. Los sulfuros son aquellos que están rodeados por una circunferencia roja.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de nitrato de plata

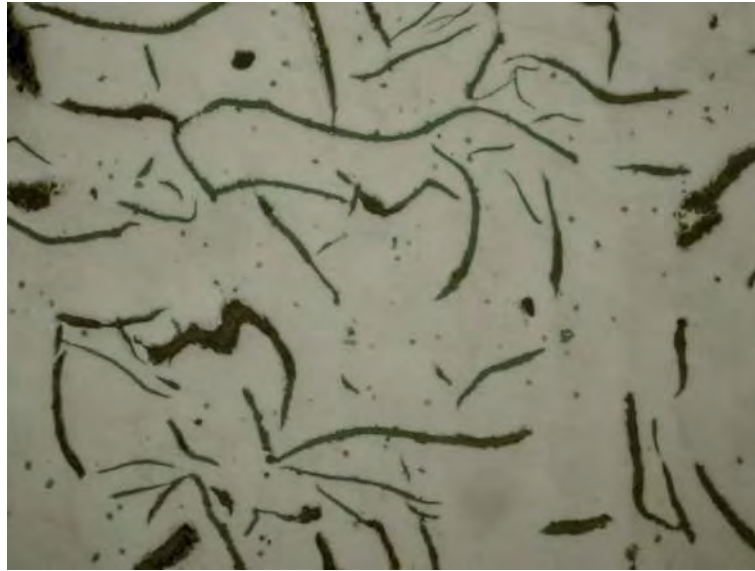


Figura 99. M7 atacado con nitrato de plata. 200x

Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía anterior ha sido atacada por el reactivo de nitrato de plata, durante 10 segundos. Se observa que ha oscurecido parte de la micrografía y algunos sulfuros han logrado aclararse.

- **Estado:** Pulido atacado con reactivo Kunkele.



Figura 100. M7 atacado con Kunkele. 200x
Fuente: Elaboración propia.

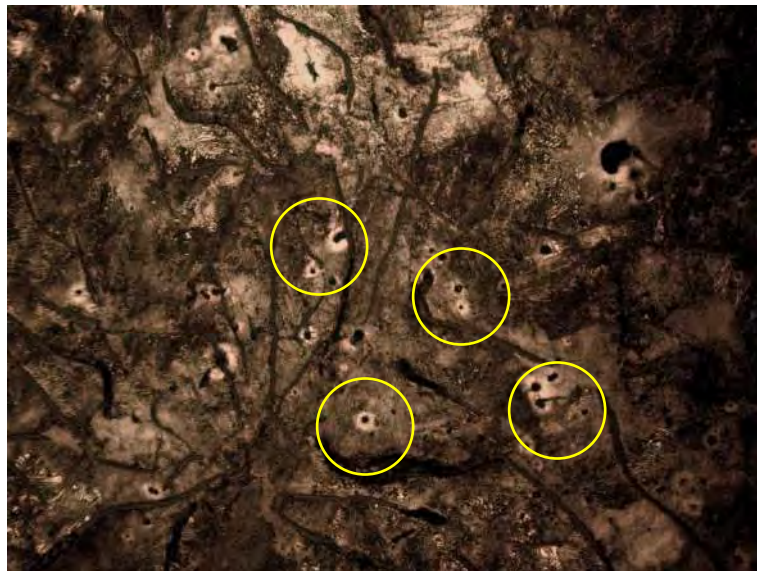


Figura 101. M7 atacado con Kunkele. 500x
Fuente: Elaboración propia.



Figura 102. M7 atacado con Kunkle. 1000x
Fuente: Elaboración propia.

Debido al alto contenido de azufre, se espera que la cantidad de sulfuros sea mayor. El reactivo Kunkle muestra que los sulfuros han sido oscurecidos y rodeados por un halo blanco que facilita su detección. A la vez ha sido capaz de pintar la microestructura de la pieza, mostrando perlita, ferrita y esteadita.

1.4. M9

- **Estado:** Pulido sin ataque



Figura 103. M9 pulido sin ataque. 100x
Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía se observa la pieza de fundición gris en estado de pulido a una ampliación de 500x. Redondeados de rojo, se observan los sulfuros de manganeso. Los sulfuros de hierro a diferencia de los de manganeso, no se logran observar en estado de pulido. Debido al contenido de manganeso, este no cumple con el requerido para poder neutralizar el azufre en forma de sulfuros de manganeso.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de ácido oxálico



Figura 104. M9 atacado con ácido oxálico. 200x

Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía anterior, se ve que los sulfuros se ven de una tonalidad más clara. Los sulfuros son aquellos que están rodeados por una circunferencia roja.

- **Estado:** Pulido atacado con solución acuosa de nitrato de plata

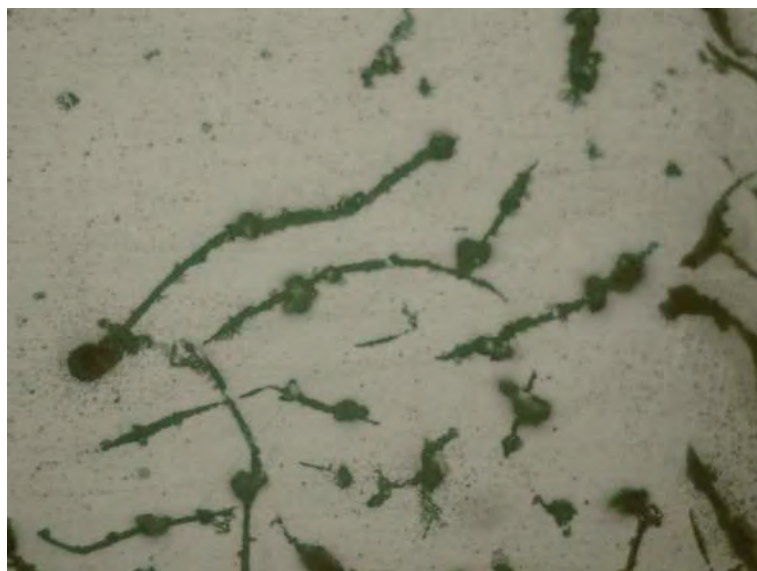


Figura 105. M9 atacado con nitrato de plata. 500x

Fuente: Elaboración propia.

En la micrografía anterior se observa que luego de haber atacado la pieza con nitrato de plata, se ha atacado directamente a las láminas de grafito formando como estructuras que salen de estas, en los bordes.

- **Estado:** Pulido atacado con reactivo Kunkeler

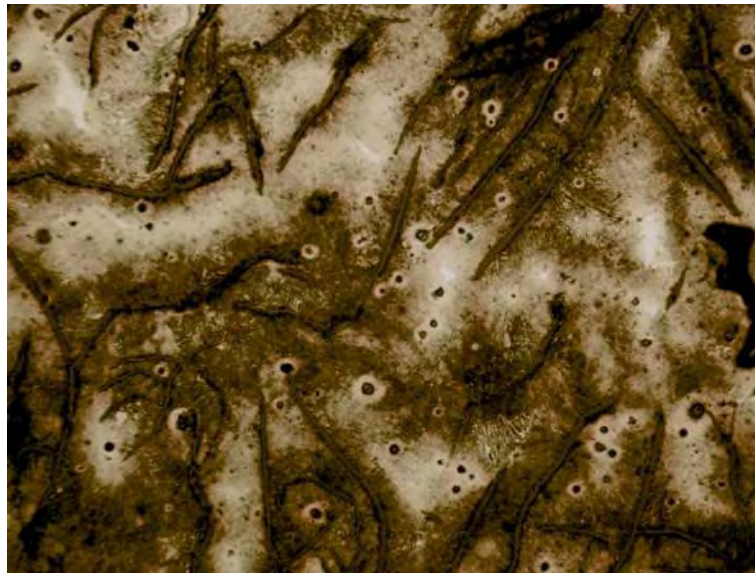


Figura 106. M9 atacado con Kunkeler. 200x

Fuente: Elaboración propia.

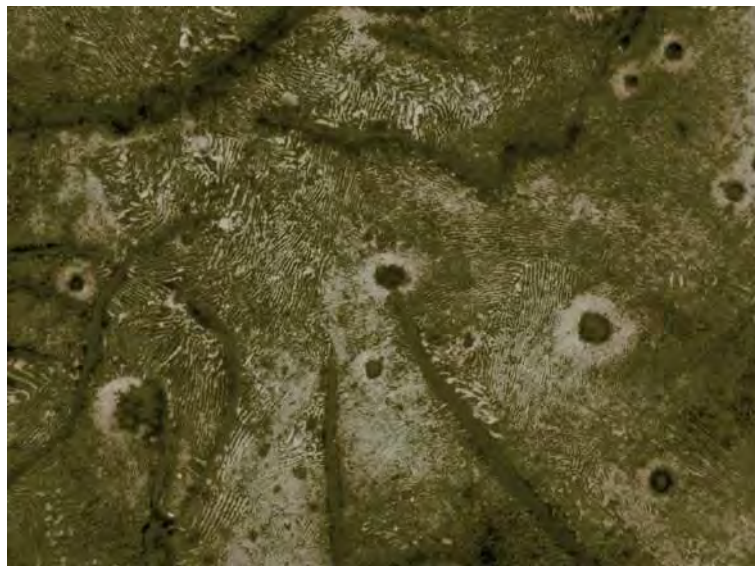


Figura 107. M9 atacado con Kunkeler. 500x

Fuente: Elaboración propia.

Debido al medio contenido de azufre, se espera que la cantidad de sulfuros sea mayor. El reactivo Kunkeler muestra que los sulfuros han sido oscurecidos y rodeados por un halo blanco que facilita su detección. A la vez ha sido capaz de pintar la microestructura de la pieza, mostrando perlita, ferrita y esteadita.

Apéndice 2: Esquemático de un sombrero chino

The technical drawing consists of six views of a Chinese hat:

- Top View (Top Left):** A simple circle representing the top of the hat.
- Front View (Middle Left):** A trapezoidal shape with a pointed top, supported by three vertical posts.
- Side View (Top Right):** A cylindrical shape with a flat top, supported by two vertical posts.
- Back View (Middle Right):** A trapezoidal shape with a pointed top, supported by three vertical posts, similar to the front view.
- Bottom View (Bottom Left):** A circular view showing the base of the hat with four small circular details.
- Perspective View (Bottom Right):** A 3D view of the hat showing its cylindrical body, flat top, and supporting posts.

	<small>FECHA</small>	<small>NOMBRE</small>	UNIVERSIDAD DE PIURA <i>FACULTAD DE INGENIERÍA</i>	
<small>DIBUJADO</small>				
<small>REVISADO</small>				
<small>Título</small> Sombrero Chino		<small>Denominación</small>	<small>Escala</small>	
<small>Nombres y apellidos</small> Diego Morales			<small>Plano N</small> 2	

Apéndice 3: Esquemático de un supresor de chispas.

