



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Aplicación de la minería de datos al
proceso de fusión de fundiciones férreas.**

Autor:

Encinas Vicente, Christian

Tutor(es):

De Tiedra Frontaura, María del Pilar

**Departamento:
CMEIM/EGI/IGGF/IPF**

Díez Vielba, Pedro

**Director de I+D+i en Lingotes
Especiales S.A.**

Valladolid, Julio 2021.

Agradecimientos.

A mis padres y mi hermano, porque este trabajo supone el final del sacrificio que han realizado durante todos estos años para permitirme llegar hasta aquí, teniendo en mí una confianza plena.

A Marta, con la que quiero compartir todos mis éxitos, ya que ella forma parte de todos ellos.

A mis amigos, con los que he podido compartir este duro camino, logrando que este fuera más ameno.

A mis tutores Pilar y Pedro, por toda la dedicación que han efectuado para que este trabajo saliera adelante.

Resumen.

La minería de datos se trata de un proceso con el que se pueden conseguir patrones o tendencias para explicar el comportamiento que tienen las grandes bases de datos.

La composición química dentro de las fundiciones tiene una gran influencia en sus propiedades. Es por ello, que mediante la minería de datos se analizará la composición química de las piezas de fundición.

Para ello, se estudiará si los valores obtenidos de la composición química mediante el espectrómetro y el carbodeterminador son fiables. Se buscará la distribución a la que mejor se adaptan los valores medidos y cuál es su estabilidad, además de la influencia de los elementos residuales y variabilidad del sistema de medición. También se implementará nuevas estrategias de control de la producción.

Palabras clave.

Minería de datos, composición química, fundición, espectrómetro, carbodeterminador, tratamiento estadístico de datos, hornos de fusión.

Abstract.

Data mining is a process that allows obtaining patterns or trends aimed at explaining the behavior of large databases.

The chemical composition has a great influence on the properties of foundries. This is the reason why the chemical composition of the cast components will be analyzed using data mining.

To this end, an assessment will be done whether the information on the chemical composition obtained by means of the spectrometer and the carbodeterminator is reliable. The distribution best fitting the measured values will be sought along with their stability, while both the influence of residual elements and the variability of the measurement system will be characterized. New production control strategies will also be implemented.

Keywords.

Data mining, chemical composition, foundry, spectrometer, carbodeterminator, statistical processing of data, melting furnaces.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 13 |
| 1.1. Enunciado del trabajo. | 13 |
| 1.2. Antecedentes..... | 13 |
| 1.3. Objetivos. | 13 |
| 2. Descripción de la empresa..... | 15 |
| 3. Descripción del proceso. | 17 |
| 3.1. Materias primas almacenadas..... | 17 |
| 3.2. Transporte de la materia prima..... | 18 |
| 3.3. Hornos..... | 18 |
| 3.4. Incorporación de aditivos..... | 19 |
| 3.5. Etapa de fusión..... | 20 |
| 3.6. Retirada de la escoria. | 20 |
| 3.7. Comprobación de la composición química..... | 21 |
| 3.8. Transporte del caldo..... | 22 |
| 4. Fundiciones. | 23 |
| 4.1. Generalidades de las fundiciones..... | 23 |
| 4.1.1. Propiedades y características de las fundiciones..... | 23 |
| 4.1.2. Constituyentes de las fundiciones. | 25 |
| 4.1.2.1. Grafito..... | 26 |
| 4.1.2.2. Ferrita. | 29 |
| 4.1.2.3. Cementita..... | 30 |
| 4.1.2.4. Perlita..... | 30 |
| 4.1.2.5. Steadita. | 31 |
| 4.1.2.6. Ledeburita. | 31 |
| 4.1.2.7. Austenita. | 32 |
| 4.1.2.8. Martensita..... | 32 |
| 4.1.2.9. Bainita..... | 32 |
| 4.1.3. Clasificación. | 32 |
| 4.1.3.1. Fundiciones Blancas..... | 33 |
| 4.1.3.2. Fundiciones Grises. | 34 |
| 4.1.3.3. Fundiciones Atruchadas..... | 35 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.1.3.4. | Fundiciones Aleadas..... | 36 |
| 4.1.3.5. | Fundiciones Maleables..... | 36 |
| 4.1.3.6. | Fundiciones Dúctiles, Nodulares o Esferoidales..... | 37 |
| 4.1.4. | Tratamientos térmicos..... | 37 |
| 4.1.4.1. | Recocido..... | 37 |
| 4.1.4.2. | Normalizado..... | 38 |
| 4.1.4.3. | Temple..... | 39 |
| 4.1.4.4. | Revenido..... | 39 |
| 4.1.5. | Defectos..... | 39 |
| 4.2. | Influencia de los elementos de aleación en las fundiciones..... | 42 |
| 4.2.1. | Carbono (C)..... | 42 |
| 4.2.2. | Silicio (Si)..... | 43 |
| 4.2.3. | Azufre (S)..... | 43 |
| 4.2.4. | Manganeso (Mn)..... | 44 |
| 4.2.5. | Fósforo (P)..... | 44 |
| 4.2.6. | Molibdeno (Mo)..... | 45 |
| 4.2.7. | Aluminio (Al)..... | 45 |
| 4.2.8. | Cobre (Cu)..... | 45 |
| 4.2.9. | Cromo (Cr)..... | 46 |
| 4.2.10. | Níquel (Ni)..... | 46 |
| 4.2.11. | Vanadio (V)..... | 46 |
| 4.2.12. | Oxígeno (O)..... | 47 |
| 4.2.13. | Hidrógeno (H)..... | 47 |
| 4.2.14. | Nitrógeno (N)..... | 47 |
| 4.3. | Reciclaje de metales en las fundiciones..... | 48 |
| 5. | Análisis de datos..... | 51 |
| 5.1. | Estudio de Carbodeterminador y Espectrómetro..... | 53 |
| 5.2. | Estudio del Carbono (C) y del Silicio (Si)..... | 54 |
| 5.2.1. | Histogramas..... | 54 |
| 5.2.2. | Distribuciones..... | 54 |
| 5.2.3. | Gráficos de control..... | 54 |
| 5.3. | Estudio de elementos residuales..... | 55 |

| | |
|---|-----|
| 5.4. Estudio de los analistas..... | 55 |
| 5.5. Estrategia de control de la producción..... | 55 |
| 6. Análisis de resultados..... | 57 |
| 6.1. Resultados del estudio de Carbodeterminador y Espectrómetro..... | 57 |
| 6.2. Resultados del estudio del Carbono (C) y del Silicio (Si)..... | 63 |
| 6.2.1. Resultados de los histogramas..... | 63 |
| 6.2.2. Resultados de las distribuciones..... | 70 |
| 6.2.3. Resultados de los gráficos de control..... | 76 |
| 6.3. Resultados del estudio de los elementos residuales..... | 83 |
| 6.4. Resultados del estudio de los analistas..... | 91 |
| 6.5. Resultados de la estrategia de control para la producción..... | 97 |
| 7. Conclusiones..... | 99 |
| 8. Líneas de futuro..... | 101 |
| 9. Bibliografía..... | 103 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Planta productiva - Fundición. [1] | 15 |
| Ilustración 2. Proceso de fabricación en Lingotes Especiales S.A. [1] | 16 |
| Ilustración 3. Almacén de las materias primas. [2] | 17 |
| Ilustración 4. Imán magnético. [2] | 18 |
| Ilustración 5. Hornos de fusión H21 y H22. | 19 |
| Ilustración 6. Aditivos. [3] | 19 |
| Ilustración 7. Horno durante la etapa de fusión. [2]..... | 20 |
| Ilustración 8. Retirada de la escoria. [2]..... | 20 |
| Ilustración 9. Espectrómetro. | 21 |
| Ilustración 10. Sistema para la toma de muestra y pantalla de valores del Carbodeterminador. | 22 |
| Ilustración 11. Transporte del caldo. [2]..... | 22 |
| Ilustración 12. Diagrama estable (líneas discontinuas) y metaestable (líneas continuas). [5]..... | 26 |
| Ilustración 13. Grafito laminar. [6] | 27 |
| Ilustración 14. Grafito nodular. [6]..... | 27 |
| Ilustración 15. Grafito esferoidal. [6] | 27 |
| Ilustración 16. Grafito estallado. [6] | 28 |
| Ilustración 17. Grafito vermicular en fundición esferoidal. [6] | 28 |
| Ilustración 18. Grafito compacto. [6] | 28 |
| Ilustración 19. Grafito irregular. [6]..... | 29 |
| Ilustración 20. Grafito de flotación. [6]..... | 29 |
| Ilustración 21. Ferrita en fundición esferoidal. [6] | 30 |
| Ilustración 22. Cementita con su tonalidad blanca. [6] | 30 |
| Ilustración 23. Perlita en una fundición gris. [6]..... | 31 |
| Ilustración 24. Steadita en una fundición con grafito laminar. [6]..... | 31 |
| Ilustración 25. Ledeburita. [6] | 32 |
| Ilustración 26. Clasificación de las fundiciones [7] | 33 |
| Ilustración 27. Composición de C y Si en aceros, fundiciones grises y blancas. [5] | 34 |
| Ilustración 28. Morfologías del grafito laminar [9]..... | 34 |
| Ilustración 29. Composición de C y Si en los hierros comerciales. [25]..... | 42 |
| Ilustración 30. Diagrama de Norbury en piezas de 25mm de espesor. [5].... | 42 |
| Ilustración 31. Ecuación del Carbono Equivalente. [23] | 43 |
| Ilustración 32. Relación optima de Mn y S para formar MnS. [23] | 44 |
| Ilustración 33. Ciclo del reciclaje. [32] | 49 |
| Ilustración 34. Información proporcionada por el Espectrómetro. | 51 |
| Ilustración 35. Información del Carbodeterminador para el Carbono (C). | 52 |
| Ilustración 36. Gama de especificaciones..... | 53 |
| Ilustración 37. Aplicación de control de los componentes químicos..... | 97 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

| | |
|---|----|
| Gráfica 1. Carbono (C) presente en el código 7882 del horno 21..... | 57 |
| Gráfica 2. Carbono (C) presente en el código 7882 del horno 22..... | 58 |
| Gráfica 3. Silicio (Si) presente en el código 7882 del horno 21..... | 58 |
| Gráfica 4. Silicio (Si) presente en el código 7882 del horno 22..... | 59 |
| Gráfica 5. Carbono (C) presente en el código 8075 del horno 21..... | 59 |
| Gráfica 6. Carbono (C) presente en el código 8075 del horno 22..... | 60 |
| Gráfica 7. Silicio (Si) presente en el código 8075 del horno 21..... | 60 |
| Gráfica 8. Silicio (Si) presente en el código 8075 del horno 22..... | 61 |
| Gráfica 9. Carbono (C) presente en el código 8224 del horno 21..... | 61 |
| Gráfica 10. Carbono (C) presente en el código 8224 del horno 22..... | 62 |
| Gráfica 11. Silicio (Si) presente en el código 8224 del horno 21..... | 62 |
| Gráfica 12. Silicio (Si) presente en el código 8224 del horno 22..... | 63 |
| Gráfica 13. Histograma y estadísticos del C en código 7882 del horno 21.... | 64 |
| Gráfica 14. Histograma y estadísticos del C en código 8075 del horno 21.... | 64 |
| Gráfica 15. Histograma y estadísticos del C en código 8224 del horno 21.... | 65 |
| Gráfica 16. Histograma y estadísticos del C en código 7882 del horno 22.... | 65 |
| Gráfica 17. Histograma y estadísticos del C en código 8075 del horno 22.... | 66 |
| Gráfica 18. Histograma y estadísticos del C en código 8224 del horno 22.... | 66 |
| Gráfica 19. Histograma y estadísticos del Si en código 7882 del horno 21...67 | |
| Gráfica 20. Histograma y estadísticos del Si en código 8075 del horno 21...67 | |
| Gráfica 21. Histograma y estadísticos del Si en código 8224 del horno 21...68 | |
| Gráfica 22. Histograma y estadísticos del Si en código 7882 del horno 22...68 | |
| Gráfica 23. Histograma y estadísticos del Si en código 8075 del horno 22...69 | |
| Gráfica 24. Histograma y estadísticos del Si en código 8224 del horno 22...69 | |
| Gráfica 25. Distribuciones del C en el código 7882 del horno 21..... | 70 |
| Gráfica 26. Distribuciones del C en el código 8075 del horno 21..... | 71 |
| Gráfica 27. Distribuciones del C en el código 8224 del horno 21..... | 71 |
| Gráfica 28. Distribuciones del C en el código 7882 del horno 22..... | 72 |
| Gráfica 29. Distribuciones del C en el código 8075 del horno 22..... | 72 |
| Gráfica 30. Distribuciones del C en el código 8224 del horno 22..... | 73 |
| Gráfica 31. Distribuciones del Si en el código 7882 del horno 21..... | 73 |
| Gráfica 32. Distribuciones del Si en el código 8075 del horno 21..... | 74 |
| Gráfica 33. Distribuciones del Si en el código 8224 del horno 21..... | 74 |
| Gráfica 34. Distribuciones del Si en el código 7882 del horno 22..... | 75 |
| Gráfica 35. Distribuciones del Si en el código 8075 del horno 22..... | 75 |
| Gráfica 36. Distribuciones del Si en el código 8224 del horno 22..... | 76 |
| Gráfica 37. Gráficas de control del C en el código 7882 del horno 21..... | 77 |
| Gráfica 38. Gráficas de control del C en el código 8075 del horno 21..... | 77 |
| Gráfica 39. Gráficas de control del C en el código 8224 del horno 21..... | 78 |
| Gráfica 40. Gráficas de control del C en el código 7882 del horno 22..... | 78 |
| Gráfica 41. Gráficas de control del C en el código 8075 del horno 22..... | 79 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 42. Gráficas de control del C en el código 8224 del horno 22..... | 79 |
| Gráfica 43. Gráficas de control del Si en el código 7882 del horno 21..... | 80 |
| Gráfica 44. Gráficas de control del Si en el código 8075 del horno 21..... | 80 |
| Gráfica 45. Gráficas de control del Si en el código 8224 del horno 21..... | 81 |
| Gráfica 46. Gráficas de control del Si en el código 7882 del horno 22..... | 81 |
| Gráfica 47. Gráficas de control del Si en el código 8075 del horno 22..... | 82 |
| Gráfica 48. Gráficas de control del Si en el código 8224 del horno 22..... | 82 |
| Gráfica 49. Vanadio (V) en zona fusora A1..... | 83 |
| Gráfica 50. Vanadio (V) en zona fusora A2..... | 83 |
| Gráfica 51. Vanadio (V) en zona fusora A3..... | 84 |
| Gráfica 52. Vanadio (V) por rangos para cada horno. | 84 |
| Gráfica 53. Niobio (Nb) en zona fusora A1..... | 85 |
| Gráfica 54. Niobio (Nb) en zona fusora A2..... | 85 |
| Gráfica 55. Niobio (Nb) en zona fusora A3..... | 86 |
| Gráfica 56. Niobio (Nb) por rangos para cada horno..... | 86 |
| Gráfica 57. Boro (B) en zona fusora A1. | 87 |
| Gráfica 58. Boro (B) en zona fusora A2. | 87 |
| Gráfica 59. Boro (B) en zona fusora A3. | 88 |
| Gráfica 60. Boro (B) por rangos para cada horno..... | 88 |
| Gráfica 61. Zinc (Zn) en zona fusora A1. | 89 |
| Gráfica 62. Zinc (Zn) en zona fusora A2. | 89 |
| Gráfica 63. Zinc (Zn) en zona fusora A3. | 90 |
| Gráfica 64. Zinc (Zn) por rangos para cada horno..... | 90 |
| Gráfica 65. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A1..... | 92 |
| Gráfica 66. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A1..... | 92 |
| Gráfica 67. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A1..... | 93 |
| Gráfica 68. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A2..... | 94 |
| Gráfica 69. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A2..... | 94 |
| Gráfica 70. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A2..... | 95 |
| Gráfica 71. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A3..... | 96 |
| Gráfica 72. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A3..... | 96 |
| Gráfica 73. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A3..... | 97 |

1. Introducción.

1.1. Enunciado del trabajo.

Aplicación de la minería de datos al proceso de fusión de fundiciones férreas.

1.2. Antecedentes.

En Lingotes Especiales S.A. se han realizado diferentes proyectos para relacionar las variables de las diferentes etapas del proceso fabricación de piezas fundidas con los resultados obtenidos en dichas piezas.

Los defectos obtenidos en las piezas de fundición también se encuentran dentro de estos proyectos. En ellos, se busca encontrar el origen a los defectos, de tal manera que se puedan predecir y anteponerse a su aparición.

Este trabajo aporta la posibilidad de realizar tanto un control a la composición química de las piezas durante la etapa de fusión del metal como a los procesos de análisis de dicha composición química.

1.3. Objetivos.

El objetivo del presente trabajo es aplicar la minería de datos para analizar la composición química utilizada en la producción de piezas de fundición moldeadas en arena verde. La minería de datos nos permite encontrar patrones o tendencias de manera automática para explicar el comportamiento que tienen las grandes bases de datos.

La composición química de las piezas de fundición varía en función de las especificaciones de los clientes. Surge la necesidad de comprobar si las medidas tomadas son fiables, tienen un carácter normalizado, cual es la estabilidad del proceso, la influencia de los elementos residuales y la variabilidad del sistema de medición. Además, se buscan propuestas para implementar nuevas estrategias de control de la producción.

Los patrones de la minería de datos buscan ajustar de manera precisa las composiciones químicas de las fundiciones a las especificaciones del cliente.

Los datos proporcionados para este análisis pertenecen a la empresa de fundición Lingotes Especiales S.A.

2. Descripción de la empresa.

LINGOTES ESPECIALES S.A. es un grupo industrial especializado en el diseño, desarrollo, fundición, mecanizado y montaje de piezas de hierro gris y esferoidal.

El 20 de julio de 1968 se funda el grupo junto a la factoría dedicada a la fundición de hierro. Desde 1998 la empresa filial Frenos y Conjuntos S.A. se dedica a la mecanización de productos de hierro, además de los procesos de acabados, pinturas y otros añadidos a las piezas que son destinadas tanto a la automoción como a los recambios originales. El 30 de marzo de 1989 Lingotes Especiales S.A. sale a Bolsa, siendo en 2006 cuando pasa al Mercado Continuo. Desde entonces forma parte del índice “Ibex Small Cap” de las Bolsas de Madrid y Barcelona.

Lingotes Especiales S.A. está ubicada en su totalidad en Valladolid, dividida en tres sedes.

- Planta Productiva - Fundición ubicada en ctra. Fuensaldaña, km 2.
- Mecanizado y Montaje ubicado en avda. de Burgos, Nº 53.
- Oficinas y Administración ubicada en calle Colmenar, Nº 5, Piso 1º.



Ilustración 1. Planta productiva - Fundición. [1]

Lingotes Especiales S.A. es una empresa dedicada a la suministración de piezas de hierro. Junto a su filial, sus principales productos son los discos y tambores de freno además de volantes y platos de embragues.

La producción se basa principalmente de componentes para el sector del automóvil en todo el mundo, aunque también trabajan componentes de otros

sectores de la industria como obra civil, cableado submarino, electrodomésticos, maquinaria agrícola e industria en general.

En el sector del automóvil, son suministradores de componentes de los principales productores de automóviles de Europa. Cabe destacar el mercado de discos de freno, ya que suministran el 12% del mercado de la Unión Europea y el 3% del mercado mundial.

La compañía consta unas instalaciones bastante modernas con los sistemas más avanzados a nivel mundial, donde destacan los hornos capaces de fundir hasta 170000 Tm o las novedosas instalaciones de control de calidad.

Disponen de líneas específicas de trabajo, como son la línea de creación de machos a gran volumen o la línea de mecanizado, pintado y montaje, que permite entregar piezas listas para ensamblar.

La calidad es una de las bases de la compañía, de tal manera que todas las piezas son evaluadas por sus sistemas de control, para asegurar la mayor calidad de producto.

La economía circular les permite utilizar los residuos metálicos de otros procesos como materia prima. Apuestan por diseñar productos sin desechos, que puedan ser reutilizados una vez lleguen al fin de su vida útil, de tal manera que los residuos se puedan convertir en recursos.

Lingotes Especiales S.A. cuenta con su propio departamento de I+D+i, en colaboración con centros como CIDAUT, AZTERLAN y la Escuela de Ingenieros Industriales de la UVa.

En este departamento se dedican a la mejora de los productos que demandan los clientes y ofrecerles todo tipo de soluciones a su problemática. Otra función de este departamento es la de mejorar sus propios procesos de fabricación y la búsqueda de nuevos materiales para obtener una mejor competitividad en la empresa. [1]



Ilustración 2. Proceso de fabricación en Lingotes Especiales S.A. [1]

3. Descripción del proceso.

La producción de piezas dentro de Lingotes Especiales S.A. empieza con la creación de un caldo o colada que se introducirá en moldes con la forma y tamaño de dichas piezas. Son necesarios una serie de procesos hasta obtener un caldo que cumpla con las especificaciones indicadas. [2] [3] [4]

3.1. Materias primas almacenadas.

Existe un espacio cerca de los hornos de fusión donde se almacenan las materias primas que se utilizan para crear el caldo. Las materias primas son residuos provenientes de otros procesos o industrias de fabricación, que se reciclan y están clasificados de la siguiente manera.

- Lingotes de arrabio. Es una materia prima de primera fusión del mineral de hierro.
- Recortes de las piezas de carrocerías de los automóviles. Vienen prensadas en forma de prismas para facilitar su transporte y manipulación.
- Restos de la fabricación de latas de refrescos o conservas, nunca del reciclaje de dichas latas, ya que estas tienen pinturas y otros contaminantes. También vienen en forma de prisma prensado para facilitar su transporte.
- Viruta proveniente del proceso de mecanizado de las piezas de fundición que se fabrican en la fábrica.
- Sobrantes de las piezas de fundición como mazarotas o bebederos, que se vuelven a reciclar añadiendo de nuevo al proceso de fusión.



Ilustración 3. Almacén de las materias primas. [2]

3.2. Transporte de la materia prima.

Un imán magnético se encarga de transportar la materia prima que se encuentra almacenada hasta las tolvas que alimentan los hornos. En función del material que se vaya a transportar, el imán utiliza diferentes frecuencias para lograrlo.

El imán tiene una capacidad de transporte de hasta 700 kg de materia prima.

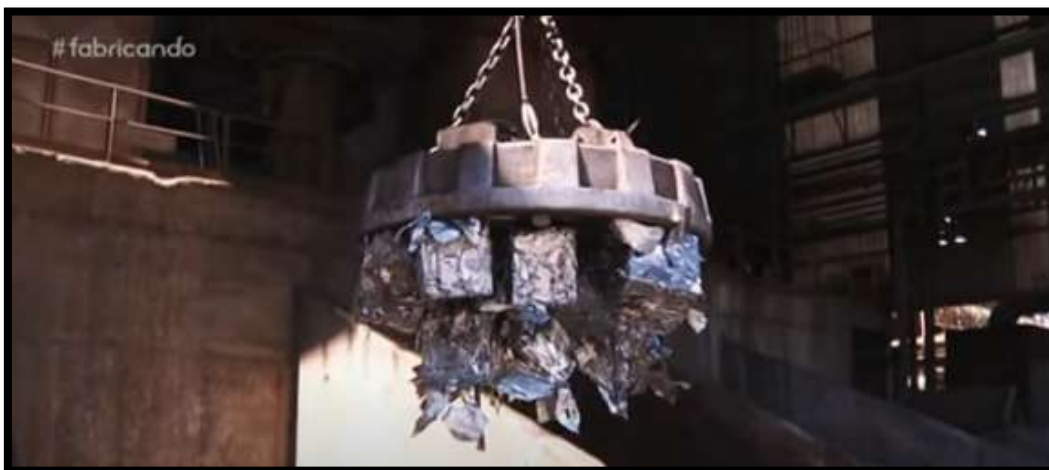


Ilustración 4. Imán magnético. [2]

3.3. Hornos.

Los hornos utilizados por Lingotes Especiales S.A. son hornos de inducción eléctrica recubiertos de cuarcita, trabajando a una temperatura media de 1500°C. Los hornos de fusión más grandes son capaces de fundir 18 toneladas cada hora mientras que el resto solo funden 3 toneladas a la hora.

Estos hornos están dotados con sistemas de aspiración de humos, para eliminar los gases que se producen durante la fusión.

Los hornos de fusión están repartidos a lo largo de tres naves.

- Nave A1, compuesta por los hornos H11, H12, H13 y H14.
- Nave A2, compuesta por los hornos H21 y H22.
- Nave A3, compuesta por los hornos H31, H32, H33 y H34.

En la nave A2, se encuentran los hornos más grandes y con los sistemas de aspiración de humos más potentes. Estos hornos se utilizan para fundir los paquetes de acero cincados que no se pueden hacer en otras naves, tanto por tamaño como por su capacidad de aspiración de los humos provenientes de la fusión de dichos paquetes.



Ilustración 5. Hornos de fusión H21 y H22.

3.4. Incorporación de aditivos.

Una vez seleccionadas las materias primas, se añaden una serie de aditivos que no se encuentran dentro de las propias materias primas. Los aditivos se añaden en pequeñas cantidades que permiten variar la composición química acorde a las gamas y especificaciones de cada cliente. Estos aditivos se incorporan directamente a los hornos de fusión junto a las materias primas.

Los aditivos que se utilizan suelen ser ferroaleaciones como ferro-silicio o ferro-titanio además de otros elementos como grafito, Cobre (Cu), Cromo (Cr), Manganeso (Mn) o Molibdeno (Mo).



Ilustración 6. Aditivos. [3]

3.5. Etapa de fusión.

Una vez introducidos tanto las materias primas como los aditivos en los hornos de fusión, se realiza la obtención del caldo o metal fundido. El proceso suele durar entre 45 y 55 minutos para obtener las 20 toneladas de caldo a una temperatura de unos 1500°C.



Ilustración 7. Horno durante la etapa de fusión. [2]

3.6. Retirada de la escoria.

La escoria son los elementos no metálicos que provienen dentro de las materias primas como tierra, arena de los retornos u otros elementos. La escoria tiene menos densidad que el hierro fundido, por lo que flota dentro de los hornos. Tiene un aspecto negro a diferencia del metal fundido, y al estar flotando se elimina del caldo mediante una grúa con unas pinzas.



Ilustración 8. Retirada de la escoria. [2]

3.7. Comprobación de la composición química.

Antes de llevar el caldo fundido a las líneas de fabricación, se toman unas muestras para analizar la composición del caldo.

Este proceso es muy importante, ya que en cada horno se funde a la vez el metal para dos clientes diferentes, cada uno con sus especificaciones. Para lograrlo, se equilibra el caldo de tal manera que todos los componentes estén dentro de los límites de las gamas y especificaciones de los dos clientes.

Para realizar esta comprobación, son necesarios dos experimentos diferentes.

- Espectrómetro.

Con este experimento se logra obtener la composición de todos los elementos que componen el caldo.

Se solidifica una pequeña medalla del caldo del metal fundido para analizarlo. Mediante el Espectrómetro, la medalla sufre dos pinchazos eléctricos que permiten medir la composición química. En pantalla muestra la media de ambas medidas que son almacenadas.



Ilustración 9. Espectrómetro.

- Carbodeterminador.

Este experimento es necesario ya que las medidas de Carbono (C) y Silicio (Si) del caldo obtenidas por el Espectrómetro no son las correctas.

Se introduce una pequeña muestra del caldo líquido dentro del Carbodeterminador, que lo enfría y muestra en una pantalla los valores de ambos elementos.

En caso de que las mediciones no cumplan con los límites de las gamas y especificaciones de ambos clientes, se corrige el caldo mediante aditivos hasta que esté dentro de ellos.



Ilustración 10. Sistema para la toma de muestra y pantalla de valores del Carbodeterminador.

3.8. Transporte del caldo.

Una vez que el caldo cumple con las especificaciones del cliente, se transporta hasta las líneas de moldeo. El caldo es transportado a unos 1500°C , una temperatura superior a la de moldeo, para garantizar que el caldo llegue con la temperatura correcta a dicha etapa. El transporte se realiza mediante cucharas de hormigones especiales que soportan temperatura altas, con una capacidad de 2 toneladas de caldo.



Ilustración 11. Transporte del caldo. [2]

4. Fundiciones.

4.1. Generalidades de las fundiciones.

Dentro de la familia de los metales, existen los materiales base hierro. Estos materiales se presentan de dos maneras, tanto en elemento puro como en forma de aleación férrea. Los elementos puros son prácticamente inusuales en las aplicaciones industriales, fabricándose las piezas a partir de aleaciones.

Dentro de las aleaciones férreas, encontramos dos grandes grupos, los aceros y las fundiciones. Ambos grupos conllevan la aportación de varios elementos en su composición, siendo el Carbono (C) la principal diferencia entre ellos.

Las fundiciones se tratan de aleaciones de Hierro (Fe), Carbono (C) y Silicio (Si) principalmente. Contienen otra serie de elementos, como Manganeso (Mn), Fósforo (P) y Azufre (S) entre otros.

Las fundiciones tienen un alto contenido de Carbono (C) en comparación con los aceros, siendo en estos últimos siempre inferior al 1,7%. Sin embargo en las fundiciones se encuentra entre un 2 y 4,5%. El Silicio (Si) es otro elemento importante dentro de las fundiciones, encontrándose entre un 0,5 y 4%. Otra de las diferencias entre ambos, es la forma de obtención de las piezas definitivas, ya que en las fundiciones se consigue por colada y no pueden ser sometidas a procesos de deformaciones plásticas, ni en frío ni en caliente. Por lo tanto, las fundiciones no son dúctiles ni maleables, además de no poderse forjar ni laminar. [5][8][9][11]

4.1.1. Propiedades y características de las fundiciones.

El empleo de la fundición en la fabricación de piezas de diversos usos ofrece una serie de propiedades y características, como son las siguientes.

- Las piezas de fundición suelen ser bastante más baratas que las piezas de acero. Se debe principalmente al menor gasto energético debido a un punto de fusión relativamente bajo y mucho menor que en los aceros, provocando que sus instalaciones sean menos costosas y más sencillas. Esta es la principal característica por lo que las fundiciones tienen una extensa aplicación en la industria.
- Las piezas de fundición son mucho más fáciles de mecanizar que las piezas de acero, siendo este un proceso posterior a la fundición. Su motivo es la presencia de grafito, el cual facilita la rotura de la viruta.

- La fundición tiene una gran versatilidad a la hora de obtener piezas. Se pueden realizar tanto piezas de grandes dimensiones como de pequeño tamaño, ambas con formas complicadas. Se obtiene piezas de gran precisión tanto en forma como en medidas. En las piezas fundidas, las zonas porosas suelen ser poco frecuentes, a diferencia del acero fundido.
- Tienen buena resistencia tanto a compresión como a tracción. Su resistencia a compresión (entre 50 y 100 kg/mm²) siempre es superior a la de tracción (entre 20 y 45 kg/mm²), por lo que el uso de estas piezas es preferible a esfuerzos de compresión. También están caracterizadas por su resistencia al desgaste y la absorción de vibraciones.
- En su fabricación, las exigencias de precauciones de seguridad son menores que en el acero, ya que se trabaja a temperaturas menores.
- Al ser las temperaturas de fusión bastante bajas (entorno a 1200°C), permite sobrepasar dicha temperatura para obtener una gran fluidez del metal en estado líquido. Esta fluidez permite obtener piezas de poco espesor. Además, las fundiciones fosforosas son más fluidas que las fundiciones con poco Fósforo (P).
- En la etapa de solidificación, las piezas presentan menor contracción que en los aceros, aunque esta varía en función del tipo de fundición.
- La superficie exterior de las fundiciones es de color gris oscuro. Sin embargo, el color de la fractura es distinta en función del tipo.
- El peso específico varía en función del tipo de fundición, de 7 a 7,2 kg/dm³ en la gris, de 7,3 a 7,4 kg/dm³ en la atruchadas y de 7,4 a 7,6 kg/dm³ en la blanca.
- La alta densidad de las fundiciones provoca que se liberen gases y se formen inclusiones metálicas con mayor facilidad que en las aleaciones ligeras.
- En cuanto a la resistencia al impacto o choque de las fundiciones, encontramos diferentes resultados en función del tipo. Las fundiciones blancas son muy frágiles sin resistencia al choque, debido a la ausencia de deformaciones plásticas. Las fundiciones maleables y de grafito nodular resisten los impactos dentro de un límite de seguridad. Sin embargo, las fundiciones grises tiene un comportamiento óptimo de los impactos por sus propiedades de amortiguar las vibraciones.

- La dureza de las fundiciones es elevada, comprendida entre 140 y 250 Brinell en las fundiciones grises, mientras que en las fundiciones blancas, su dureza se encuentra entre 350 y 400 Brinell.
- Las fundiciones tienen una discreta resistencia química tanto a los ácidos, a las oxidaciones como al fuego.
- Las fundiciones blancas tienen serios problemas de soldabilidad, sin embargo en las fundiciones grises se puede lograr utilizando los procesos adecuados. Si la pieza es de pequeñas dimensiones se puede realizar con una soldadura oxiacetilénica mientras que en piezas más voluminosas es recomendable la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido con preparación previa de los bordes a unir.

A lo largo de los años, las fundiciones han mejorado considerablemente tanto en la fabricación como en los tratamientos, provocando unas características excelentes, que en muchos casos hacen competencia al acero. [5] [8] [9] [11]

4.1.2. Constituyentes de las fundiciones.

Antes de comenzar con la clasificación de las diferentes tipos de fundiciones, es necesario profundizar en los componentes que aparecen en su microestructura.

La forma en la que se presenta el Carbono (C) dentro de las fundiciones puede ser como carbono libre en forma de grafito o en carbono en forma combinada debido a la presencia del Silicio (Si). Este es el motivo por el cual, en la solidificación de las fundiciones se sigue el diagrama estable (en las fundiciones grises) o el diagrama metaestable (en las fundiciones blancas). [5][6][7][8]

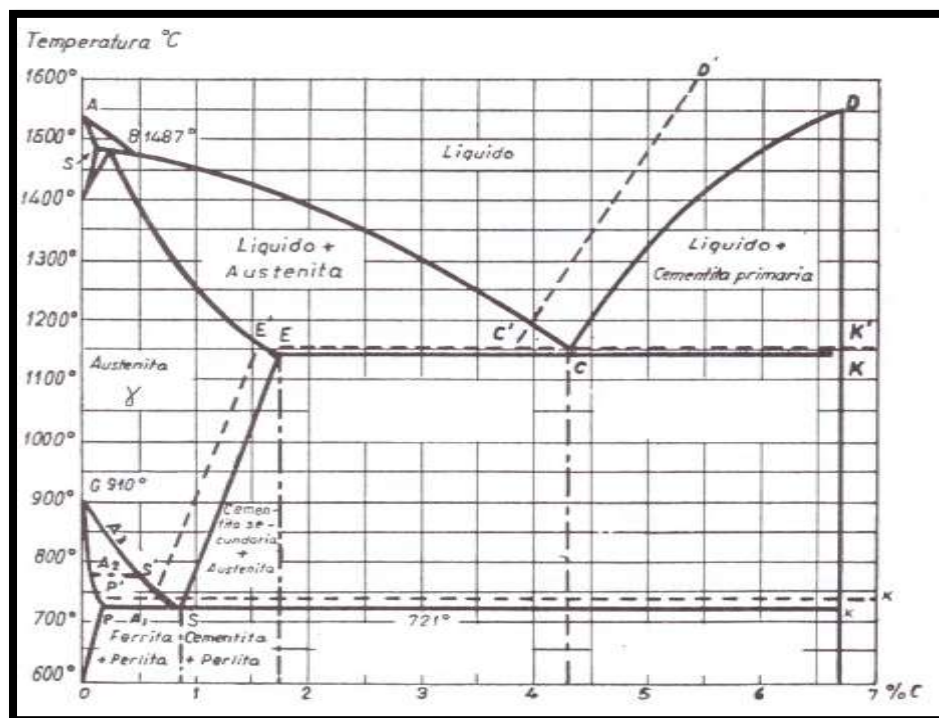


Ilustración 12. Diagrama estable (líneas discontinuas) y metaestable (líneas continuas). [5]

Dentro de los principales componentes que aparecen en la microestructura cabe destacar el grafito, aunque también son importantes la ferrita, la cementita, la perlita y la steadita. En menor frecuencia suele aparecer la ledeburita, la bainita y la martensita.

4.1.2.1. Grafito.

El carbono libre aparece dentro de las fundiciones en forma de grafito. Se trata de una forma elemental del Carbono (C). A la hora de cristalizar se obtiene una estructura hexagonal de color gris oscuro, untuoso, blando y con un peso específico de $2,25 \text{ g/cm}^3$. La formación del grafito va acompañada de un aumento de volumen que provoca que la contracción a la hora de solidificar la pieza sea muy leve. El grafito puede adoptar gran variedad de morfologías muy diversas que permiten clasificarlo de la siguiente manera.

- Grafito laminar. Esta forma del grafito es típica de las fundiciones grises. Se tratan de láminas u hojuelas que se presentan en diferentes distribuciones que forman una discontinuidad en la matriz. Provoca que la pieza sea más frágil, con menor dureza, resistencia y elasticidad. Elimina totalmente la ductilidad pero mejora la maquinabilidad además de elevar la resistencia al desgaste y la corrosión.



Ilustración 13. Grafito laminar. [6]

- Grafito nodular. Esta forma del grafito es típica de las fundiciones maleables. Su forma es relativamente redondeada y aislada, presentándose ocluido dentro de la matriz metálica evitando discontinuidades importantes. Tiene cierta semejanza al grafito esferoidal, lo que les hace compartir propiedades. Mejora la ductilidad de las piezas, teniendo mayores resistencias y alargamientos.

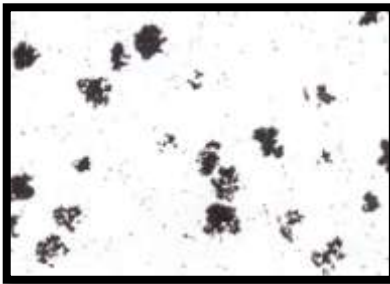


Ilustración 14. Grafito nodular. [6]

- Grafito esferoidal. Esta forma del grafito es típica de las fundiciones especiales con inoculación de metales como el Cerio (Ce) o el Magnesio (Mg). Tiene forma de esferoide, formado por cristales que crecen a partir de un centro común, ocluidos en la matriz metálica. Son de menor tamaño que el grafito nodular y con mayor ductilidad. La uniformidad de tamaño y de reparto indica calidad del grafito.

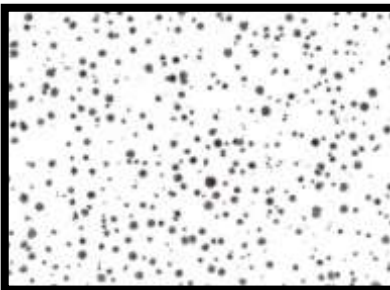


Ilustración 15. Grafito esferoidal. [6]

- Grafito estallado. Se trata de una producción defectuosa de las piezas de fundición esferoidal. Este tipo de grafito no es perjudicial, ya que

conserva las características del grafito esferoidal. Surge en las fundiciones con alto carbono equivalente y se reparte de forma uniforme.

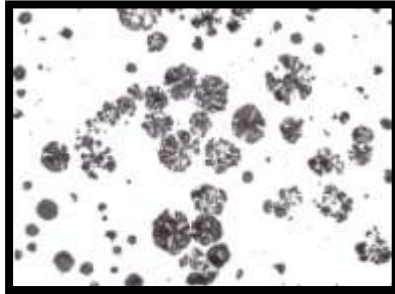


Ilustración 16. Grafito estallado. [6]

- Grafito vermicular. Se considera como defecto de las fundiciones con grafito esferoidal aunque tiene un contenido tolerante de hasta el 15%. Su morfología es longitudinal con contornos rodeados, sin llegar a las dimensiones del laminar. Se manifiesta de forma aislada, reduciendo las características de resistencia y ductilidad en las piezas.

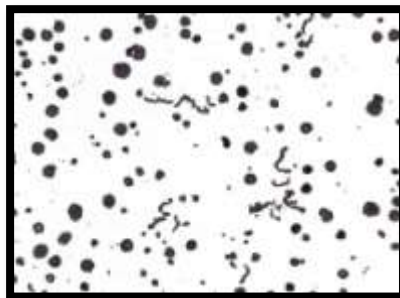


Ilustración 17. Grafito vermicular en fundición esferoidal. [6]

- Grafito compacto. Se trata de láminas cortas y espesas con bordes redondeados que presentan una estructura ramificada. La formación de este grafito necesita un control estricto de sus elementos. Como su estructura es intermedia entre el laminar y el esferoidal, sus propiedades también lo son.

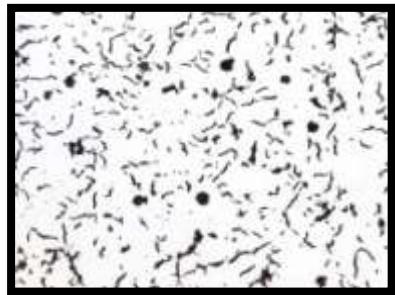


Ilustración 18. Grafito compacto. [6]

- Grafito de forma irregular. Sigue la formación de un grafito esferoidal, pero con los contornos exteriores irregulares. Aunque en algunos estudios se considera inadecuado, no varía las características mecánicas.

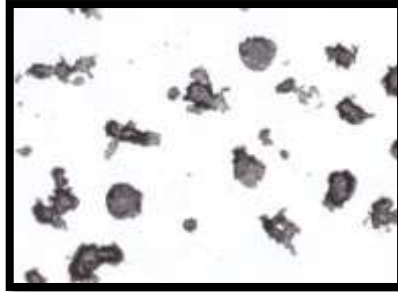


Ilustración 19. Grafito irregular. [6]

- Grafito de flotación. Se trata de un defecto típico de las fundiciones con grafito esferoidal. Surge en las partes superiores de las piezas, donde hay una capa muy rica de grafito con una concentración intensa de esferoidales. Aparece cuando el carbono equivalente es hipereutéctico y no hipoeutéctico.

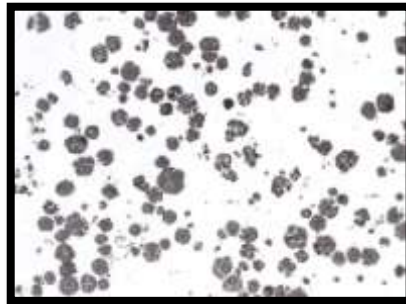


Ilustración 20. Grafito de flotación. [6]

De los numerosos tipos de grafitos que existen, la mayoría de fundiciones contienen el laminar, nodular o esferoidal. [5][6][7][8]

4.1.2.2. Ferrita.

Se trata de un constituyente que cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo, blando, con una buena maquinabilidad y de naturaleza magnética. Tiene una capacidad prácticamente nula para disolver Carbono (C), sin embargo a diferencia de los aceros, las fundiciones contienen en su disolución importantes cantidades de Silicio (Si). La presencia del Silicio (Si) provoca que la ferrita eleve su dureza y resistencia. [5][6][7][8]

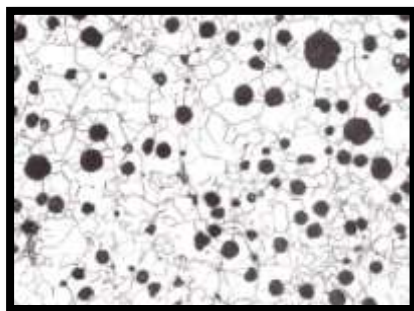


Ilustración 21. Ferrita en fundición esferoidal. [6]

4.1.2.3. Cementita.

La cementita es un carburo de hierro (Fe_3C), con una composición química constante y un 6,67% de Carbono (C) de aspecto blanco brillante. Sigue el diagrama metaestable en su solidificación cristalizando en un sistema ortorrómbico. Se trata del constituyente más duro y frágil tanto de las fundiciones como de los aceros. [6][7][8]

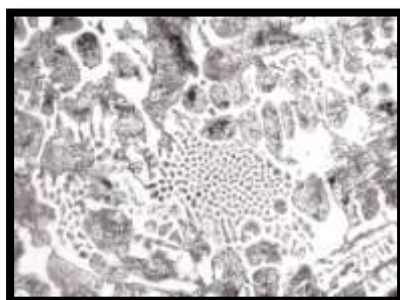


Ilustración 22. Cementita con su tonalidad blanca. [6]

4.1.2.4. Perlita.

La perlita es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de cementita y ferrita. Estas láminas están más o menos separadas en función de la velocidad de enfriamiento, estando más separadas cuando el tiempo de enfriamiento es mayor. En función de la separación entre capas, se puede clasificar en perlita gruesa, normal o fina. A diferencia de los aceros, en las fundiciones, la presencia de Silicio (Si) provoca que el contenido de Carbono (C) sea inferior en la perlita. Tiene una resistencia mecánica elevada y una tenacidad aceptable, disminuyendo la maquinabilidad en piezas de fundición. [5][6][7][8]



Ilustración 23. Perlita en una fundición gris. [6]

4.1.2.5. Steadita.

La steadita es un compuesto de naturaleza eutéctica, duro, frágil y con un punto de fusión bajo (entorno a 960 °C). Aparece en las fundiciones que tienen un alto contenido de Fósforo (P). La steadita suele tener un 10% de Fósforo (P) y su peso específico es del mismo orden que el del Hierro (Fe). La steadita en las fundiciones grises está compuesta por un eutéctico binario de ferrita y fosfuro de fósforo (Fe_3P), mientras que en las fundiciones blancas y atruchadas está compuesta por un eutéctico ternario de ferrita, fosfuro de fósforo (Fe_3P) y cementita. [5][6][7][8]

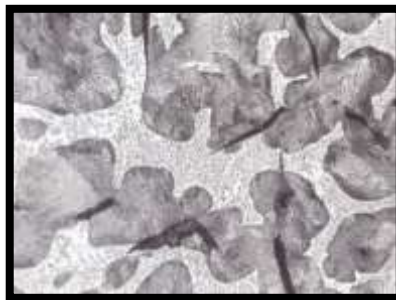


Ilustración 24. Steadita en una fundición con grafito laminar. [6]

4.1.2.6. Ledeburita.

La ledeburita es un compuesto de naturaleza eutéctica que se forma en el enfriamiento de las fundiciones a 1145 °C en el momento que termina la solidificación. Está formada por un 52% de cementita y un 48% de austenita saturada de carbono. En las fundiciones ordinarias, la ledeburita no existe a temperatura ambiente, ya que durante el enfriamiento la austenita se transforma en perlita y cementita. Sin embargo, debido al aspecto eutéctico con el que quedan las agrupaciones de perlita y cementita, es posible saber las zonas donde existió la ledeburita. [5][6][7][8]



Ilustración 25. Ledeburita. [6]

4.1.2.7. Austenita.

La austenita es una solución sólida intersticial de Carbono (C) en hierro gamma. Su estructura es cubica centrada en las caras y su composición química es variable. El contenido de Carbono (C) puede alcanzar hasta el 2,11% a 1148 °C, pero la austenita no es estable a temperatura ambiente. La austenita es dúctil, tenaz y no magnética. [6][7]

4.1.2.8. Martensita.

La martensita se obtiene del enfriamiento rápido de la austenita que cristaliza en un sistema tetragonal. Se trata de un constituyente extremadamente duro y frágil, que provoca que el mecanizado de las piezas de fundición con esta estructura sea sumamente dificultoso. [6][7]

4.1.2.9. Bainita.

La bainita se obtiene del enfriamiento continuo de la austenita, un enfriamiento menos brusco que en la martensita. Aparece en fundiciones aleadas con Níquel (Ni) y Molibdeno (Mo), y su enfriamiento debe hacerse de manera controlada hasta la temperatura ambiente. [6][7]

4.1.3. Clasificación.

La clasificación de las fundiciones puede realizarse en función de varios criterios como dureza, resistencia, aspecto frente a la fractura, presencia o no de grafito, etc.

La clasificación que se va a seguir en este caso es la que se recoge en la *Ilustración 26*.

| Fundiciones Ordinarias | Fundiciones Aleadas | Fundiciones Especiales |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Fundiciones Blancas• Fundiciones Grises• Fundiciones Atruchadas | <ul style="list-style-type: none">• Fundiciones Aleadas | <ul style="list-style-type: none">• Fundiciones Maleables• Fundiciones Dúctiles, Nodulares o Esferoidales |

Ilustración 26. Clasificación de las fundiciones [7]

Las fundiciones ordinarias son las que están compuestas casi exclusivamente por Hierro (Fe) y Carbono (C), mientras que las fundiciones aleadas además contienen otros elementos aleantes que provocan que sus propiedades se alteren. Por último, las fundiciones especiales surgen para reducir la fragilidad de las ordinarias, dotándolas de cierto grado de ductilidad. [7]

Con todo esto, nos vamos a centrar en las fundiciones que componen estos grandes grupos.

4.1.3.1. Fundiciones Blancas.

Las fundiciones blancas presentan una superficie de fractura blanca que le sirve de denominación. La presencia de Carbono (C) es del 2,5 al 3%, mientras que el contenido de Silicio (Si) es bajo (0,5%). Otros elementos también tienen presencia como el Manganeso (Mn) o el Azufre (S). La velocidad de enfriamiento de estas fundiciones es rápida y siguiendo el diagrama metaestable. Se obtiene como resultado, una fundición con ausencia de grafito, donde todo el Carbono (C) se encuentra combinado como cementita. Se tratan de fundiciones duras, resistentes al desgaste pero frágiles y con tendencia a la fisuración. Debido a su dificultad para mecanizarse y sus problemas de soldabilidad (también son denominadas insoldables), tienen poco interés industrial, empleándose solamente en piezas con necesidades de alta dureza, como ruedas de molinos o revestimientos de tolvas. [7][8][9][10]

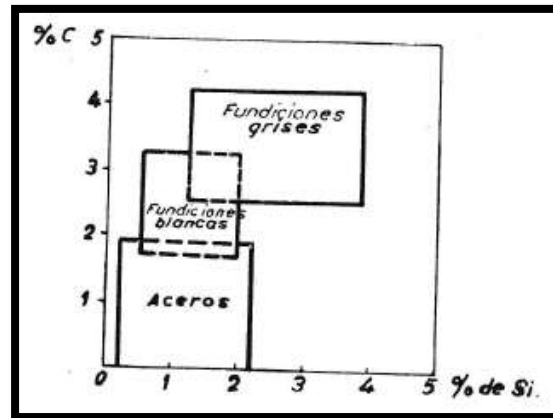


Ilustración 27. Composición de C y Si en aceros, fundiciones grises y blancas. [5]

4.1.3.2. Fundiciones Grises.

Las fundiciones grises toman este nombre por el color grisáceo de su fractura debido a la presencia del grafito, siendo las más utilizadas. Contienen cantidades de Carbono (C) entorno al 3-3,5%, de Silicio (Si) entre 1,5 y 2,2% o de Manganeso (Mn) del 0,4-1%. La aparición del grafito a partir del Carbono (C) se debe al poder de grafitización de algunos elementos como el Silicio (Si) o el Aluminio (Al), mientras que la presencia de Manganeso (Mn) o Azufre (S) desfavorece dicha grafitización. Una velocidad de enfriamiento lento siguiendo el diagrama estable también favorece la creación del grafito, el cual en este tipo de fundiciones es laminar.

El Carbono (C) en forma de grafito ocupa un volumen superior que cuando está combinado en forma de cementita. La presencia del grafito laminar produce discontinuidades en la matriz, que puede ser perlita, ferrita o mezcla de ambas; produciendo una nula resistencia que provoca que las piezas sean muy maquinables.

Siguiendo la clasificación ASTM A247, existen diferentes morfologías del grafito laminar, como se observa en la *Ilustración 28*.

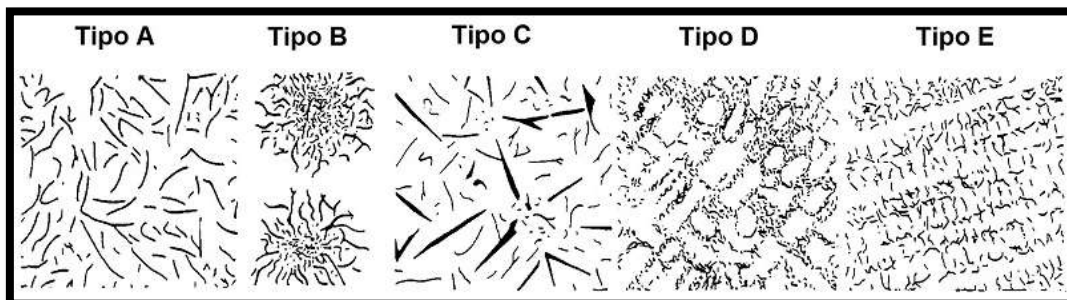


Ilustración 28. Morfologías del grafito laminar [9]

- Tipo A. Es el tipo más común, donde las láminas de grafito están distribuidas uniformemente pero sin ningún orden. Surge si los contenidos de Silicio (Si) y Fósforo (P) no son muy elevados, además de ser el que mejores características mecánicas tiene.
- Tipo B. El grafito tiene forma de rosetas, y está asociado a velocidades de enfriamiento altas, que provoca que las láminas de grafito crezcan radialmente. Disminuye la resistencia mecánica y surge en la superficie de las piezas con grafito laminar tipo A en su interior.
- Tipo C. Se tratan de láminas de grafito muy grandes y groseras que aparecen en las fundiciones de composición hipereutéctica. Presentan una superficie basta después del mecanizado, con alta resistencia al choque térmico, pero con débil resistencia a la tracción.
- Tipo D. Se trata de grafito interdendrítico de sobrefusión o grafito puntual. Surge en las fundiciones hipoeutécticas o eutécticas enfriadas a gran velocidad. Se distribuye en grandes cantidades de láminas muy pequeñas en los ejes de crecimiento de los cristales. Este tipo de grafito es desfavorable por su poca resistencia al desgaste.
- Tipo E. Se trata de grafito interdendrítico en forma de pequeñas láminas que se encuentran orientadas. Aparece en fundiciones muy hipoeutécticas y está relacionado con una sobrefusión menos característica.

Este tipo de fundición tiene una gran serie de propiedades mecánicas, como son las siguientes. Debido a la presencia del grafito, poseen capacidad de amortiguar vibraciones y tienen una elevada resistencia al desgaste. Son sensibles al efecto entalla, presentando una resistencia a la compresión más elevada que a tracción. Su temperatura de fusión es baja (entorno a 1200 °C) con un pequeño coeficiente de contracción en la solidificación provoca que se utilicen ampliamente en las piezas moldeadas. La presencia de grafito laminar facilita el mecanizado y permite que las piezas se puedan soldar. Estas fundiciones presentan elevada resistencia a la corrosión y al ataque químico en medios agresivos. [5][7][8][9][10]

4.1.3.3. Fundiciones Atruchadas.

Las fundiciones atruchadas se pueden considerar como una mezcla de las fundiciones anteriores, ya que tienen una matriz de fundición blanca combinada parcialmente con fundición gris. El motivo se debe a que en la solidificación, se sigue tanto el diagrama estable como el metaestable,

permitiendo que el Carbono (C) se encuentre como grafito y como cementita. Estas piezas son difíciles de mecanizar, y sus características varían en función de la mayor presencia de uno u otro componente. [8][9][11]

4.1.3.4. Fundiciones Aleadas.

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen elementos como Níquel (Ni), Cromo (Cr), Molibdeno (Mo), Aluminio (Al), Cobre (Cu), etc., en porcentajes suficientes para conseguir que las fundiciones grises varíen la forma del grafito y de esta forma mejorar las propiedades mecánicas de la fundición. Estos elementos también le pueden proporcionar propiedades especiales como alta resistencia al desgaste, a la corrosión, al calor o modificar la situación de los puntos críticos. Algunos elementos como el Silicio (Si), Aluminio (Al), Níquel (Ni) o Cobre (Cu) tienden a favorecer la grafitización, mientras que otros como el Cromo (Cr), Manganeso (Mn) o Molibdeno (Mo) tienden a disminuir la grafitización.

Dentro de las fundiciones aleadas podemos distinguir entre dos tipos, las fundiciones de baja y media aleación, donde el porcentaje total de elementos aleantes no supera el 5%, o las fundiciones de alta aleación, donde sí se supera ese porcentaje. [5][7][8][11]

4.1.3.5. Fundiciones Maleables.

Las fundiciones maleables se obtienen de las fundiciones blancas que son tratadas con un recocido para dotarlas de ductilidad y tenacidad. Para ello, se parte de una fundición totalmente blanca en todo su espesor, ya que la presencia de grafito laminar no se podría eliminar en el recocido y disminuirían las características mecánicas de la pieza. Existen dos tipos, la maleable europea o corazón blanco y la maleable americana o corazón negro.

La fundición maleable europea consiste un tratamiento de descarburación, donde se descompone la cementita y elimina todo el Carbono (C). La microestructura de estas fundiciones es totalmente ferrítica, aunque en piezas con grandes espesores pueden aparecer pequeños nódulos de grafito.

La fundición maleable americana tiene mayor cantidad de Silicio (Si) y consiste en un recocido donde el Carbono (C) de la cementita no se elimina, sino que precipita en forma de nódulos de grafito.

La fundición maleable americana requiere una técnica más precisa en composición y recocido que la europea, pero consiguen resistencias y alargamientos más elevados. Además, la americana puede alcanzar

espesores de 30 mm, mientras que la europea no conviene superar los 8 mm. [5][7][8][9]

4.1.3.6. Fundiciones Dúctiles, Nodulares o Esferoidales.

Este tipo de fundiciones se caracteriza por tener el grafito en forma de pequeñas esferas. La morfología esferoidal del grafito se consigue con la adición de elementos inoculantes como el Magnesio (Mg) o el Cerio (Ce) junto a elementos alcalinos y alcalinotérreos. La cantidad de Carbono (C) y Silicio (Si) suele ser ligeramente superior que en las fundiciones ordinarias. La presencia del grafito en forma de nódulos provoca que la matriz se interrumpa menos que con de grafito laminar, dotándola de una resistencia a la tracción y una tenacidad mayor que las fundiciones grises. Es por esto, por lo que el grafito esferoidal confiere unas propiedades mecánicas comparables a las de los aceros.

En caso de que la cantidad de inoculantes no sea suficiente, surge un grafito compacto, con una morfología intermedia entre el esferoidal y el laminar.

La similitud con las propiedades mecánicas de los aceros, su maquinabilidad, su facilidad y el ahorro económico en la producción está provocando que cada vez sea más utilizado a nivel industrial en todo tipo de piezas. [5][7][8][9][10][11]

4.1.4. Tratamientos térmicos.

En las fundiciones, al igual que en los aceros, se pueden realizar tratamientos térmicos para modificar las propiedades y su microestructura. Con estos tratamientos se va a realizar una profunda modificación estructural, principalmente de la matriz, ya que estos no afectan al grafito a menos que haya una gran cantidad de Carbono (C) en forma de cementita. El principio de los tratamientos térmicos se basa en un calentamiento, mantenimiento y enfriamiento de las fundiciones.

Existen tratamientos térmicos que no modifican la estructura de las fundiciones, pero solo nos vamos a centrar en los tratamientos que si modifican la estructura, siendo los siguientes los más importantes. [5][7][8]

4.1.4.1. Recocido.

El recocido es un tratamiento térmico que reduce la dureza, recupera la estructura o elimina las tensiones internas de las fundiciones. Mediante el recocido se consigue aumentar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad de

las piezas, que facilitan el mecanizado. El proceso consiste en calentar el material mediante una rampa de temperatura constante hasta obtener la temperatura de recocido, mantener la pieza a dicha temperatura durante el tiempo determinado (entre 30 minutos y varias horas en función del recocido) garantizando la uniformidad de la temperatura en toda la pieza, finalizando con un enfriamiento muy lento, normalmente en el interior del horno apagado. Dependiendo de la temperatura, su tiempo de mantenimiento, la velocidad de enfriamiento y del fin del recocido, existen varios tipos. [5][8][14][15]

- Recocido para eliminación de tensiones. Se realizan a temperaturas bajas (aprox. 550 °C), durante un periodo de entre 30 minutos y varias horas. Su propósito es eliminar las tensiones que aparecen por el rápido enfriamiento que sufren desde su solidificación. Las propiedades mecánicas no sufren variaciones pero se evitan deformaciones durante el mecanizado o su funcionamiento. Es importante que tanto la velocidad de calentamiento como la de enfriamiento sea muy lenta para evitar nuevas tensiones. [5][13][14]
- Recocido para ablandamiento. Este tratamiento se utiliza para facilitar el mecanizado en piezas que son muy duras. Las fundiciones grises se someten a recocidos de unos 740 °C con un enfriamiento al aire para modificar su microestructura, obteniendo ferrita y grafito que son de menor dureza. En fundiciones muy duras y atruchadas, la temperatura de recocido se encuentra entre 800 y 900 °C con enfriamientos muy lentos. [5][13][14]
- Recocido de maleabilización. Este tratamiento se utiliza en fundiciones totalmente blancas para obtener fundiciones maleables, ya que la presencia de grafito laminar no se puede eliminar. Con este tratamiento se obtienen piezas con buena resistencia y tenacidad, facilitando la maquinabilidad. [5][13][15]

4.1.4.2. Normalizado.

Se trata de un tratamiento térmico muy parecido al recocido. Las piezas se calientan entre 30 y 50 °C por encima de la temperatura crítica superior (entre 850 y 950 °C), manteniéndolas a esa temperatura hasta conseguir la transformación completa en austenita. El enfriamiento se produce al aire, siendo ligeramente más rápido que en el recocido. Con este tratamiento se consigue una estructura perlítica de grano fino y totalmente uniforme. Utilizando el normalizado, las piezas aumentan la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste. [6][8][13][14]

4.1.4.3. Temple.

El temple es un tratamiento térmico que suele ir acompañado de otro tratamiento como es el revenido, del que se hablará a continuación.

Este tratamiento térmico es interesante en fundiciones con matriz perlítica, donde se aumenta la dureza y se disminuye la resistencia a la tracción. Durante el temple, las piezas son calentadas a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior, manteniéndolas hasta obtener la transformación completa en austenita. Mediante un enfriamiento a una velocidad superior a la crítica, se consigue que la austenita se transforme instantáneamente en martensita. Este enfriamiento se produce mediante agua, aceite o polímeros, obteniendo una martensita acicular y muy fina. La dureza tras el temple depende exclusivamente del porcentaje de Carbono (C), aumentando en función este lo haga.

Como el objetivo principal de los temples es la obtención de estructuras martensíticas de dureza muy alta y difíciles de mecanizar, es necesario realizarle un tratamiento térmico de revenido. [5][6][8][13][14]

Existe un caso particular, donde la transformación martensítica se obtiene solo en la superficie de las piezas, llamado temple superficial. La superficie adquiere la dureza, mientras que el resto de la pieza mantiene las propiedades originales con menores tensiones que en un temple total. [6]

4.1.4.4. Revenido.

Se trata de un tratamiento térmico posterior al temple, que permite disminuir la dureza de las piezas. Esta disminución de la dureza está relacionada con el aumento de la temperatura del revenido. Con este tratamiento térmico, también se mejora la resistencia a tracción de las piezas hasta una temperatura de revenido de 500 °C. A partir de ese punto, la resistencia a tracción también disminuye. [5][6][8][13]

4.1.5. Defectos.

Las piezas de fundición pasan una serie de controles de calidad para comprobar cuales tienen defectos y deben ser descartadas. En las piezas de fundición suelen encontrarse una gran variedad de defectos, ya que es imposible tener un control preciso en todo momento que los evite. Muchos de estos defectos son fáciles de localizar, pero los internos necesitan de métodos de inspección especiales.

Los principales defectos de las fundiciones son los siguientes.

- Rechupes. Se tratan de cavidades que surgen en la pieza como consecuencia principal de la contracción a la hora de solidificar. Se deben principalmente al enfriamiento desigual, provocando una disminución del volumen. Se puede solucionar con mazarotas, diseños eficientes y controlando la temperatura de colada. [16][17][18]
- Llenado incompleto. El metal líquido no llena el molde completamente, obteniendo una pieza incompleta. Se debe a una temperatura baja del caldo o cantidad insuficiente de metal, que se puede evitar con un caldo más caliente o mayor número de alimentaciones. [16][17][18]
- Gota fría. Consiste en partículas metálicas incorporadas al metal pero sin formar parte de él. Surgen por salpicaduras del metal en el molde que solidifican rápidamente, evitando que se refundan con el resto del metal. El temple y la oxidación que sufren las hace muy duras. [16][17]
- Desplazamiento de cajas y machos. Consiste en el movimiento de ambos elementos, lo que provoca que la pieza no sea correcta. Se debe a fallos de colocación o choques con el metal en los machos y a un excesivo juego en las cajas. [16][17]
- Rebabas. Salientes de pequeño espesor sobre las piezas. Surgen por un incorrecto ajuste en las zonas de contacto de los moldes. [16][17]
- Penetraciones en el molde. El metal fundido penetra en las paredes del molde por el desprendimiento de la arena o por una insuficiente consistencia de la arena en ciertos puntos del molde. [16][17]
- Vitrificaciones. Se trata de inclusiones de arena en la pieza. Se debe a la fusión de los granos de la arena desprendidos dentro del propio metal. [16][17]

Existen otra serie de defectos como son los poros, sopladuras o fisuras que se deben principalmente a la formación de gases en el metal líquido. La necesidad de trabajar con elevadas temperaturas durante el proceso de fundición favorece la reacción entre distintos elementos que forman gases en el metal fundido. Una vez que el metal está dentro de los moldes, estos gases producen burbujas. Si el proceso de solidificación es largo, estas burbujas pueden desplazarse hacia los bordes y ser absorbidas por el molde sin producir defectos. El problema surge cuando las burbujas aparecen instantes previos a la solidificación, quedando atrapadas dentro la pieza. Es entonces cuando aparecen como resultado poros, fisuras o sopladuras. En la formación de los poros, el oxígeno tiene un papel importante ya que reacciona con abundantes elementos, formando burbujas que no pueden abandonar el metal y crean estos orificios. Las sopladuras suelen ser agrupaciones de poros que acaban formando una cavidad dentro del metal. Sin embargo, las

fisuras se tratan de grietas principalmente superficiales que están relacionadas con la solubilidad del nitrógeno. La presencia de ciertos elementos influye en los procesos de saturación, provocando la aparición de estas grietas. [19]

También se consideran defectos de las fundiciones, los defectos en cuanto a la morfología del grafito o a la estructura matricial, destacando los siguientes.

- La presencia de grafito vermicular se trata de una falta de formación de esferoides. Su presencia significa una disminución de las características mecánicas del material.
- En las piezas con grafito esferoidal, suele aparecer grafito laminar en su superficie como consecuencia de la reacción del Magnesio (Mg) del metal y del Azufre (S) de la arena. La importancia de este defecto varía con el espesor de esta capa, ya que reduce las propiedades mecánicas de la superficie como dureza, ductilidad o resistencia a la tracción.
- La flotación del grafito es otro de los defectos de las fundiciones esferoidales. Consiste en una concentración masiva de grafitos esferoidales de tamaño grosero que suelen aparecer en la parte superior de la pieza, reduciendo las características mecánicas en las zonas donde se presentan. [6][18]

En la medida de lo posible, es importante tener un conocimiento sobre estos defectos y sus características que permitan eliminarlos o minimizarlos en la fabricación de nuevas piezas. Es por eso que en la actualidad, las simulaciones son una herramienta que están ayudando a prevenir muchos defectos de las fundiciones. Suelen utilizarse dos tipos de simulaciones, que provocan importantes avances en la fundición.

- Simulación de la solidificación. Esta simulación tiene como variables de entrada la geometría de la pieza, su composición química, la temperatura del metal y el molde, entre otros parámetros. Los resultados que se obtienen permiten visualizar los principales defectos, así como los tiempos de solidificación. De esta manera se puede plantear de manera exitosa los diseños y ubicaciones de las mazarotas, evitando el sobredimensionamiento de las mismas. Con la iteración de simulaciones se pueden obtener piezas sin defectos.
- Simulación de llenado de molde. Durante el llenado del molde con el metal líquido, este puede solidificar antes de que se llene la totalidad de la cavidad. Este fenómeno suele darse en las fundiciones de espesores pequeños. Mediante la simulación, este defecto se puede corregir modificando el sistema de alimentación. [20]

4.2. Influencia de los elementos de aleación en las fundiciones.

Las fundiciones se tratan de aleaciones de Hierro (Fe), Carbono (C) y Silicio (Si) principalmente. Pero como ocurre en los aceros, existen otros elementos que se encuentran en menor medida, proporcionando a las fundiciones diferentes características en función de su presencia. En esta apartado nos vamos a centrar en conocer la mayoría de los elementos que forman las fundiciones, la influencia que tienen y sus valores deseados.

4.2.1. Carbono (C).

El Carbono (C) es uno de los elementos más importantes de las fundiciones junto al Hierro (Fe). Dentro de ellas, el Carbono (C) se encuentra formando grafito, el cual reduce la contracción durante la solidificación y facilita el mecanizado; o bien combinado como cementita, que aumenta la resistencia y dureza en función del porcentaje del Carbono (C) presente. Se entiende como carbono total, a la suma de grafito y cementita dentro de las fundiciones.

En las fundiciones grises, la presencia del Carbono (C) suele oscilar entre 3 y 3,5 %. En la *Ilustración 29* se recoge la composición de carbono total de los hierros comerciales donde varía entre el 2,5 y 4 %. Como se puede observar en la *Ilustración 30*, pequeñas variaciones de Carbono (C) provoca que las fundiciones pasen de gris a blanca o viceversa. [5][21][23][25]

| Tipo de hierro | Carbono total (%) | Silicio (%) | Resistencia a la tracción (MPa) |
|----------------|-------------------|-------------|---------------------------------|
| Clase 20 | 3,40 – 3,60 | 2,30 – 2,50 | 138 |
| Clase 30 | 3,10 – 3,30 | 2,10 – 2,30 | 207 |
| Clase 40 | 2,95 – 3,15 | 1,70 – 2,00 | 276 |
| Clase 50 | 2,70 – 3,00 | 1,70 – 2,00 | 345 |
| Clase 60 | 2,50 – 3,85 | 1,90 – 2,10 | 414 |

Ilustración 29. Composición de C y Si en los hierros comerciales. [25]

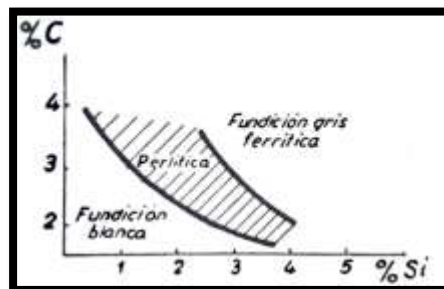


Ilustración 30. Diagrama de Norbury en piezas de 25mm de espesor. [5]

- Carbono equivalente. Se trata de un concepto que se aplica fundamentalmente a las fundiciones grises, donde el Silicio (Si) y el Fósforo (P) sustituyen a una parte del Carbono (C). Su expresión es la siguiente.

$$\%CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Ilustración 31. Ecuación del Carbono Equivalente. [23]

Las fundiciones grises con un carbono equivalente del 4,3 % son consideradas de composición eutéctica, donde la colabilidad es máxima y las contracciones son mínimas. La mayoría de fundiciones grises tienen un carbono equivalente inferior al 4,3% y son consideradas hipoeutécticas. Sin embargo, si la cantidad de carbono es superior al 4,3, se consideran hipereutécticas.

El aumento del carbono equivalente tiene como consecuencia el aumento del tamaño del grafito que provoca que la templabilidad y la resistencia mecánica disminuyan. [21][23][25]

4.2.2. Silicio (Si).

El Silicio (Si) tiene influencia en las piezas de fundición. Su principal característica es la contribución a formación del grafito, ya que se trata de un elemento muy grafitizante. Si su presencia esta en pequeñas cantidades, su influencia es escasa, produciendo principalmente fundiciones blancas, donde el Carbono (C) está en forma de cementita. Sin embargo, en las fundiciones grises si tiene una elevada influencia, al igual que la velocidad de enfriamiento. Su contenido se adapta a la sección de la pieza, con valores normales variando entre un 0,6 y 3,5 %, siendo los valores de la *Ilustración 29* los habituales en los hierros comerciales. Su presencia facilita la solidificación siguiendo el diagrama estable hierro-grafito, disminuyendo la estabilidad de la cementita. En las fundiciones no se puede observar directamente en la microestructura, encontrándose disuelto en la ferrita y favoreciendo su formación. [5][21][23][25]

4.2.3. Azufre (S).

El Azufre (S) es un elemento que tiende a favorecer la formación de cementita, oponiéndose a la producción de grafito en las fundiciones. El Azufre (S) forma con el Hierro (Fe) un eutéctico Fe-FeS, solidado a 988 °C y muy rico en FeS. El FeS segrega en las juntas de grano, lo que provoca que

aumente la dureza y fragilidad de la fundición. Otra de las consecuencias de este compuesto es la reducción de la fluidez y ocasionar cavidades en forma de gas retenido. [23][25]

El Azufre (S) y el Manganeso (Mn) tienen una enorme afinidad entre ellos. Ambos elementos se combinan formando sulfuro de manganeso (MnS), sin ninguna influencia directa en la formación de grafito o cementita. Indirectamente si facilita la formación de grafito, ya que añadiendo Manganeso (Mn) a una fundición con presencia de Azufre (S), se elimina la oposición a la grafitización. El MnS no provoca inconvenientes en las propiedades mecánicas de las fundiciones, formando inclusiones grises hexagonales aisladas de la estructura. [5][22][25]

Sin embargo, la presencia de Azufre (S) en valores aproximados del 0,05 al 0,12% tiene un beneficio óptimo. En estas proporciones, el Azufre (S) juega un papel muy importante en la nucleación del grafito dentro de las fundiciones grises. [21][23]

El conocido como temple invertido, es consecuencia de la presencia del Azufre (S) formando FeS. Este sulfuro de hierro se blanquea y dota de dureza a la zona central de la pieza, mientras que la periferia tiene estructura de fundición gris. [5][22][23]

4.2.4. Manganeso (Mn).

El Manganeso (Mn), al igual que el Azufre (S), es un elemento que se opone a la formación de grafito y favorecer la formación de cementita. Por lo tanto, blanquea las fundiciones y aumenta su dureza. Su principal función es la de fijar o neutralizar al Azufre (S) y formar sulfuro de manganeso (MnS), como se ha comentado en el apartado anterior. La presencia de Azufre (S) y Manganeso (Mn) en valores altos suelen provocar sopladuras, provocando que la temperatura de vertido sea superior para evitarlas. Los contenidos de Manganeso (Mn) suele oscilar entre 0,4 y 1%, siguiendo la ecuación de la *Ilustración 32*. [5][21][22][23][25]

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

Ilustración 32. Relación óptima de Mn y S para formar MnS. [23]

4.2.5. Fósforo (P).

El Fósforo (P) es un elemento presente principalmente en las fundiciones grises. No ejerce ninguna influencia en la formación del grafito, aunque en

general se opone ligeramente a ella. La presencia del Fósforo (P) se debe esencialmente a la mejora de la colabilidad que ofrece a las fundiciones. La fluidez que otorga se debe a la formación de steadita, que contiene prácticamente la totalidad de Fósforo (P) de la composición. La steadita tiene un punto de fusión relativamente bajo (960 °C), de mucha dureza y fragilidad, que se encuentra en los bordes de grano. A niveles altos, suele originar porosidad de contracción, sin embargo a niveles bajos, aumenta la colabilidad que facilita la penetración del metal en el molde. Los valores óptimos de Fósforo (P) en las fundiciones se encuentran en el rango del 0,02 al 0,1%. [5][21][23][25]

4.2.6. Molibdeno (Mo)

El Molibdeno (Mo) es un elemento que se opone ligeramente a la formación del grafito. Se suele utilizar en muchas fundiciones, teniendo importancia principalmente en las fundiciones nodulares. La presencia de Molibdeno (Mo) en estas fundiciones provoca un aumento de la resistencia y en su dureza. Contenidos altos afectan a la distribución y morfología de los nódulos de grafito, consiguiendo nódulos deformes. Sin embargo, en cantidades bajas no les afecta, con valores menores al 0,05%. La perlita y la ferrita presentan poca solubilidad del Molibdeno (Mo), aunque este es promotor de la fase perlítica y aumenta la templabilidad del material. [5][21][22][26]

4.2.7. Aluminio (Al).

El Aluminio (Al) es un elemento que tiene una importante influencia en la formación del grafito, pero no tanta como el Silicio (Si). El Aluminio (Al) aumenta la estabilidad de la ferrita y promueve su formación. Se disuelve en ella, endureciéndola y aumentando su resistencia. En cantidades muy elevadas (superiores al 4%), el Aluminio (Al) no favorece la formación de grafito. En las fundiciones grises, su contenido suele ser muy bajo (menor al 0,03%), ya que con estas cantidades suele fomentar la formación de porosidades de hidrogeno. Su gran afinidad con el Oxígeno (O) provoca la aparición de poros tras la solidificación, por lo que es importante controlar que su contenido se mantenga en valores muy bajos. [5][19][21][28]

4.2.8. Cobre (Cu).

El Cobre (Cu) es un elemento que favorece ligeramente la formación de grafito y promueve la formación de perlita, ya que es fuertemente antiferritizante. Con su presencia, también se produce una cierta estabilidad de la austenita.

Las fundiciones que lo contienen, registran un aumento de la dureza, mejorando sus propiedades mecánicas, la resistencia al desgaste y a la corrosión. Cuando tenemos cantidades superiores al 3%, la resistencia a tracción empieza a disminuir, pero no influye en el resto de propiedades mecánicas. Sin embargo, en fundiciones grises y nodulares, el valor máximo recomendado es del 0,7%. Debido a su bajo precio, se suele utilizar para sustituir al Níquel (Ni). [5][22][24][29][30]

4.2.9. Cromo (Cr).

El Cromo (Cr) es un elemento que evita la formación de grafito y estabiliza la cementita. Este elemento tiende a fomentar la formación de perlita y la de carburos. Por estos carburos es por lo que su presencia se limita a un máximo de 0,5%, evitando que aparezcan durante la solidificación. Su presencia en las fundiciones aporta sus propiedades de dureza y de resistencia al desgaste, pero necesita de otros elementos para hacerlo, ya que por sí solo no puede. [5][22][24][29]

4.2.10. Níquel (Ni).

El Níquel (Ni) es un elemento que facilita la formación del grafito, siendo su acción inferior a la del Silicio (Si), y disminuye la estabilidad de los carburos. Su presencia produce un endurecimiento de la ferrita, aumentando la resistencia de la matriz además de reducirse el tamaño de grano y el de las láminas de grafito. Mejora la maquinabilidad de las fundiciones, ya que evita la formación de función blanca en las esquinas o piezas de poco espesor. Estas propiedades surgen con contenidos de Níquel (Ni) inferiores al 0,5%, siendo su contenido superior en fundiciones aleadas. [5][21][22][24][27]

4.2.11. Vanadio (V).

El Vanadio (V) es, junto a otros elementos, un elemento residual dentro de las fundiciones. Es un elemento que se opone a la formación de grafito, promoviendo la formación de perlita y de carburos. Recientemente se ha sugerido como elemento de aleación menor en las fundiciones grises, ya que produce un incremento considerado de la dureza y de la resistencia a tracción. Suele provenir de las chatarras de la automoción, siendo sus valores indicados como elemento residual inferiores al 0,08% [21][22][30]

4.2.12. Oxígeno (O).

El Oxígeno (O) es un elemento que se encuentra presente en la mayoría de las fundiciones. El Oxígeno (O) está relacionado con la presencia de porosidades de gas en las piezas fundidas debido a la capacidad de oxidación que tiene. Son muchos los elementos que reaccionan con él, produciendo una gran cantidad de óxidos perjudiciales en la fundición, que al final acaban convirtiéndose en burbujas de gas que provocan poros. Su contenido varía entre 0,002 y 0,02%, siendo muy importante los procesos de desoxidación. [5][19]

4.2.13. Hidrógeno (H).

El Hidrógeno (H) es un elemento que suele aparecer en la mayoría de las fundiciones. No se suele añadir como elemento al metal base, y surge principalmente por la humedad que existe en los moldes de arena. Son muchos los elementos, principalmente el Aluminio (Al) y el Silicio (Si), que reaccionan con el vapor de agua proveniente de los moldes, generando Hidrógeno (H). La presencia del Hidrógeno (H) en las fundiciones da lugar a la formación de poros en su interior. [5][19][21]

4.2.14. Nitrógeno (N).

El Nitrógeno (N) es otro elemento que suele originar defectos en las piezas. Su origen radica en la diferencia de solubilidad que tienen las aleaciones de Hierro (Fe) al pasar del estado líquido al sólido. El Nitrógeno (N) se vuelve muy insoluble en el metal líquido a bajas temperaturas, formando fisuras si no consigue abandonar el metal antes de que este solidifique. Su presencia puede ser neutralizada por el Aluminio (Al) o el Titanio (Ti). [19][21]

4.3. Reciclaje de metales en las fundiciones.

El reciclaje está cada vez más presente en todos los ámbitos, incluido el reciclaje de los metales. El metal reciclado supone un importante ahorro de recursos. La contaminación y los desechos de la minería se reducen hasta un 70%, ya que la mayoría de los materiales metálicos se pueden reciclar muchas veces sin perder sus propiedades. También supone una enorme reducción de consumo de energía respecto a materiales vírgenes, además de reducir la contaminación del agua y del aire.

La gran mayoría de los metales se pueden reciclar, como son el caso del Hierro, Acero, Aluminio, Cobre, Bronce o Latón. Sin embargo, otros metales no se pueden reciclar por haber sido contenedores de pinturas, residuos tóxicos o aerosoles.

Estos metales no pueden ser fundidos directamente para realizar nuevas piezas, necesitan una serie de fases o procesos para estar preparados para utilizarse.

- **Recolección.** Los residuos son recuperados y almacenados por empresas especializadas, pagando a los dueños de las chatarras por ellas.
- **Separación.** Este proceso consiste en clasificar y separar las chatarras obtenidas. Se separan los plásticos, maderas o piezas oxidadas del resto de metales en buen estado.
- **Preparación y trituración.** Los metales separados son compactados para facilitar su manejo. Tras ello, se trituran de tal manera que se reduce el volumen y se ahorra energía a la hora de ser fundidos de nuevo.

Una vez triturados, los siguientes procesos se pueden alternar. O se tratan y purifican para ser fundidos o son fundidos con una purificación posterior.

- **Tratamiento previo a la fundición.** Los residuos sufren una serie de tratamientos químicos como imantaciones, corriente de inducción o flotación en medios densos entre otros, que permite obtener clasificaciones en función de sus calidades. Tras esto, el material es transportado a las fundiciones, actuando como materia prima para generar nuevos productos.
- **Tratamiento posterior a la fundición.** Los residuos triturados son fundidos y luego pasan por un proceso de purificación para conseguir metales libres de impurezas. Consiste en eliminar restos de materiales indeseados mediante electrolisis o mecanismos magnéticos con un

posterior enfriamiento que deja a los metales listos para ser reutilizados. [31][32][33]

El aluminio es uno de los metales donde su reciclaje es muy sencillo y se puede realizar de manera indefinida. Utilizar aluminio reciclado supone reducir el 95 % tanto en el dióxido de carbono que se produce como en la energía necesaria respecto a los materiales vírgenes. Con una limpieza mecánica y química para eliminar otras sustancias, el metal está listo para fundir de nuevo. [34][35]

El cobre es otro metal que se puede reciclar en su totalidad sin perder sus características. Se puede fundir directamente si se trata de cobre puro, comprobando su estado mediante un análisis químico cuando está en estado líquido. Las aleaciones como el bronce o el latón, se funden para obtener nuevas aleaciones. [36]

La escoria que es retirada durante el proceso de fusión también puede ser reciclada. Se procesa con la intención de recuperar las partes de metal que pueden ser reutilizadas en procesos de fundición. La escoria en estado sólido se tritura y se obtiene el metal mediante una separación mecánica en seco. Otra aplicación de la escoria, pero en forma granulada, es la de materia prima en carreteras, hormigones y cementos, ya que presenta buenas propiedades piroclásticas y mecánicas. [37][38]



Ilustración 33. Ciclo del reciclaje. [32]

5. Análisis de datos.

Este capítulo está dedicado a realizar análisis sobre los datos que Lingotes Especiales S.A. nos ha proporcionado. Se tratan de unas bases de datos sobre los hornos de fusión, donde se recogen los valores obtenidos a lo largo del año 2020 de la composición química.

La preparación de los datos es un trabajo previo al análisis, teniendo una importancia elevada dentro de la minería de datos. Los datos que se obtienen suelen tener elevadas líneas de información indeseada que se deben limpiar. Dentro de la preparación también está la ordenación de datos, ensamblarlos o la realización de los tratamientos necesarios para efectuar los análisis oportunos.

En el Apartado 3.7., se hace referencia de que al caldo fundido se le realizan unas muestras para analizar su composición química. Los resultados obtenidos, son los datos sobre los que vamos a realizar el estudio.

Para comprobar la composición química, se realizan dos experimentos diferentes referenciados también en el Apartado 3.7., como son el Espectrómetro y el Carbodeterminador, proporcionando una base de datos cada uno.

- Espectrómetro.

Este experimento se realiza para obtener la composición de todos los elementos presentes en el caldo.

Se necesita solidificar una pequeña medalla del caldo del metal fundido que una vez solidificado, se le puede realizar el análisis. La composición se mide mediante dos pinchazos eléctricos sobre la medalla, quedando registrado en la base de datos la media de ambas medidas.

Cada muestra que es sometida al Espectrómetro registra en la base de datos estas características: el código interno de la pieza, la fecha y hora del estudio, las siglas del analista, el horno de fusión y los valores de los elementos de la muestra analizada, como se puede observar en la *Ilustración 34*.

| Codigo | Fecha | Hora | Analista | Horno | C | Si | MN | P | S | CR |
|--------|-----------|----------|----------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 8045 | 07-ene-20 | 4:43:40 | SG | H11 | 3,83 | 2,09 | 0,05 | 0,025 | 0,013 | 0,017 |
| 8045 | 07-ene-20 | 7:28:50 | DS | H11 | 3,63 | 2,51 | 0,07 | 0,025 | 0,019 | 0,019 |
| 7868 | 08-ene-20 | 1:54:40 | FS | H11 | 3,76 | 2 | 0,26 | 0,025 | 0,014 | 0,018 |
| 7929 | 08-ene-20 | 9:20:00 | D8 | H11 | 3,59 | 1,96 | 0,24 | 0,025 | 0,012 | 0,02 |
| 8036 | 09-ene-20 | 4:37:04 | FS | H11 | 3,69 | 1,81 | 0,23 | 0,022 | 0,012 | 0,02 |
| 8212 | 09-ene-20 | 9:20:30 | D8 | H11 | 3,71 | 1,74 | 0,24 | 0,021 | 0,01 | 0,02 |
| 7718 | 09-ene-20 | 22:36:52 | SG | H11 | 3,2 | 1,88 | 0,65 | 0,025 | 0,116 | 0,106 |
| 7718 | 09-ene-20 | 23:56:10 | SG | H11 | 3,16 | 1,97 | 0,63 | 0,025 | 0,107 | 0,113 |
| 8040 | 10-ene-20 | 0:32:14 | SG | H11 | 3,26 | 2,02 | 0,64 | 0,025 | 0,101 | 0,125 |
| 8040 | 10-ene-20 | 1:01:14 | SG | H11 | 3,25 | 2,06 | 0,64 | 0,028 | 0,101 | 0,132 |

Ilustración 34. Información proporcionada por el Espectrómetro.

Los elementos presentes en el caldo de metal fundido que analiza el Espectrómetro son los siguientes: Carbono (C), Silicio (Si), Manganeso (Mn), Fósforo (P), Azufre (S), Cromo (Cr), Estaño (Sn), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Titanio (Ti), Aluminio (Al), Vanadio (V), Niobio (Nb), Plomo (Pb), Boro (B), Zirconio (Zr), Antimonio (Sb), Cerio (Ce), Magnesio (Mg) y Zinc (Zn).

- Carbodeterminador.

Este experimento sirve únicamente para obtener los valores de la composición del Carbono (C) y del Silicio (Si).

En el Carbodeterminador se introduce una pequeña muestra de caldo líquido que se deja enfriar. Este muestra en una pantalla dentro de la cabina de control los valores de ambos elementos, que son introducidos a la base de datos. Este experimento se realiza con mayor frecuencia que el del Espectrómetro, debido a la rapidez y facilidad de realización, además de la necesidad de controlar ambos elementos.

En dicha base de datos se registran estas características: el horno de fusión, fecha y hora del análisis, elemento analizado con su valor y el código interno de la pieza, como se observa en la *Ilustración 35* para el Carbono (C).

| horno id | fecha dte | variable id | valor nbr | referencia_id |
|----------|------------------|-------------|-----------|---------------|
| 11 | 07/01/2020 7:22 | C | 3,85 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 8:30 | C | 3,85 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 9:22 | C | 3,77 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 10:06 | C | 3,78 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 10:47 | C | 3,85 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 11:30 | C | 3,77 | 8045 |
| 11 | 07/01/2020 12:13 | C | 3,81 | 8041 |
| 11 | 07/01/2020 12:54 | C | 3,79 | 8041 |

Ilustración 35. Información del Carbodeterminador para el Carbono (C).

Existe otra base de datos proporcionada por la empresa, las Gamas de especificaciones. En esta base de datos están recogidos todos los códigos internos de las piezas. Para cada código, se recogen el límite de trabajo superior e inferior, la especificación del cliente inferior y superior además del objetivo de los principales elementos que componen la composición química. Los elementos que se recogen en las gamas son el Carbono (C), Silicio (Si), Manganeso (Mn), Azufre (S), Fósforo (P), Estaño (Sn), Cromo (Cr), Molibdeno (Mo) y Níquel (Ni), como se puede observar en la *Ilustración 36*. A cada

código, también le corresponde un tipo de caldo (Tcaldo), perteneciente a otra clasificación.

| GAMA/HORNO | | C | Si | MN | S | P | SN | Cr | Mo | Ni | TCAIDO |
|------------|------------------|------|-----|------|------|------|------|----|----|------|--------|
| 6567 | Lim trabajo inf. | 3,6 | 2,3 | 0,4 | 0,07 | 0 | 0,04 | | | 0,4 | 4 |
| | Lim trabajo sup | 3,8 | 2,5 | 0,55 | 0,1 | 0,06 | 0,06 | 10 | 10 | 0,55 | |
| | Esp. Cite inf. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | |
| | Esp. Cite sup. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | |
| | Objetivo | 3,7 | 2,4 | 0,45 | 0,09 | 0 | 0,05 | | | 0,45 | |
| 6733 | Lim trabajo inf. | 3,25 | 1,8 | 0,6 | 0,07 | 0 | 0,07 | 8 | | 0,6 | 2 |
| | Lim trabajo sup | 3,45 | 2 | 0,8 | 0,12 | 0,04 | 0,1 | 20 | 4 | 0,8 | |
| | Esp. Cite inf. | 3,2 | 1,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | | | 0,5 | |
| | Esp. Cite sup. | 3,5 | 2,4 | 0,9 | 0,15 | 0,1 | 0,12 | 35 | 5 | 0,9 | |
| | Objetivo | 3,35 | 1,9 | 0,65 | 0,1 | 0 | 0,09 | 13 | | 0,65 | |

Ilustración 36. Gama de especificaciones.

Dentro de estas tres bases de datos, se recogen toda la información correspondiente a las composiciones químicas de las tres naves o zonas fusoras. Principalmente vamos realizar todos los análisis sobre la zona fusora A2, la cual contiene los hornos 21 y 22. Estos hornos son los más grandes, con mayor capacidad de aspiración de humos, siendo también los más utilizados. El resto de hornos se utilizaran en ciertos análisis donde se analicen las zonas fusoras.

5.1. Estudio de Carbodeterminador y Espectrómetro.

Este estudio se realiza para comprobar que los valores obtenidos mediante el Espectrómetro para el Carbono (C) y el Silicio (Si) no son fiables, siendo necesario realizar el experimento del Carbodeterminador para dichos elementos.

Durante este estudio nos vamos a centrar en los hornos 21 y 22, eligiendo los tres códigos con más muestras realizadas por ambos experimentos a lo largo del año 2020.

La preparación de los datos, como ha sido comentado anteriormente, es un paso importante antes de realizar cualquier análisis. Los experimentos se han realizado en la mayoría de casos simultáneamente, sin embargo, en ocasiones solo ha sido realizado uno. Por ello, es importante quedarnos con las muestras que se han tomado simultáneamente por ambos experimentos, descartando el resto de muestras.

Una vez que tenemos las muestras por ambos métodos, vamos a realizar un estudio comparando ambos valores y si cumplen los límites de trabajo.

5.2. Estudio del Carbono (C) y del Silicio (Si).

Este estudio se realiza únicamente con los datos aportados por el Carbodeterminador, debido a la precisión de sus medidas para el Carbono (C) y el Silicio (Si).

Durante el estudio, nos volvemos a centrar en los hornos 21 y 22. Además de volver a utilizar los tres códigos con más medidas tomadas a lo largo del año 2020. Las medidas utilizadas en este caso se encuentran dentro de los límites de trabajo, descartando las que se encuentran fuera de ellos. Las medidas que se descartan se deben a que los hornos en el momento de la toma de datos, se reajustaron para cumplir con los límites sin una nueva comprobación de la composición.

El estudio está basado en tres investigaciones diferentes para ambos elementos mediante el software Minitab.

5.2.1. Histogramas.

Realización de histogramas para cada código y elemento por horno, para observar si los valores obtenidos se ajustan a una distribución normal.

5.2.2. Distribuciones.

En este caso tomamos cuatro distribuciones diferentes para buscar la que mejor se ajuste a los datos.

Estas distribuciones están formadas por intervalos de confianza del 95%, interesando que los valores se encuentren dentro de ellos. [39]

5.2.3. Gráficos de control.

Realizar gráficos de control para determinar si los análisis son estables o no lo son.

El gráfico comprende dos vistas diferentes del mismo proceso. El superior muestra los datos sin procesar mostrando su ubicación en el proceso. Sin embargo el inferior, se trata de un gráfico de rangos móviles. Esto se debe a que se representa la diferencia entre un punto y el punto anterior, mostrando la variación del proceso. Con ambas se puede analizar visualmente la estabilidad del proceso.

Las líneas centrales muestran el valor promedio de los valores, mientras que las otras líneas muestran los límites de control, los cuales no se deben cruzar en un proceso estable.

No se deben confundir los límites de control con los de tolerancia, ya que los de tolerancia los marcan los clientes mientras que los de control son límites naturales de la variación del proceso. No se deben representar en estas gráficas los límites de tolerancia para evitar errores. [39]

5.3. Estudio de elementos residuales.

Este estudio consiste en analizar las diferencias significativas entre las zonas fusoras de ciertos elementos residuales. Para ello, del Espectrómetro se escogen cuatro elementos residuales como el Vanadio (V), el Niobio (Nb), el Boro (B) y el Zinc (Zn). En este estudio se van a analizar las tres zonas fusoras, con todas las mediciones realizadas a lo largo del año 2020.

5.4. Estudio de los analistas.

En este estudio se va a realizar un análisis a los analistas que se encargan de comprobar las composiciones químicas. Para ello, tomamos los valores de un código del Espectrómetro. Se escogen tres analistas por cada zona fusora que hayan tomado cinco muestras a lo largo del año 2020.

Por lo tanto, se realiza para cada zona fusora un análisis R&R para cada elemento. Los elementos analizados son el Manganeso (Mn), el Fósforo (P) y el Azufre (S).

5.5. Estrategia de control de la producción.

En los hornos de fusión es normal que se fundan a la vez caldo de metal fundido para dos clientes. Esto provoca que los analistas de la composición química tengan que estar calculando que el caldo se encuentre dentro de los límites de control de ambos clientes.

Por ello, se busca una aplicación que facilite este trabajo a los analistas, en la que metiendo el código de ambos clientes se obtenga los límites de trabajo donde se debe trabajar.

6. Análisis de resultados

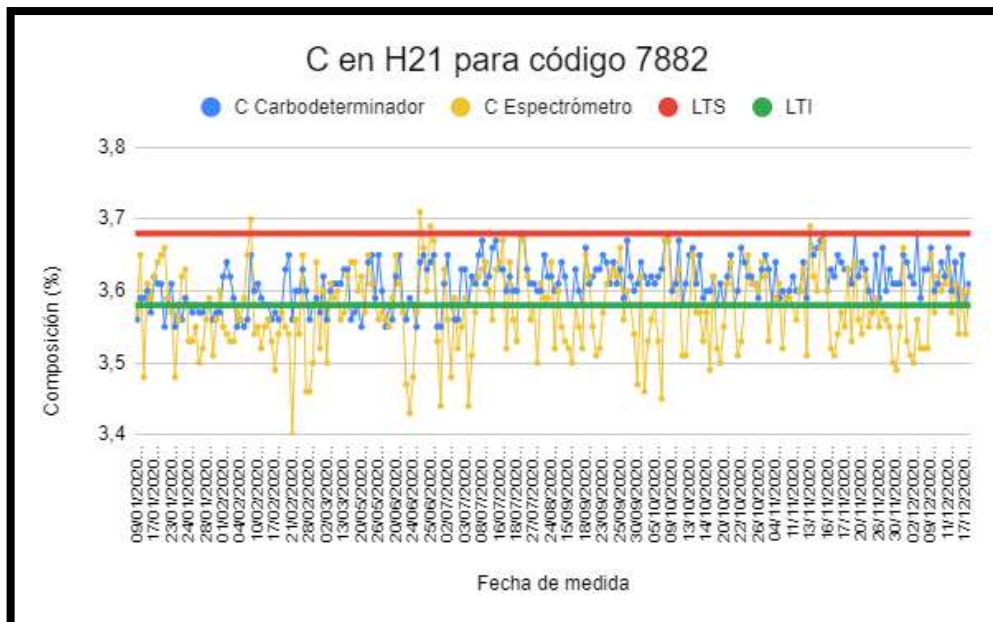
6.1. Resultados del estudio de Carbodeterminador y Espectrómetro.

Como se ha comentado anteriormente, este estudio consiste en comparar los valores obtenidos de Carbono (C) y Silicio (Si) mediante el Carbodeterminador y el Espectrómetro para la misma muestra.

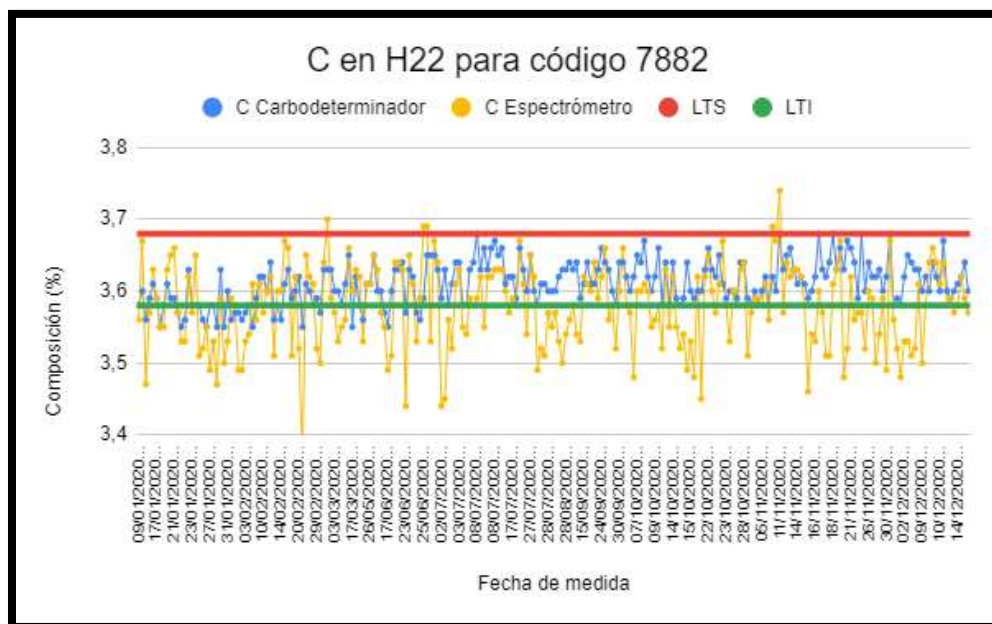
Los códigos elegidos tienen más de 200 muestras a lo largo del año 2020, siendo el 7882, 8075 y 8224.

- Código 7882.

Las *Gráfica 1* y *Gráfica 2*, representan los valores de Carbono (C). En ambas gráficas se puede observar que los valores tomados por el Carbodeterminador se encuentran la mayoría dentro de los límites de trabajo. Sin embargo, los tomados por el Espectrómetro se encuentran tanto dentro como fuera de ellos, tomando valores muy diversos.

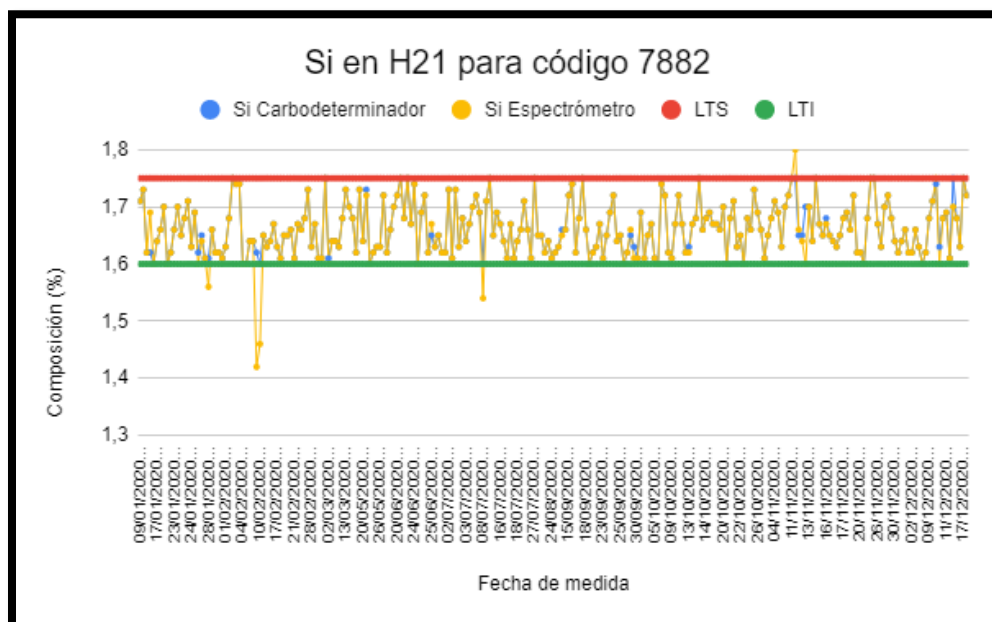


Gráfica 1. Carbono (C) presente en el código 7882 del horno 21.

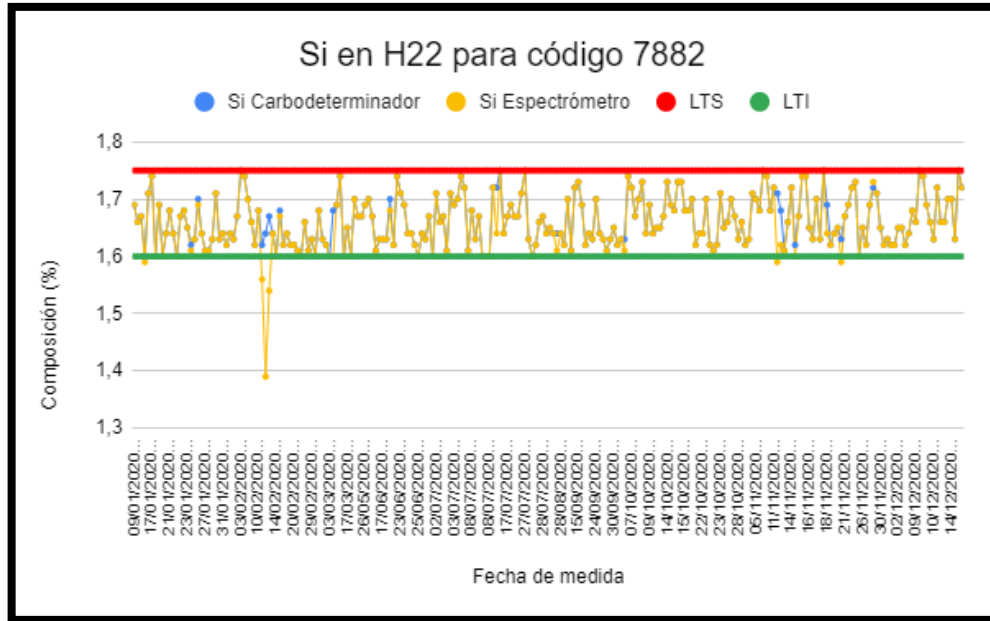


Gráfica 2. Carbono (C) presente en el código 7882 del horno 22.

Las Gráfica 3 y Gráfica 4 representan los valores de Silicio (Si). En ellas, se puede observar como los valores obtenidos, tanto como por el Carbodeterminador como por el Espectrómetro se encuentran dentro de los límites de trabajo, siendo los valores prácticamente semejantes.



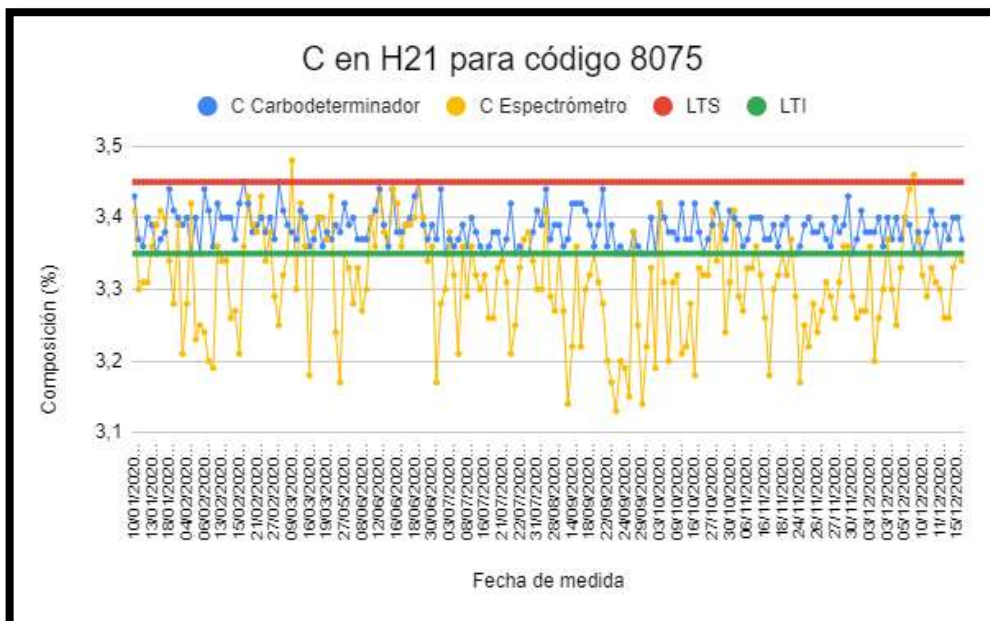
Gráfica 3. Silicio (Si) presente en el código 7882 del horno 21.



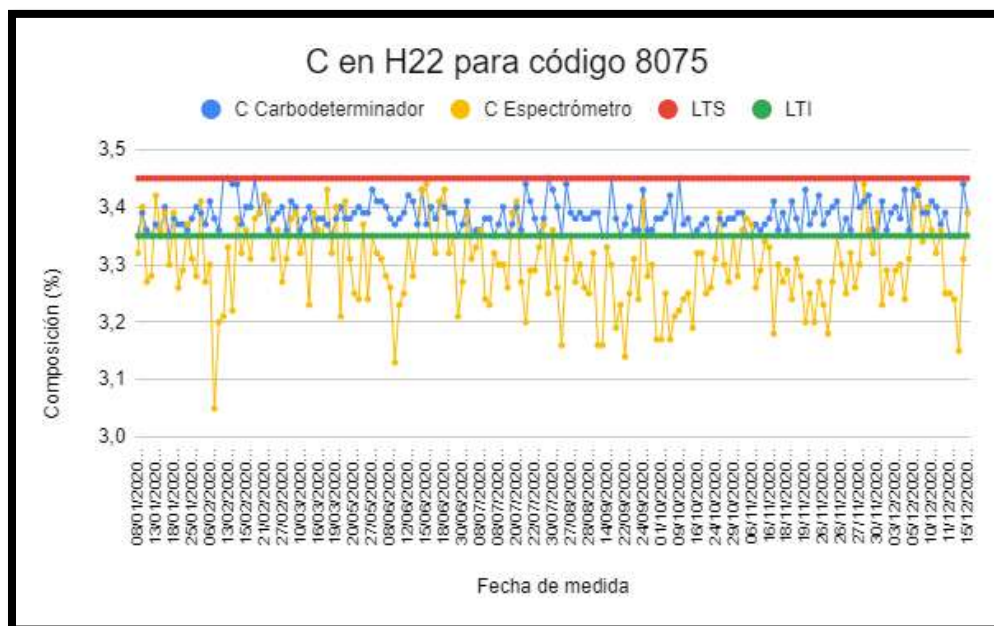
Gráfica 4. Silicio (Si) presente en el código 7882 del horno 22.

- Código 8075.

Las Gráfica 5 y Gráfica 6, representan los valores de Carbono (C). En ambas gráficas se puede observar que los valores tomados por el Carbodeterminador se encuentran dentro de los límites de trabajo. Sin embargo, los tomados por el Espectrómetro se encuentran fuera de los límites la mayoría de ellos.

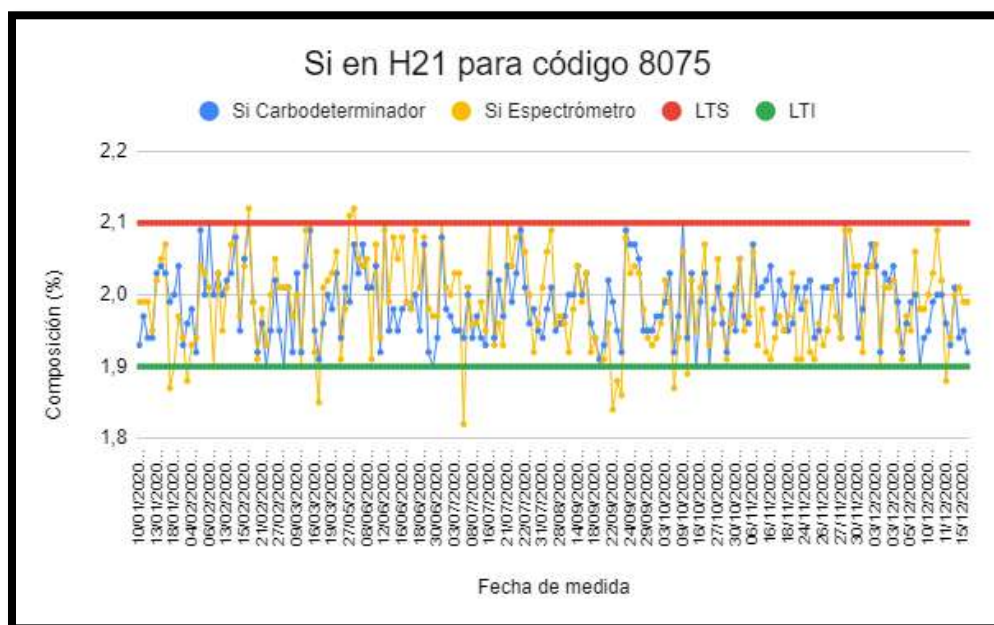


Gráfica 5. Carbono (C) presente en el código 8075 del horno 21.

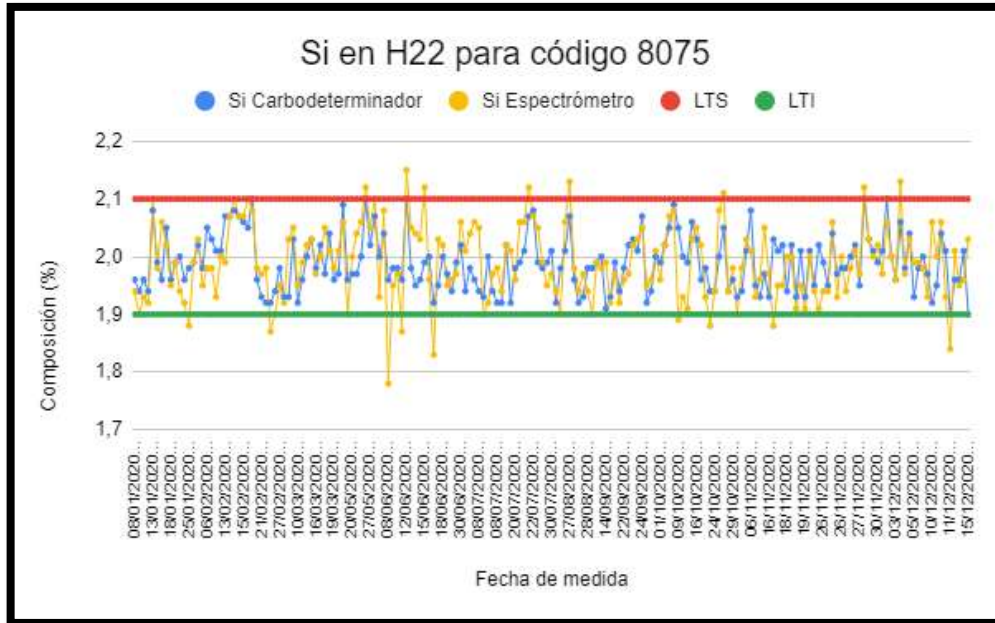


Gráfica 6. Carbono (C) presente en el código 8075 del horno 22.

Las Gráfica 7 y Gráfica 8 representan los valores de Silicio (Si). En ellas, se puede observar como los valores obtenidos, tanto como por el Carbodeterminador como por el Espectrómetro se encuentran prácticamente dentro de los límites de trabajo, siendo valores cercanos pero no semejantes.



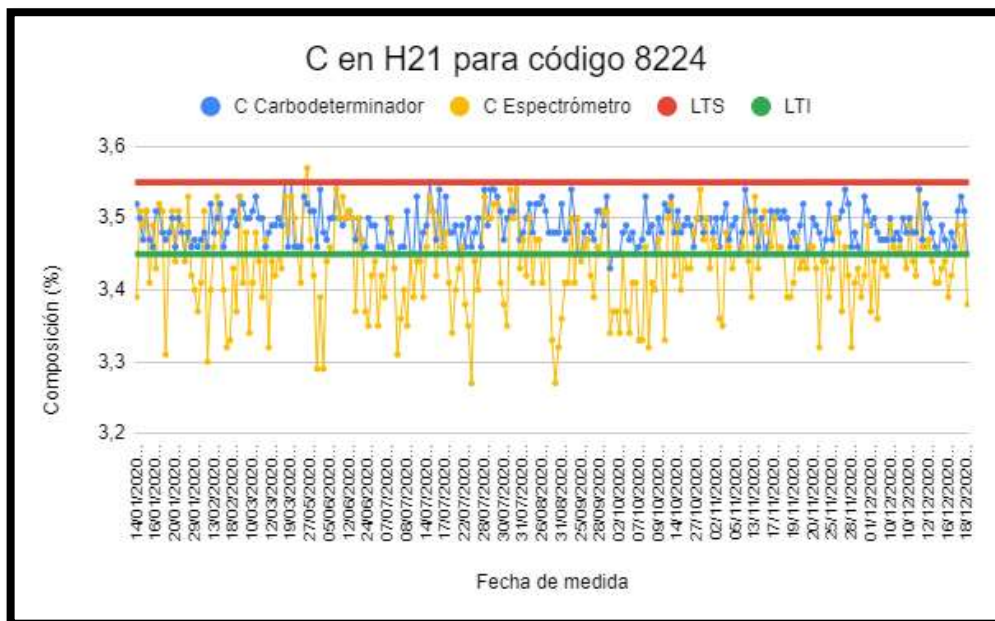
Gráfica 7. Silicio (Si) presente en el código 8075 del horno 21.



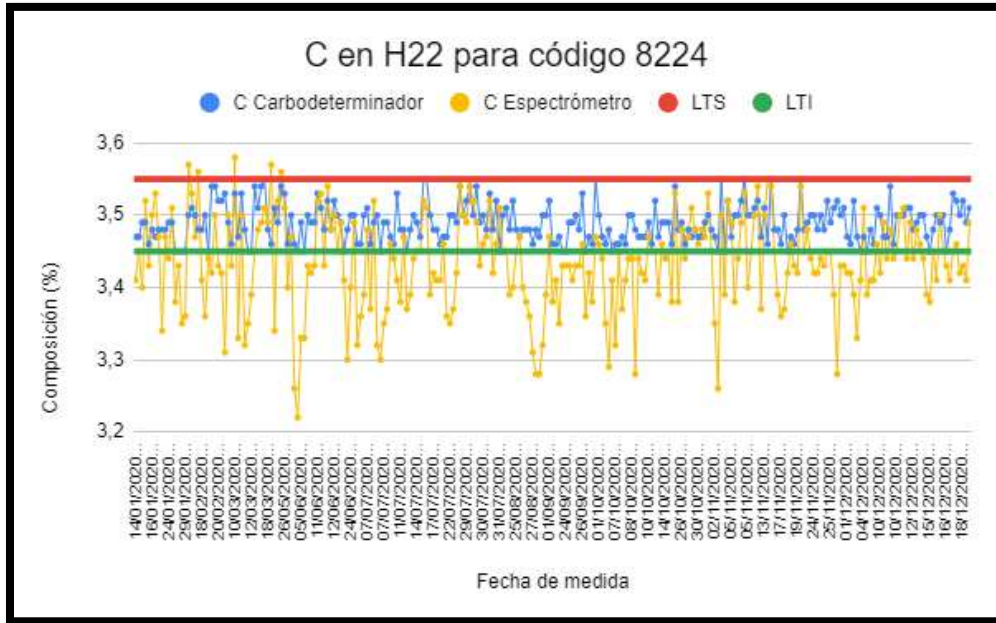
Gráfica 8. Silicio (Si) presente en el código 8075 del horno 22.

- Código 8224.

Las Gráfica 9 y Gráfica 10, representan los valores de Carbono (C). En ambas gráficas se puede observar que los valores tomados por el Carbodeterminador se encuentran dentro de los límites de trabajo. Sin embargo, los tomados por el Espectrómetro se encuentran fuera de los límites la mayoría de ellos.

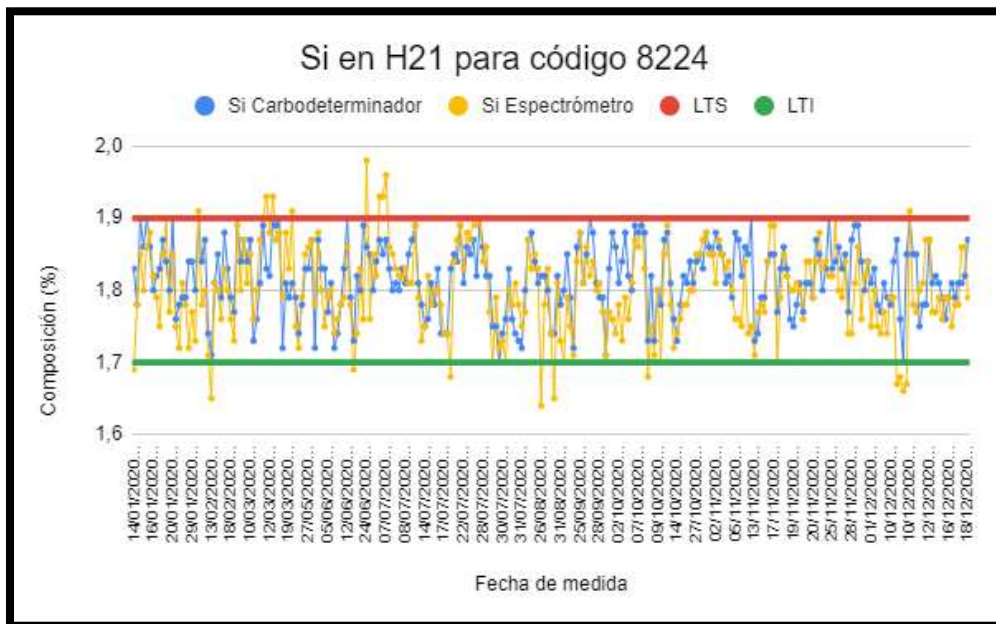


Gráfica 9. Carbono (C) presente en el código 8224 del horno 21.

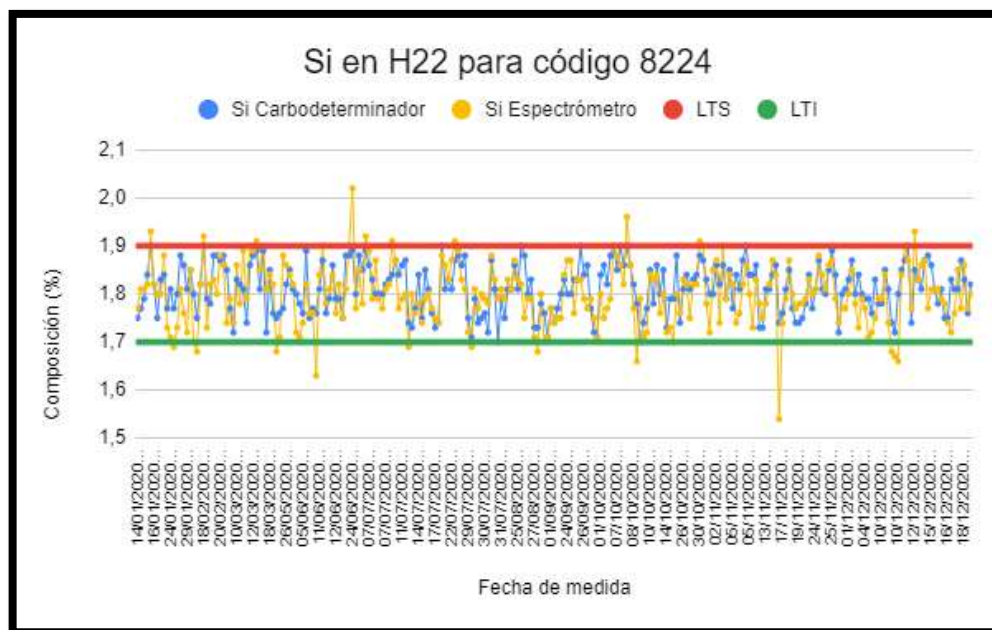


Gráfica 10. Carbono (C) presente en el código 8224 del horno 22.

Las Gráfica 11 y Gráfica 12, representan los valores de Silicio (Si). En ellas, se puede observar como los valores obtenidos, tanto como por el Carbodeterminador como por el Espectrómetro se encuentran prácticamente dentro de los límites de trabajo, siendo valores cercanos pero no semejantes.



Gráfica 11. Silicio (Si) presente en el código 8224 del horno 21.



Gráfica 12. Silicio (Si) presente en el código 8224 del horno 22.

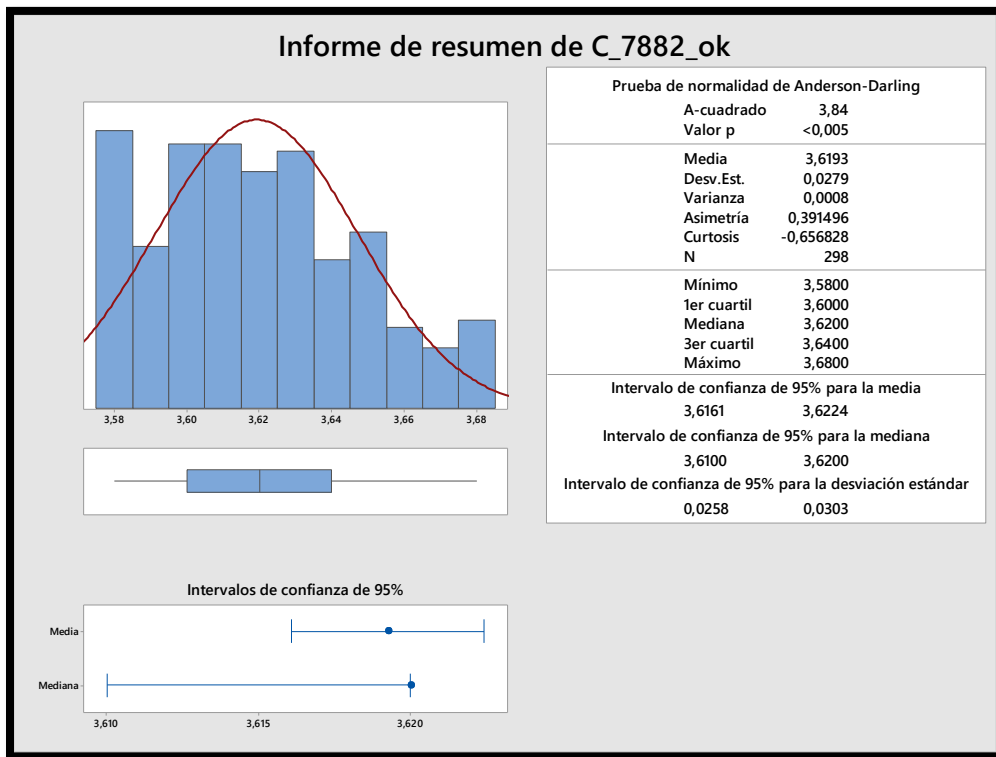
6.2. Resultados del estudio del Carbono (C) y del Silicio (Si).

Este estudio utiliza los tres códigos con más muestras a lo largo del año 2020. Los códigos a analizar son el 7882, 8075 y 8224.

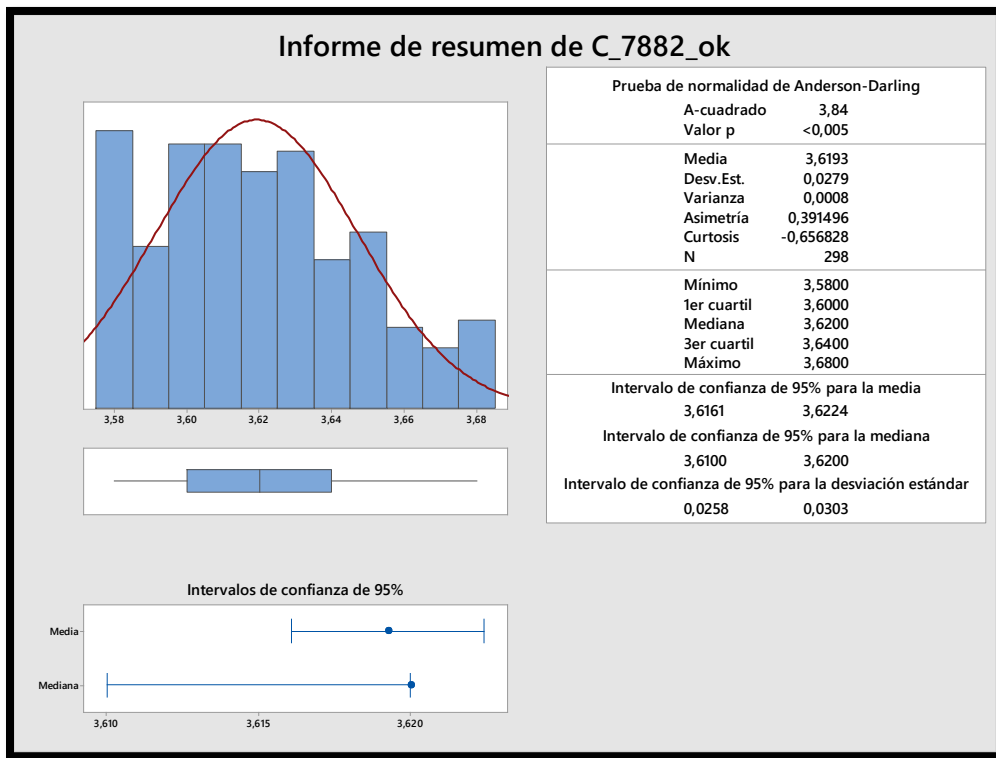
Como se ha comentado anteriormente, consta de tres investigaciones diferentes con el software Minitab que nos proporcionan los siguientes resultados.

6.2.1. Resultados de los histogramas.

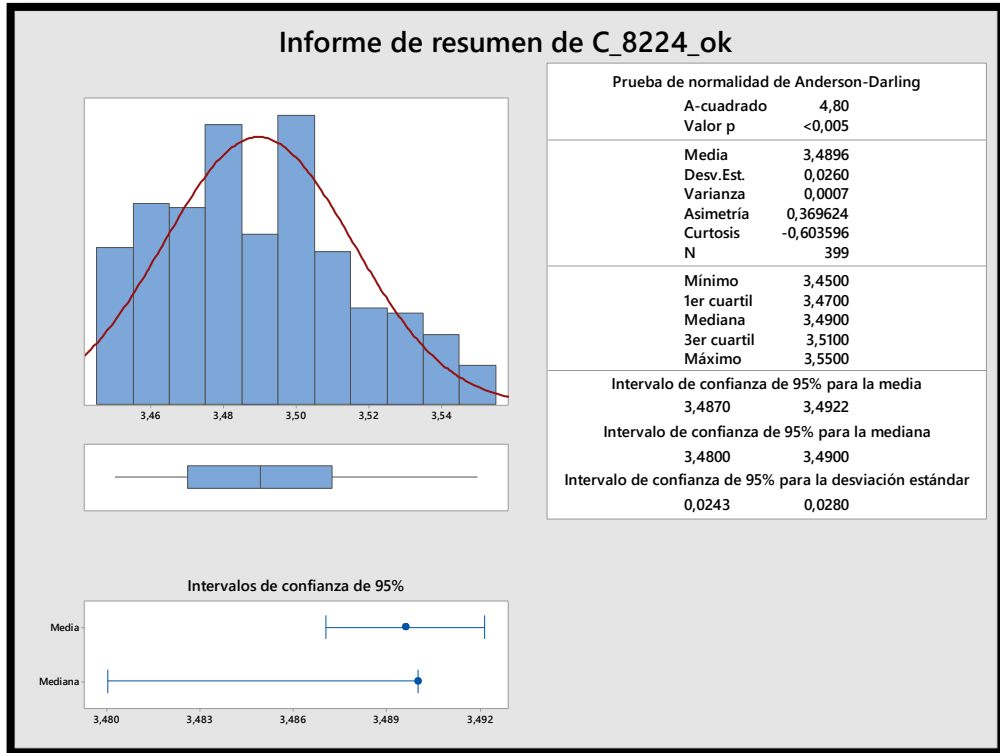
Las Gráfica 13, Gráfica 14, Gráfica 15, Gráfica 16, Gráfica 17 y Gráfica 18, recogen los histogramas del Carbono (C) en los hornos 21 y 22 para los tres códigos analizados. Sobre todos los histogramas aparece sobrepuesta una representación de una distribución normal. Como se observa en todos los casos, los valores de los histogramas no se asemejan a dicha distribución normal. Dentro de estas gráficas, se recoge un resumen estadístico sobre los valores analizados, como puede ser la media, varianza, mediana o intervalos de confianza del 95% entre otros.



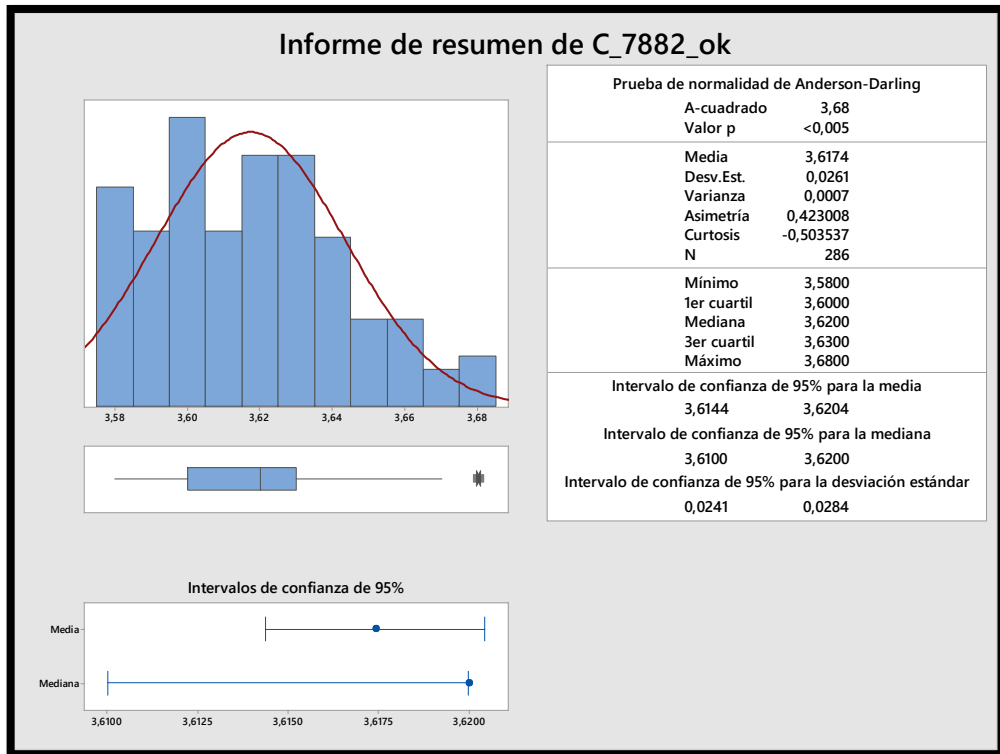
Gráfica 13. Histograma y estadísticos del C en código 7882 del horno 21.



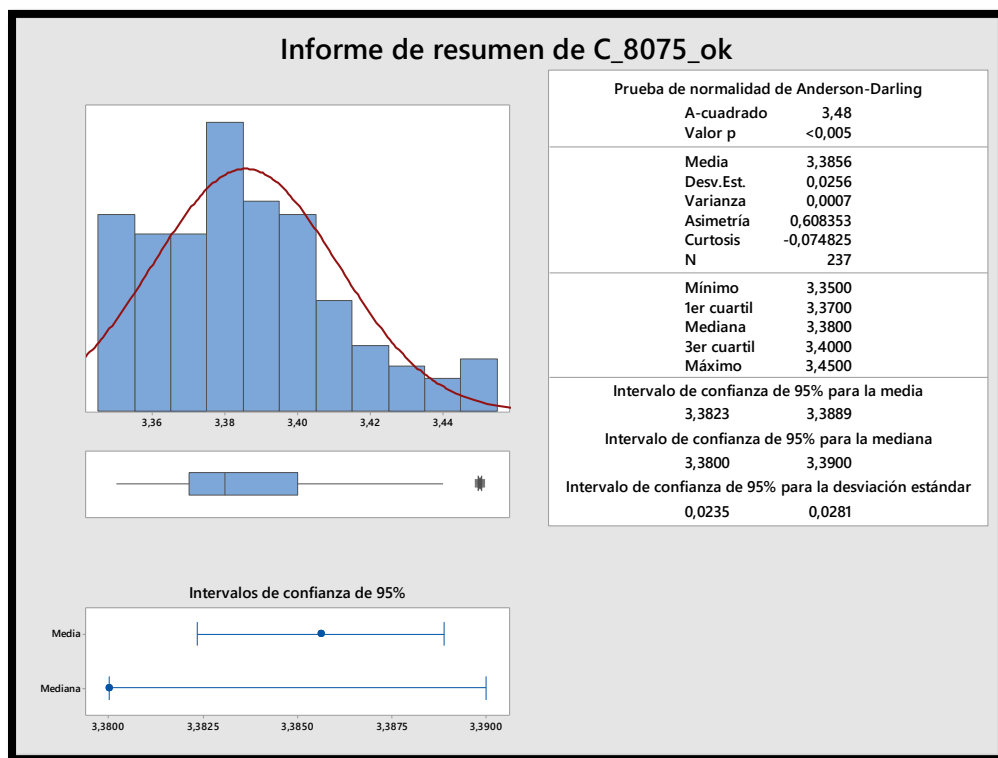
Gráfica 14. Histograma y estadísticos del C en código 8075 del horno 21.



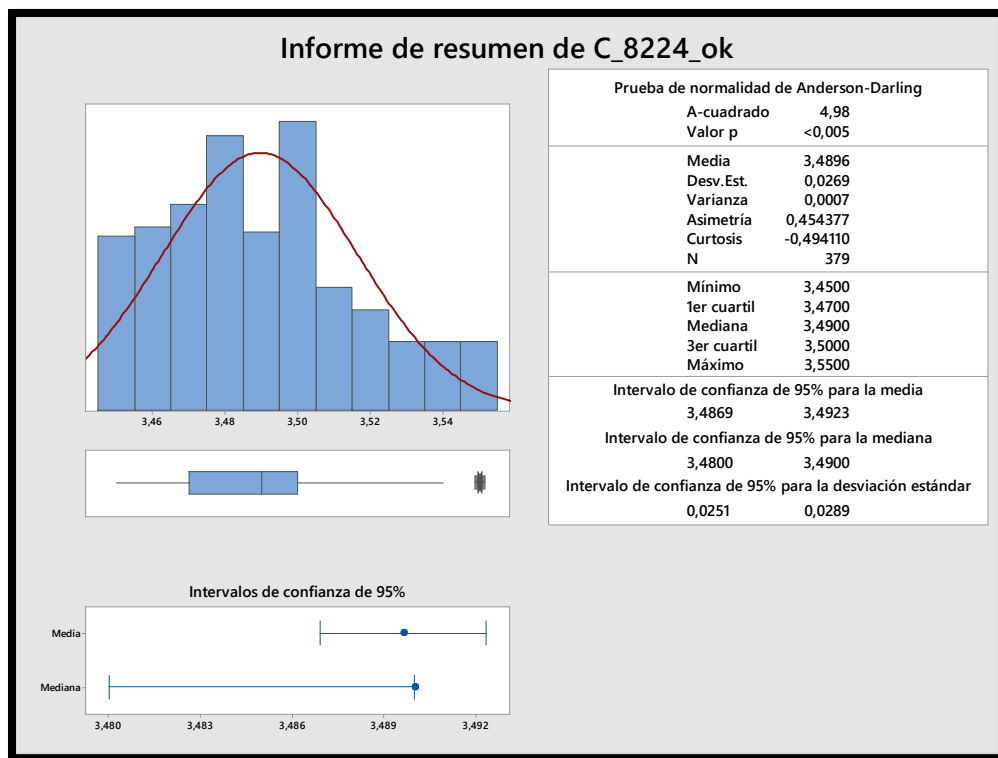
Gráfica 15. Histograma y estadísticos del C en código 8224 del horno 21.



Gráfica 16. Histograma y estadísticos del C en código 7882 del horno 22.

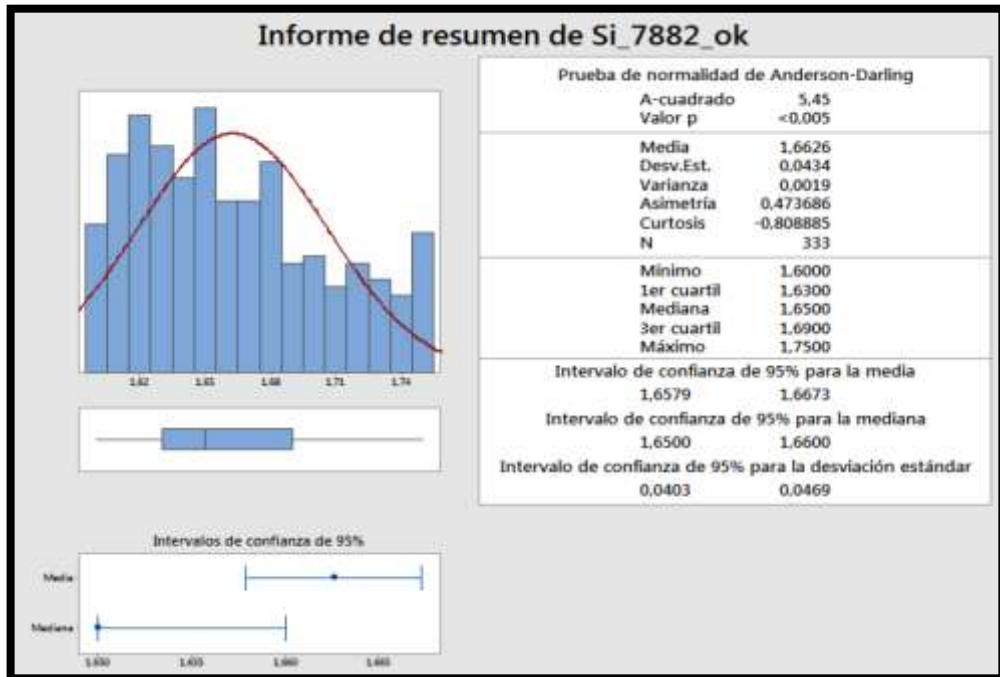


Gráfica 17. Histograma y estadísticos del C en código 8075 del horno 22.

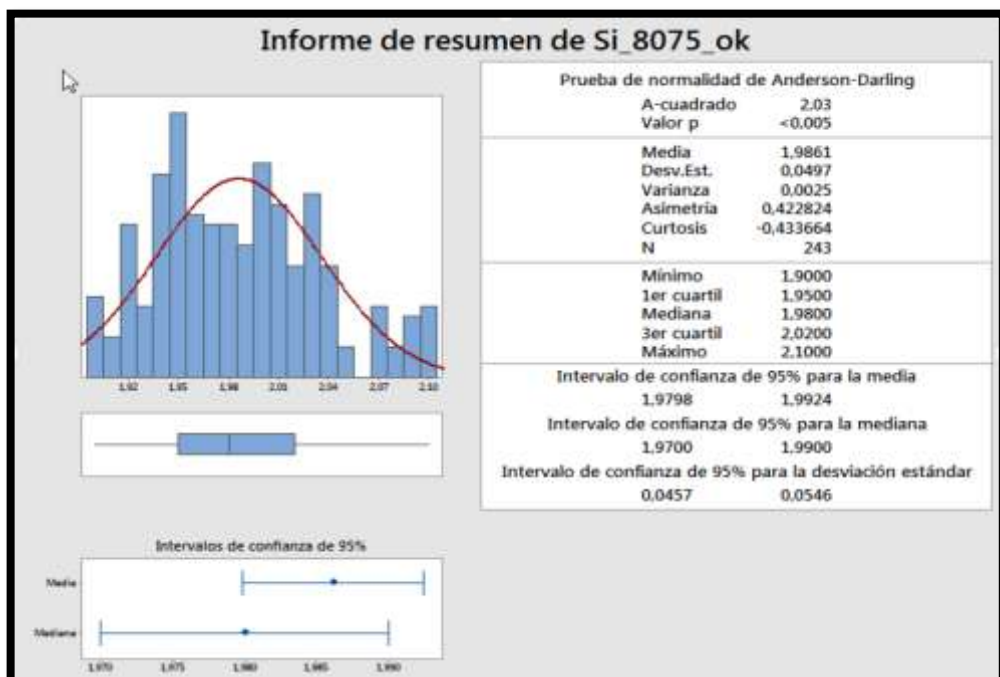


Gráfica 18. Histograma y estadísticos del C en código 8224 del horno 22.

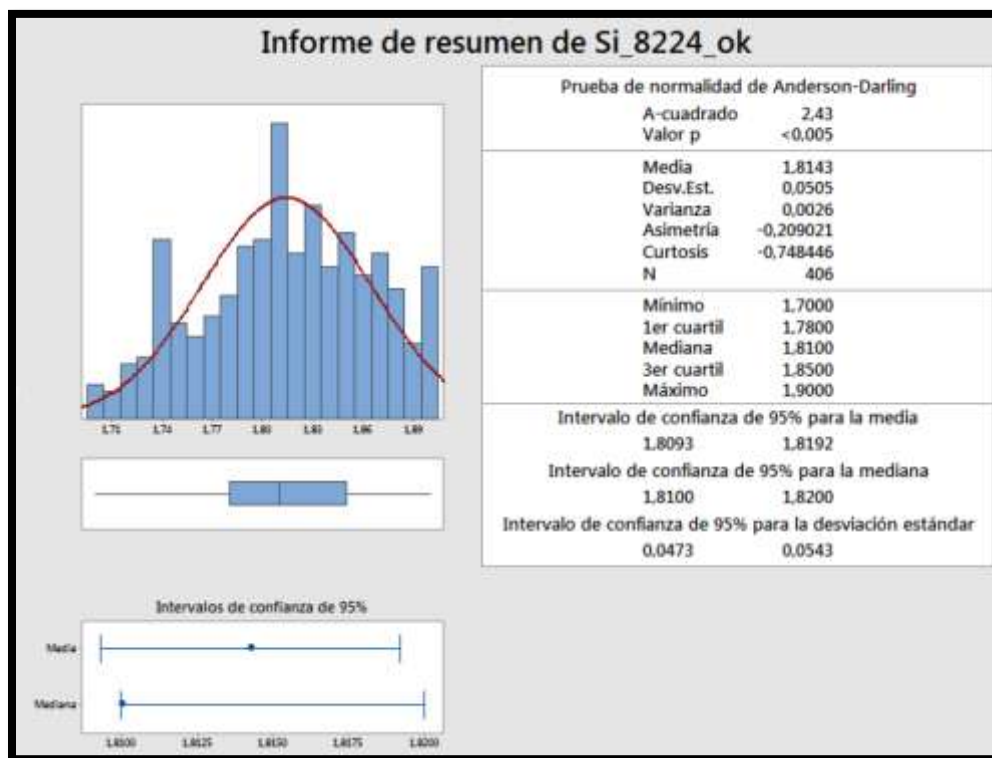
Las Gráfica 19, Gráfica 20, Gráfica 21, Gráfica 22, Gráfica 23 y Gráfica 24, recogen los histogramas pero en este caso del Silicio (Si) en los hornos 21 y 22 para los tres códigos analizados junto a una representación de una distribución normal. Como se observa en todos los casos, los valores de los histogramas no se asemejan a dicha distribución normal. Dentro de estas gráficas, también se recoge un resumen estadístico de los valores analizados.



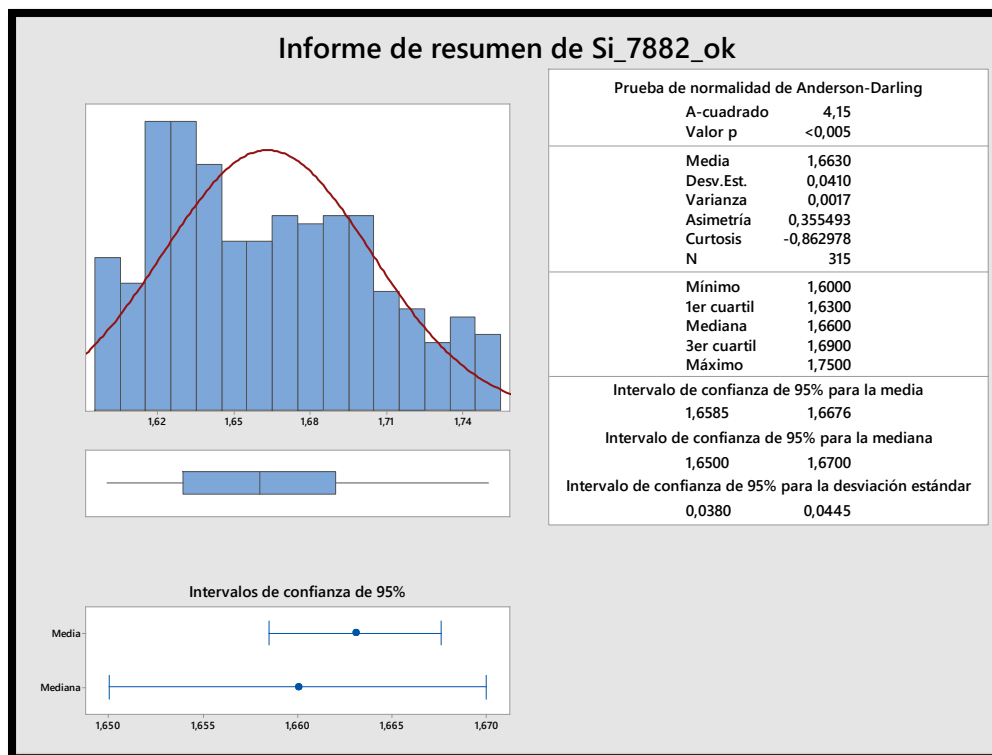
Gráfica 19. Histograma y estadísticos del Si en código 7882 del horno 21.



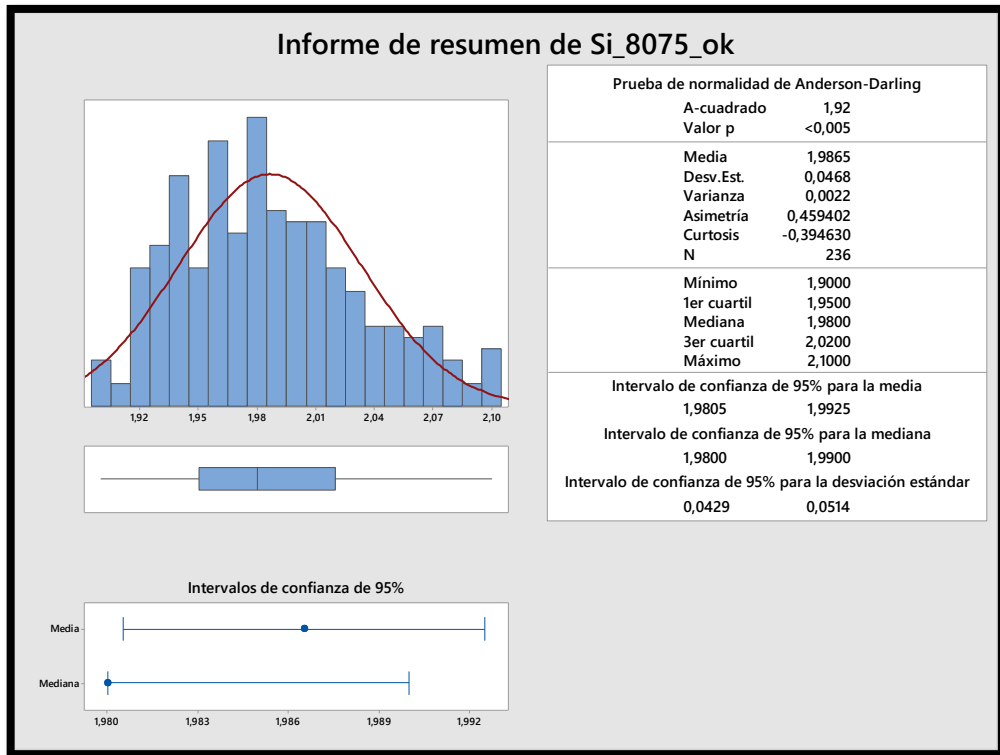
Gráfica 20. Histograma y estadísticos del Si en código 8075 del horno 21.



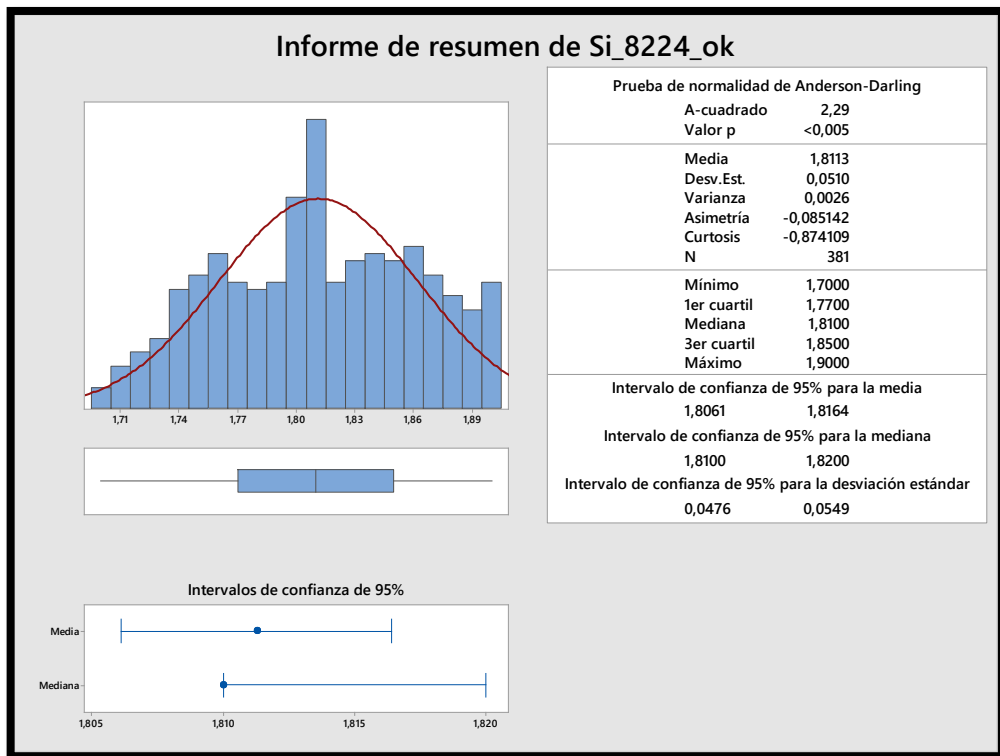
Gráfica 21. Histograma y estadísticos del Si en código 8224 del horno 21.



Gráfica 22. Histograma y estadísticos del Si en código 7882 del horno 22.



Gráfica 23. Histograma y estadísticos del Si en código 8075 del horno 22.



Gráfica 24. Histograma y estadísticos del Si en código 8224 del horno 22.

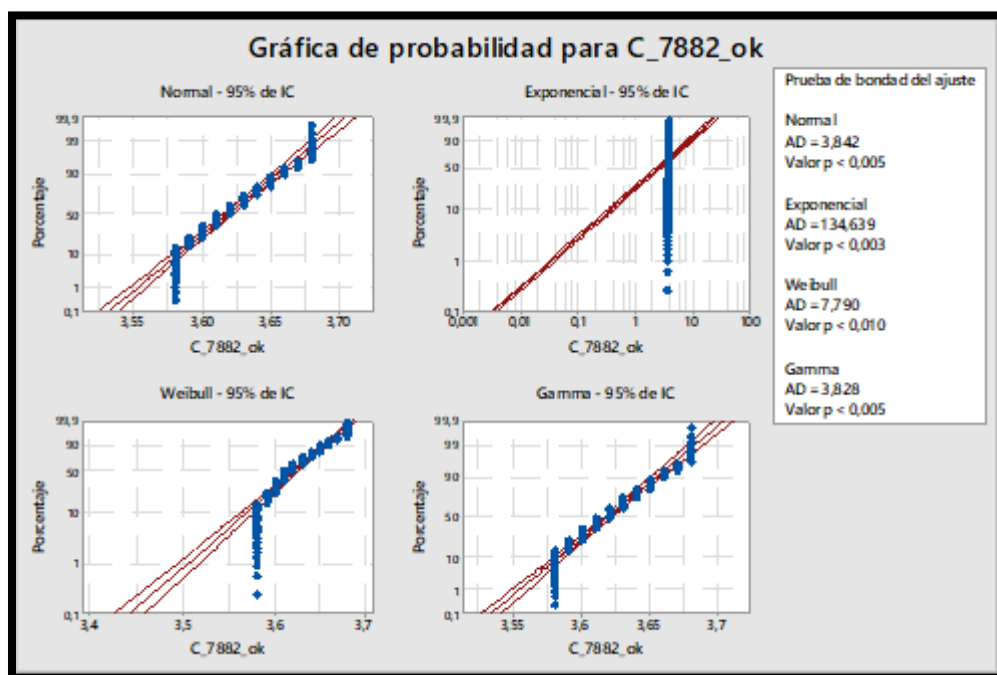
6.2.2. Resultados de las distribuciones.

En el apartado anterior, se observa que los valores no se ajustan de manera adecuada a una distribución normal. Es por esto, por lo que vamos a analizar otras tres distribuciones diferentes junto a la normal, para comprobar si estas se adaptan mejor a los datos.

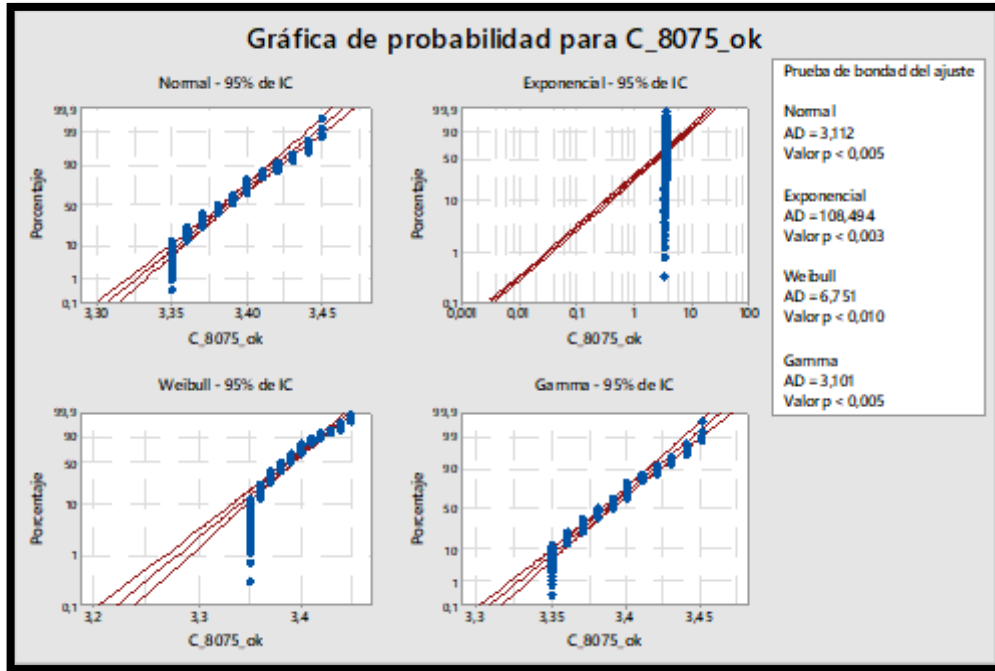
Para cada uno de los tres códigos a analizar, se comprueban como se adaptan las cuatro distribuciones. Se realiza tanto en el horno 21 como 22, y para el Carbono (C) y el Silicio (Si).

Las cuatro distribuciones que se analizan son la Normal, la Exponencial, la Weibull y la Gamma.

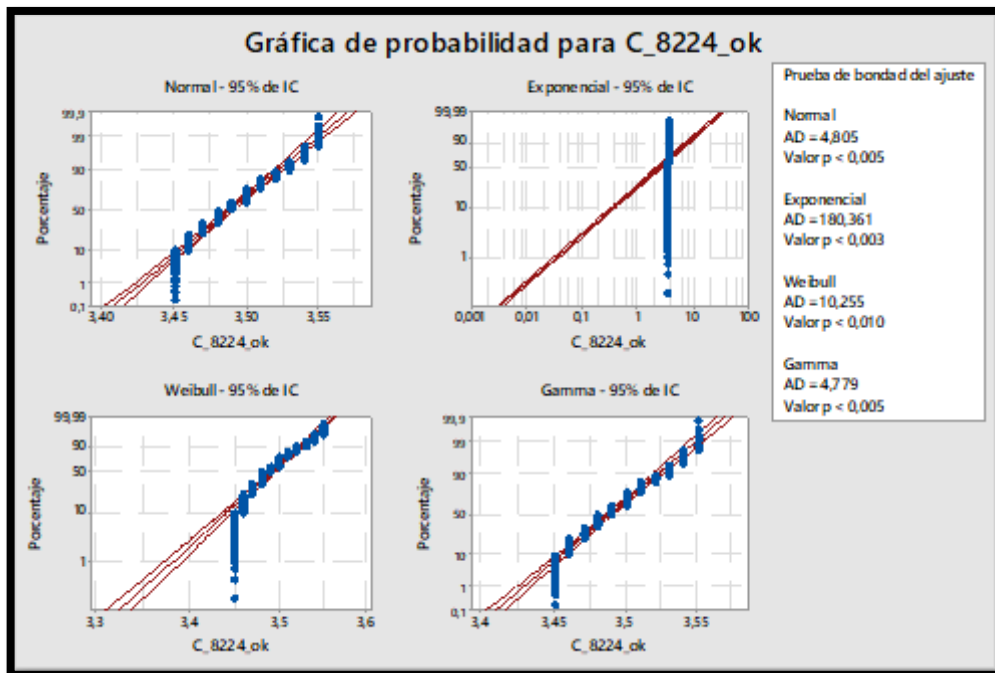
Las Gráfica 25, Gráfica 26, Gráfica 27, Gráfica 28, Gráfica 29 y Gráfica 30, recogen las cuatro distribuciones analizadas para el Carbono (C) de los hornos 21 y 22 para los tres códigos. En todas, los resultados son similares. La distribución Exponencial no se adapta a los datos, las Weibull y la Gamma se adaptan mejor que la Exponencial pero no mejoran ninguna a la Normal.



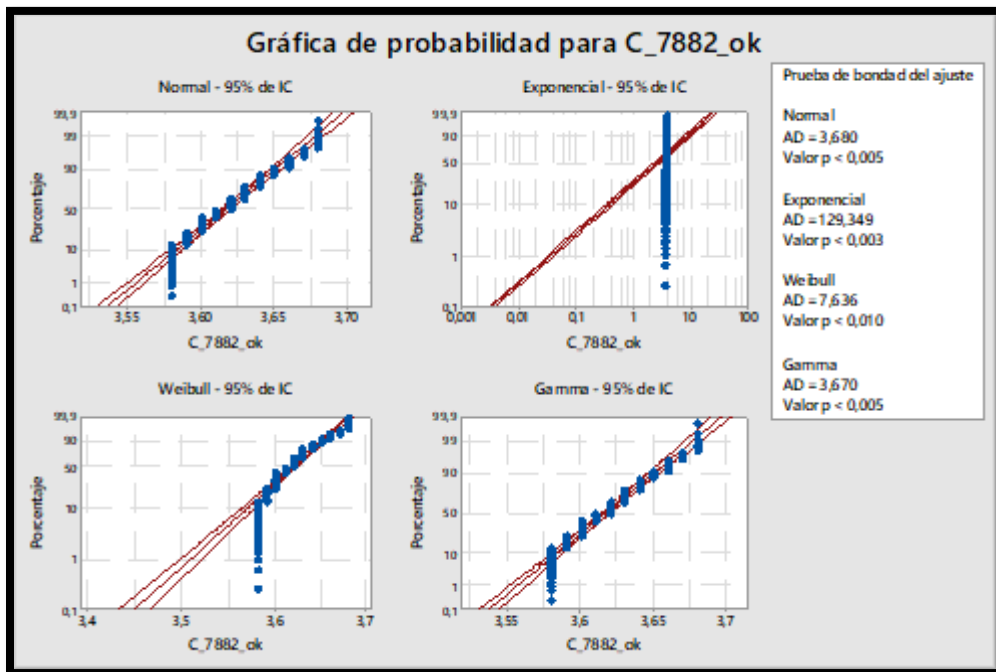
Gráfica 25. Distribuciones del C en el código 7882 del horno 21.



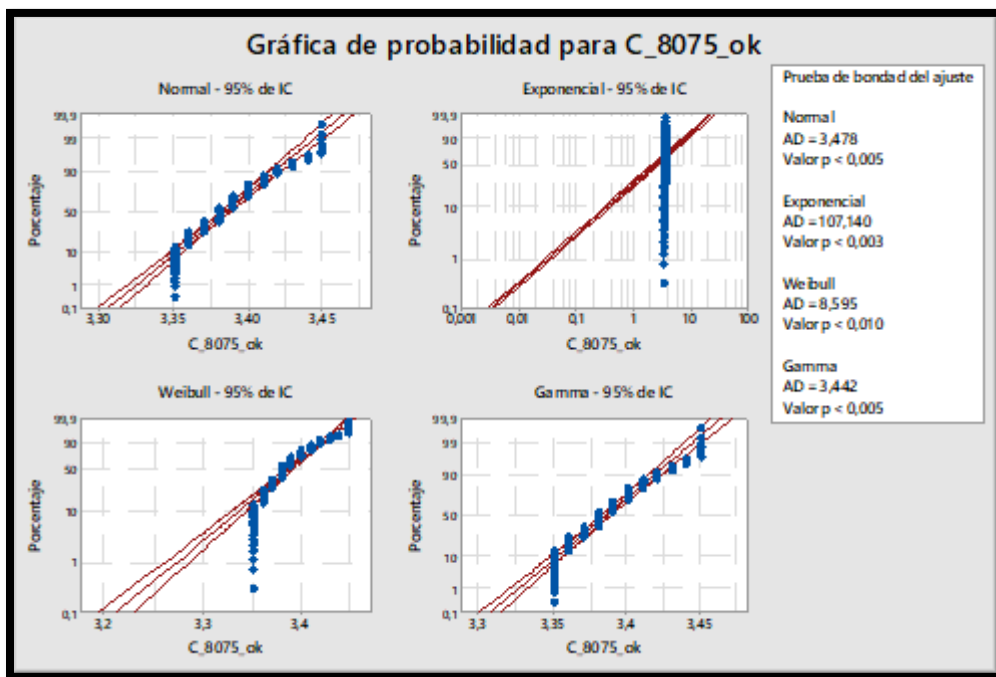
Gráfica 26. Distribuciones del C en el código 8075 del horno 21.



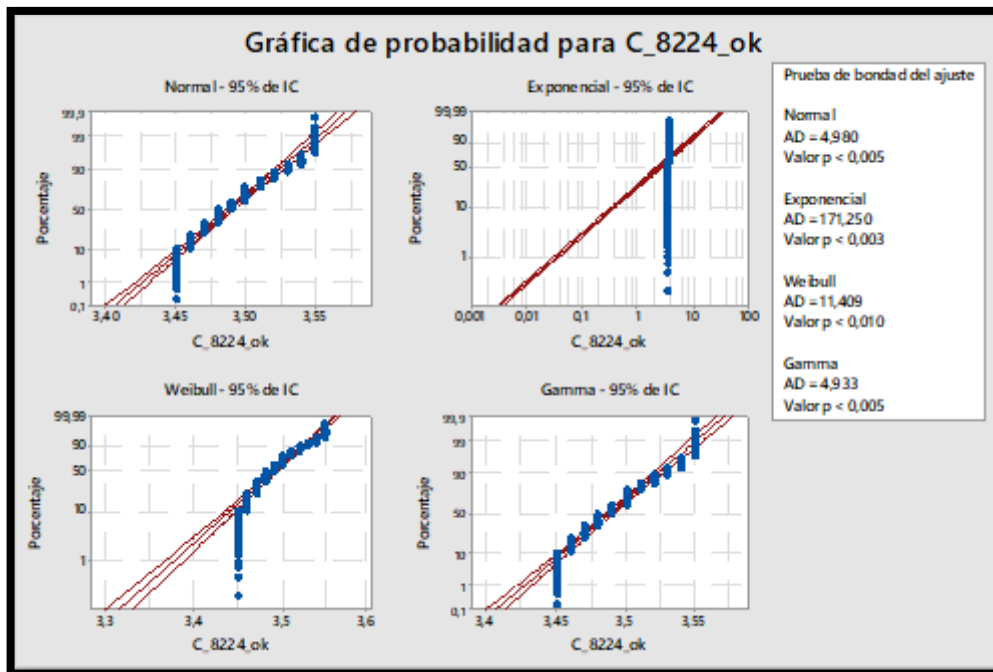
Gráfica 27. Distribuciones del C en el código 8224 del horno 21.



Gráfica 28. Distribuciones del C en el código 7882 del horno 22.

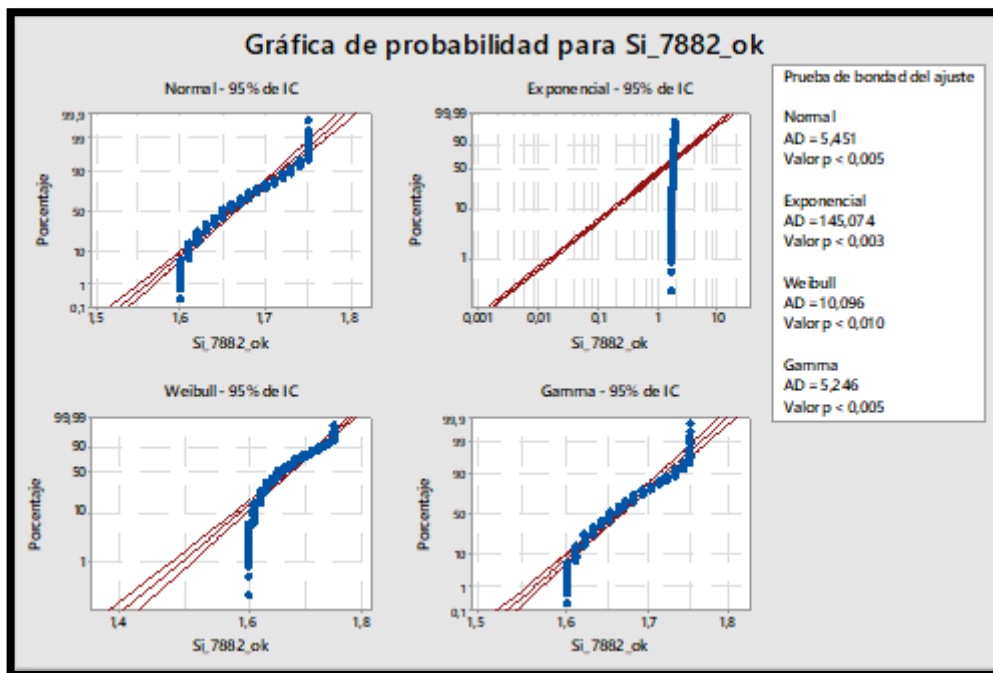


Gráfica 29. Distribuciones del C en el código 8075 del horno 22.

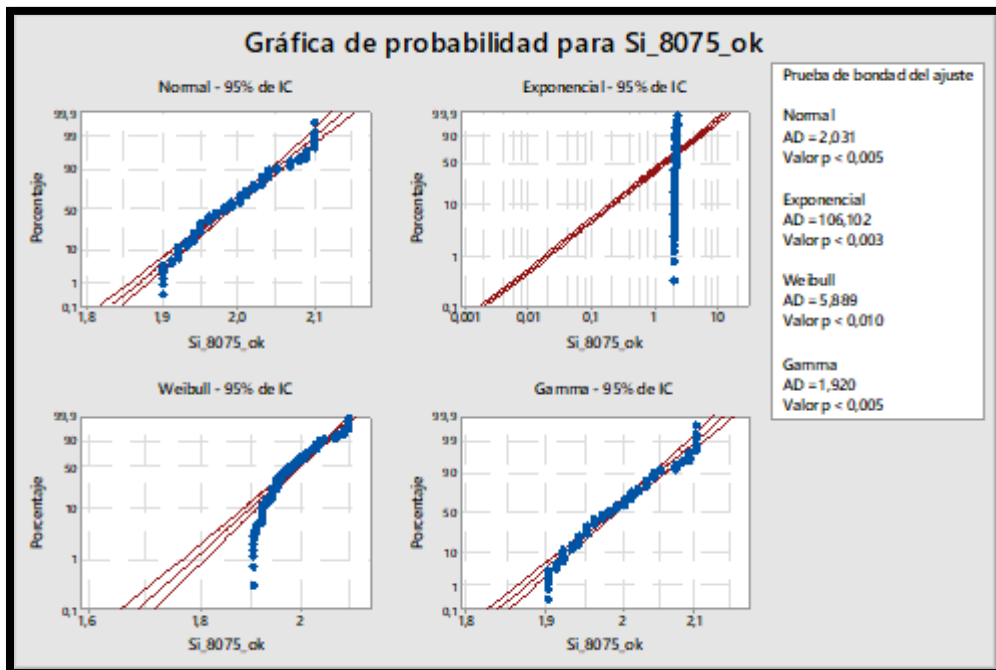


Gráfica 30. Distribuciones del C en el código 8224 del horno 22.

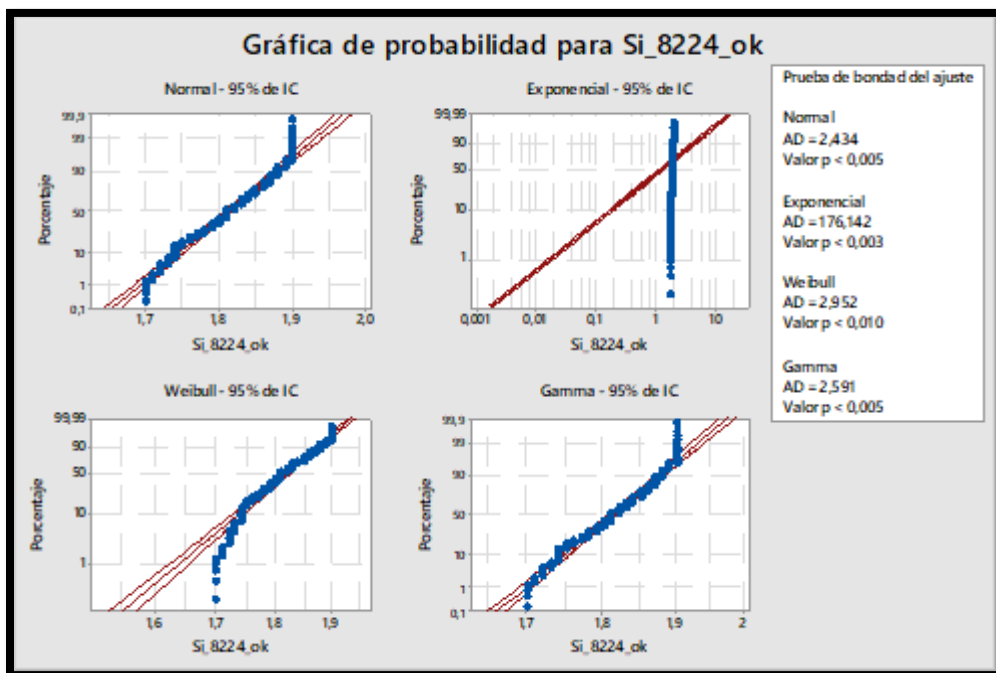
Las Gráfica 31, Gráfica 32, Gráfica 33, Gráfica 34, Gráfica 35 y Gráfica 36, recogen las cuatro distribuciones analizadas, en este caso para el Silicio (Si), también de los hornos 21 y 22 para los tres códigos. Sucede como en el Carbono (C) y los resultados son similares, sin adaptarse mejor que la Normal.



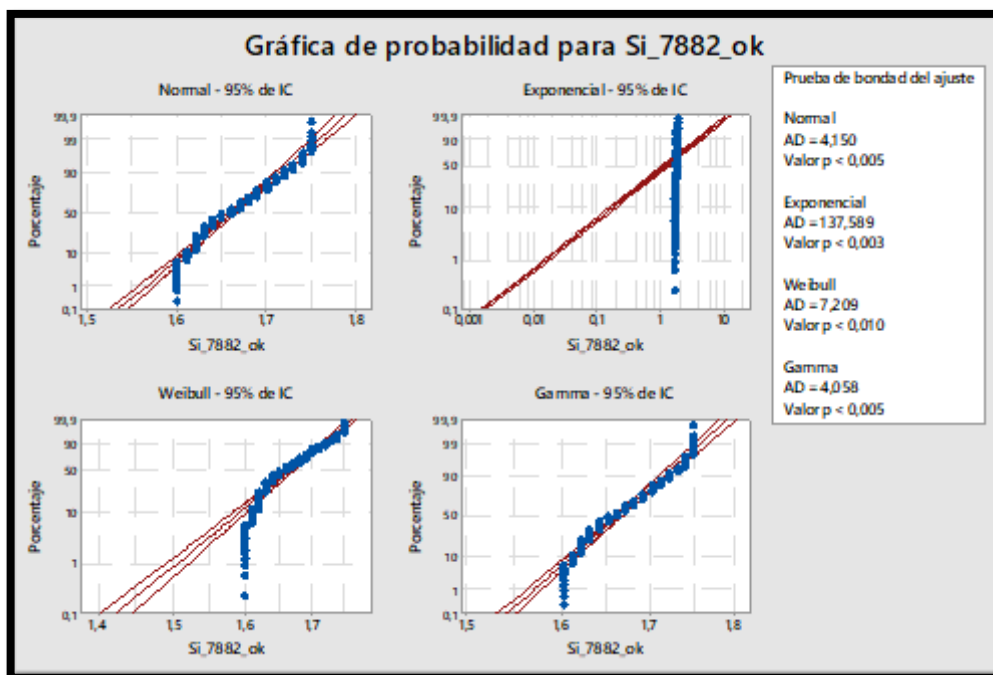
Gráfica 31. Distribuciones del Si en el código 7882 del horno 21.



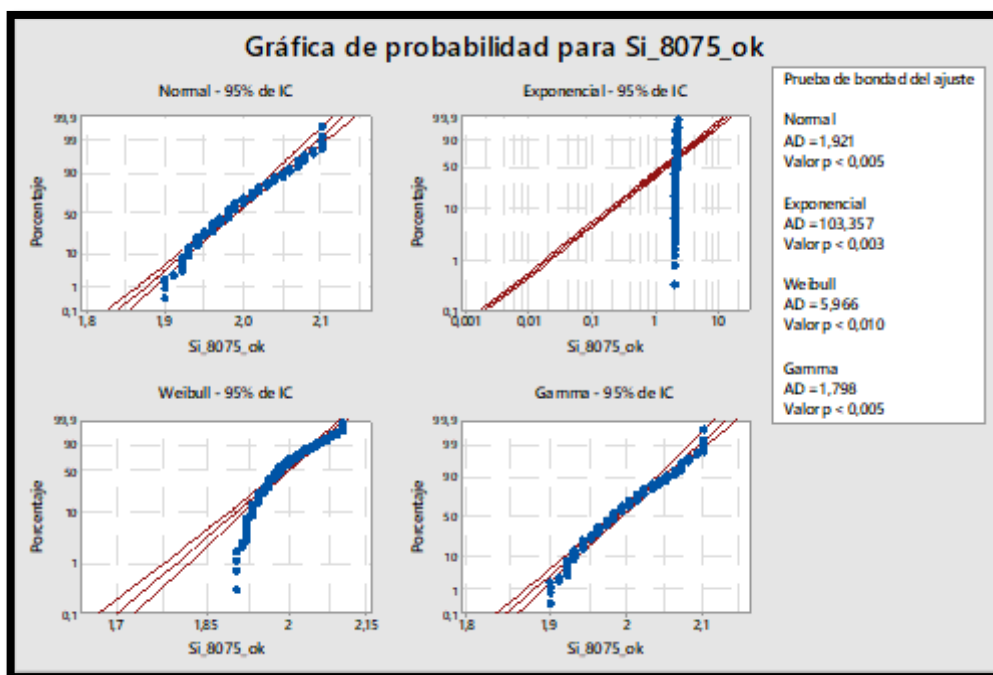
Gráfica 32. Distribuciones del Si en el código 8075 del horno 21.



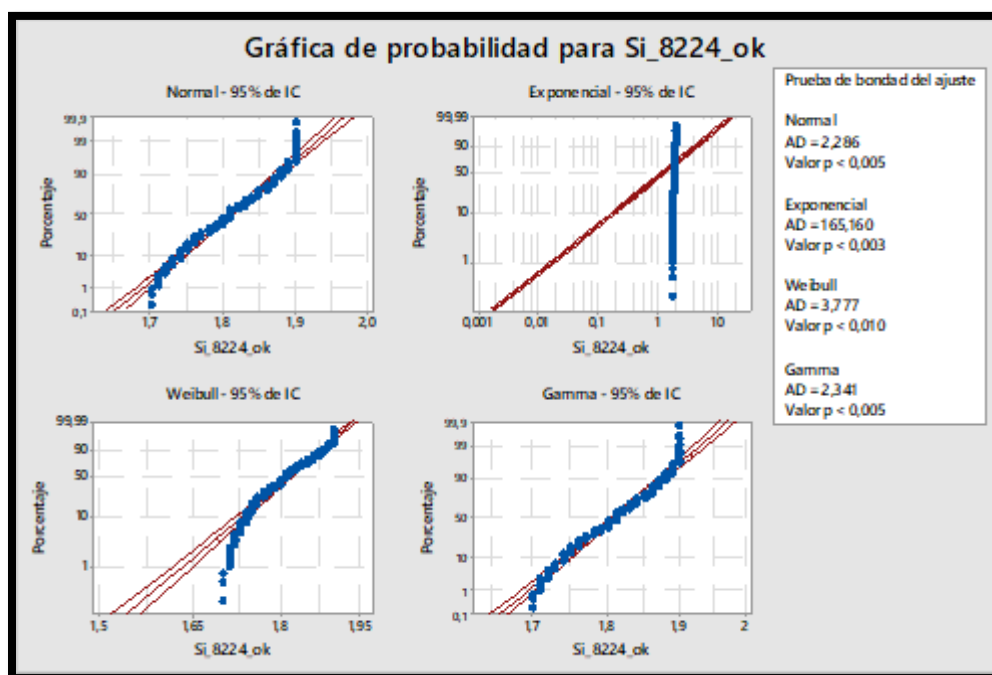
Gráfica 33. Distribuciones del Si en el código 8224 del horno 21.



Gráfica 34. Distribuciones del Si en el código 7882 del horno 22.



Gráfica 35. Distribuciones del Si en el código 8075 del horno 22.



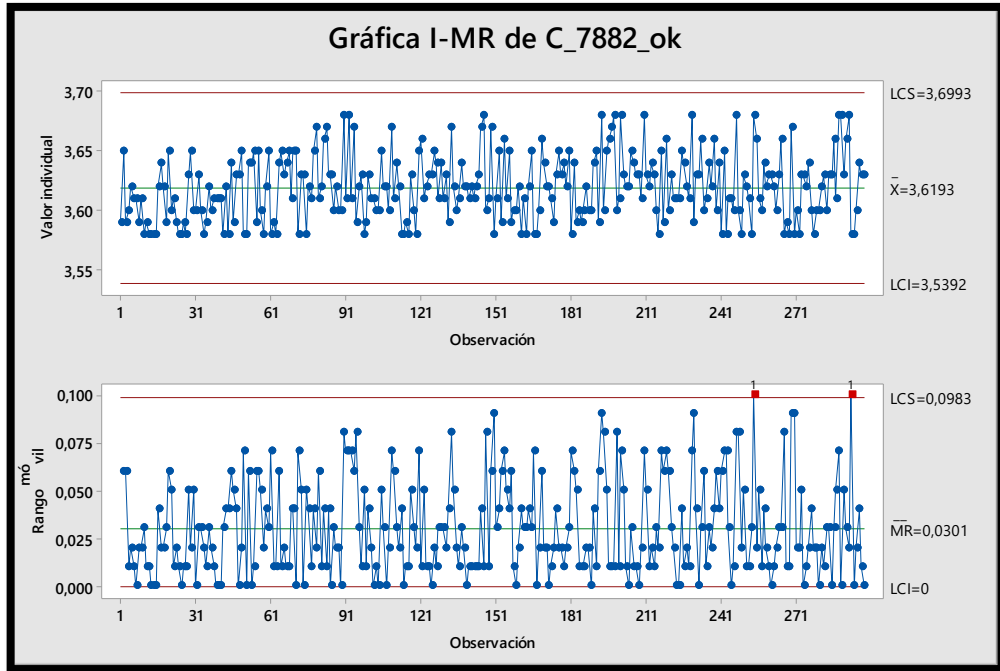
Gráfica 36. Distribuciones del Si en el código 8224 del horno 22.

6.2.3. Resultados de los gráficos de control.

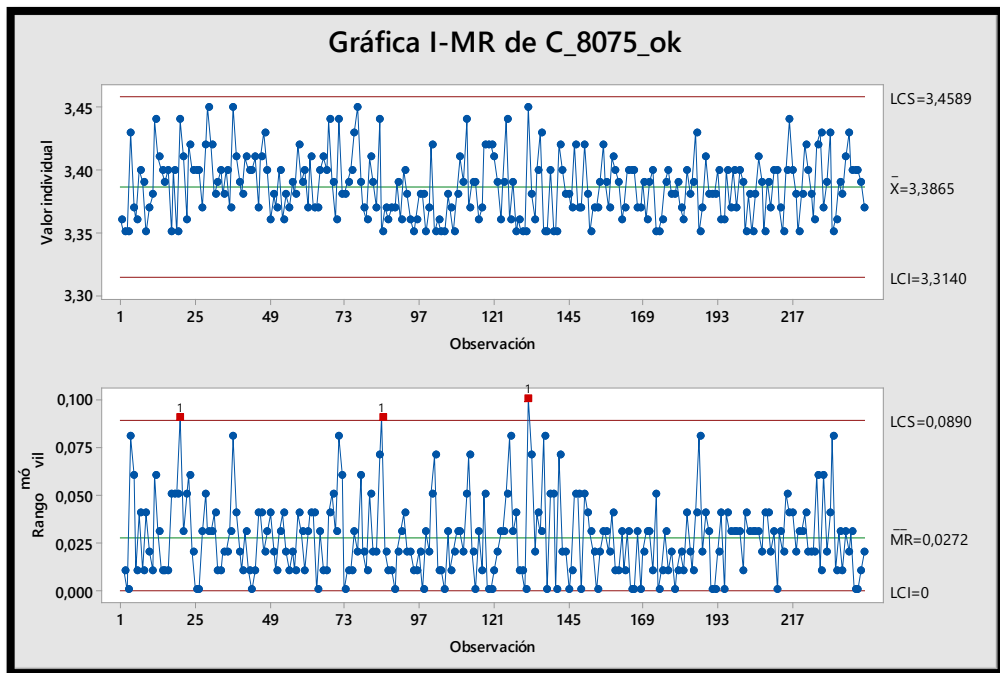
En este estudio se busca ver si el proceso es estable o inestable. Para ello, como se ha explicado anteriormente, se realizan gráficos de control.

Como en los estudios anteriores, se realiza para los tres códigos con más medidas a lo largo del año 2020 en los hornos 21 y 22 para el Carbono (C) y el Silicio (Si).

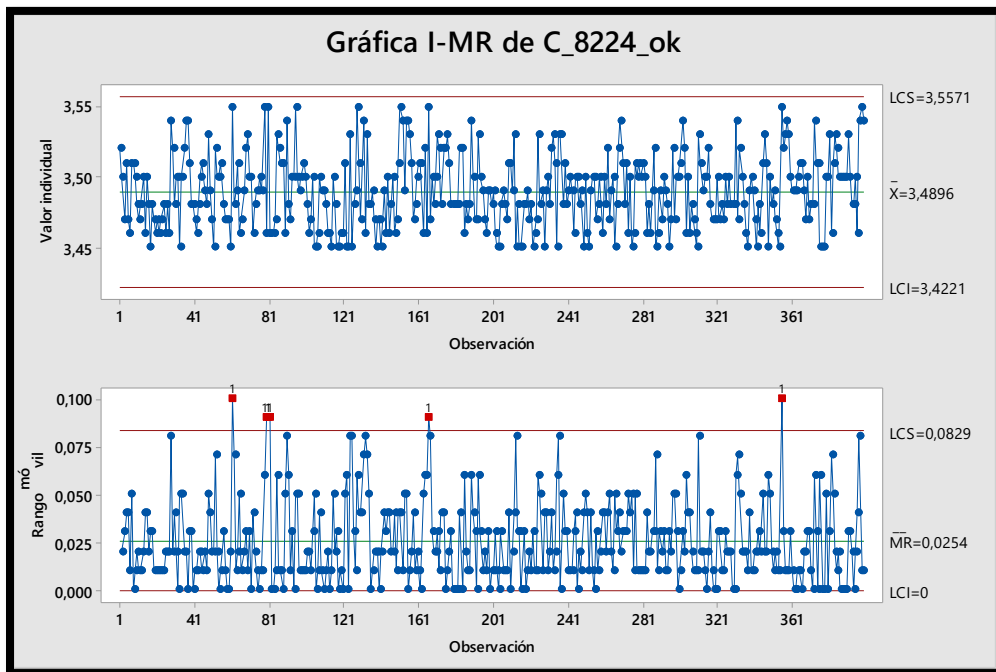
Las Gráfica 37, Gráfica 38, Gráfica 39, Gráfica 40, Gráfica 41 y Gráfica 42, recogen los resultados de todos los códigos para el Carbono (C) de ambos hornos. Se puede observar, que en la vista superior de las gráficas todos los valores se encuentran dentro de los límites de control. Sin embargo, en la parte inferior o variable, suele haber algún valor que sobrepasa el límite superior de control.



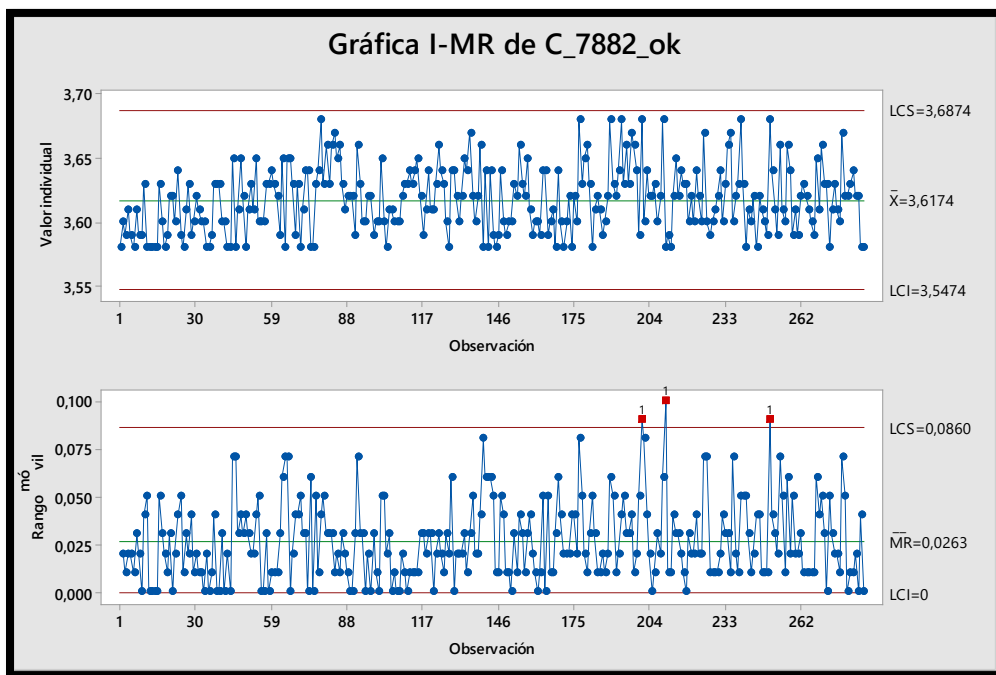
Gráfica 37. Gráficas de control del C en el código 7882 del horno 21.



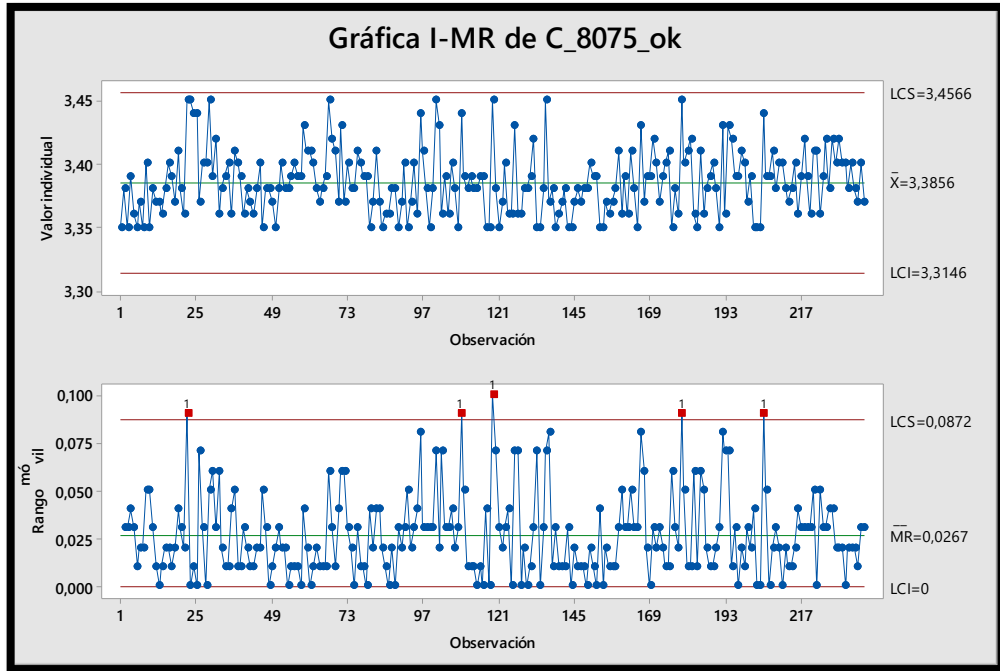
Gráfica 38. Gráficas de control del C en el código 8075 del horno 21.



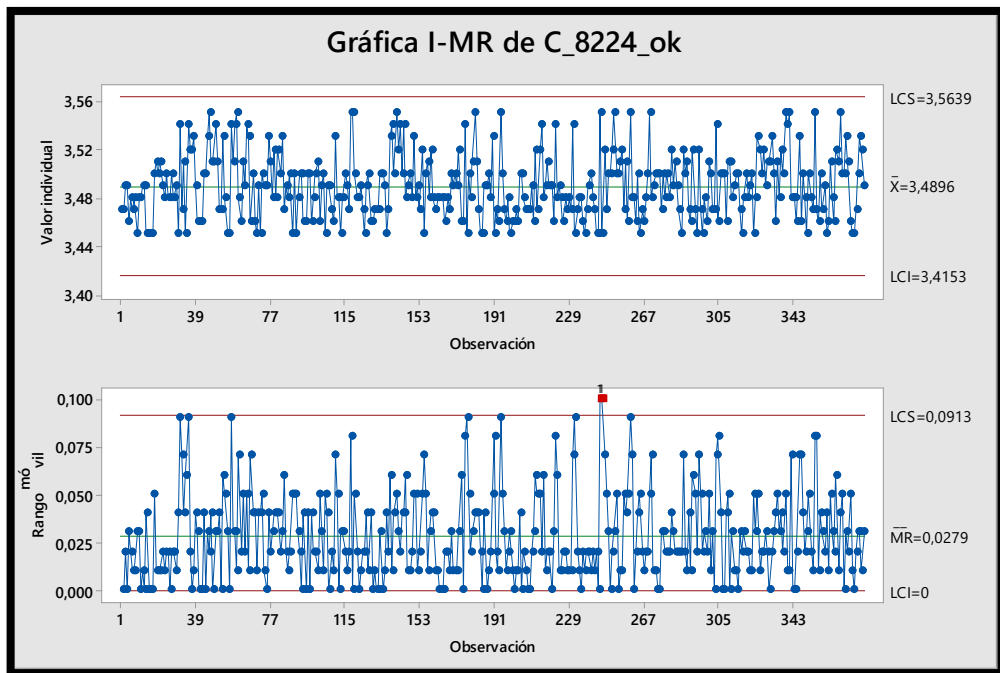
Gráfica 39. Gráficas de control del C en el código 8224 del horno 21.



Gráfica 40. Gráficas de control del C en el código 7882 del horno 22.

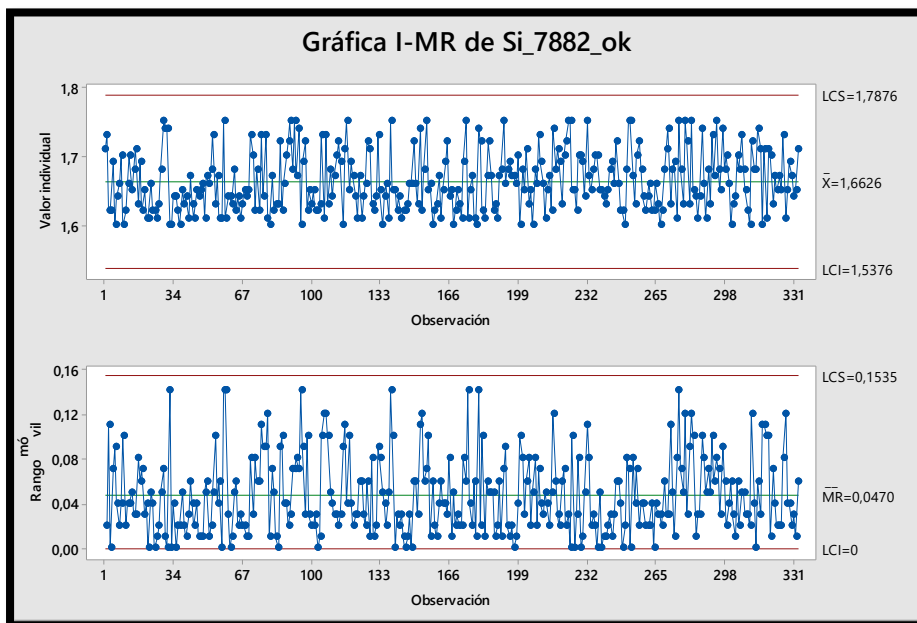


Gráfica 41. Gráficas de control del C en el código 8075 del horno 22.

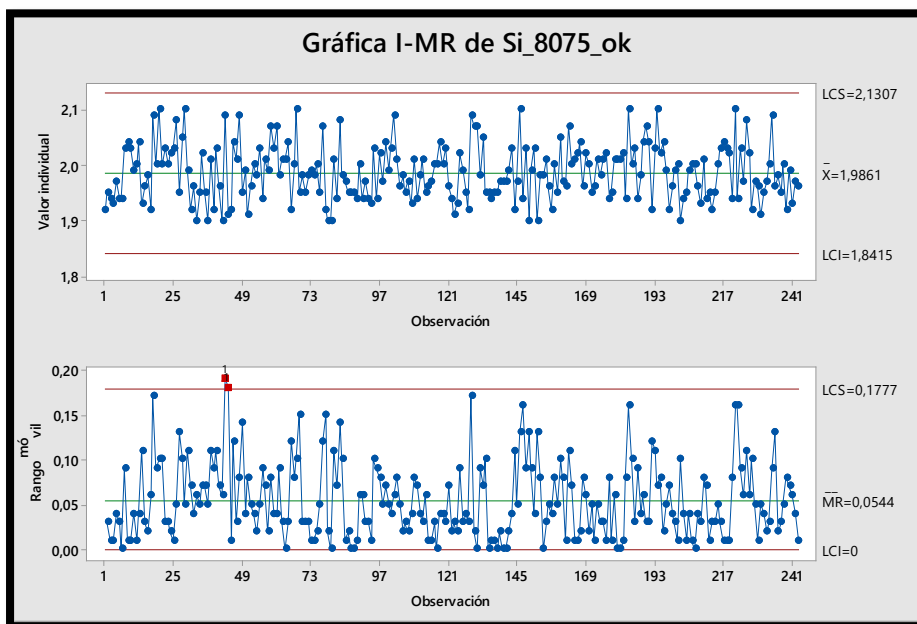


Gráfica 42. Gráficas de control del C en el código 8224 del horno 22.

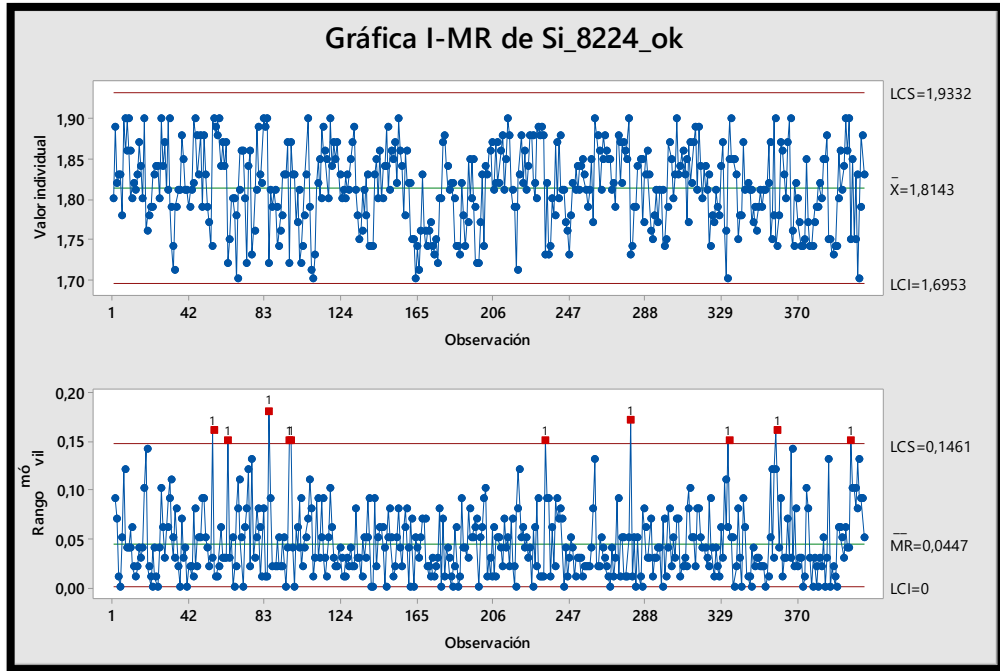
Las Gráfica 43, Gráfica 44, Gráfica 45, Gráfica 46, Gráfica 47 y Gráfica 48, recogen los resultados de todos los códigos pero en este caso para el Silicio (Si) de ambos hornos. Se puede observar, que en la vista superior de las gráficas también todos los valores se encuentran dentro de los límites de control. Sin embargo, en la parte inferior o variable, suele haber algún valor que sobrepasa el límite superior de control, siendo el más destacado en el código 8224 del horno 21 como se observa en la Gráfica 45.



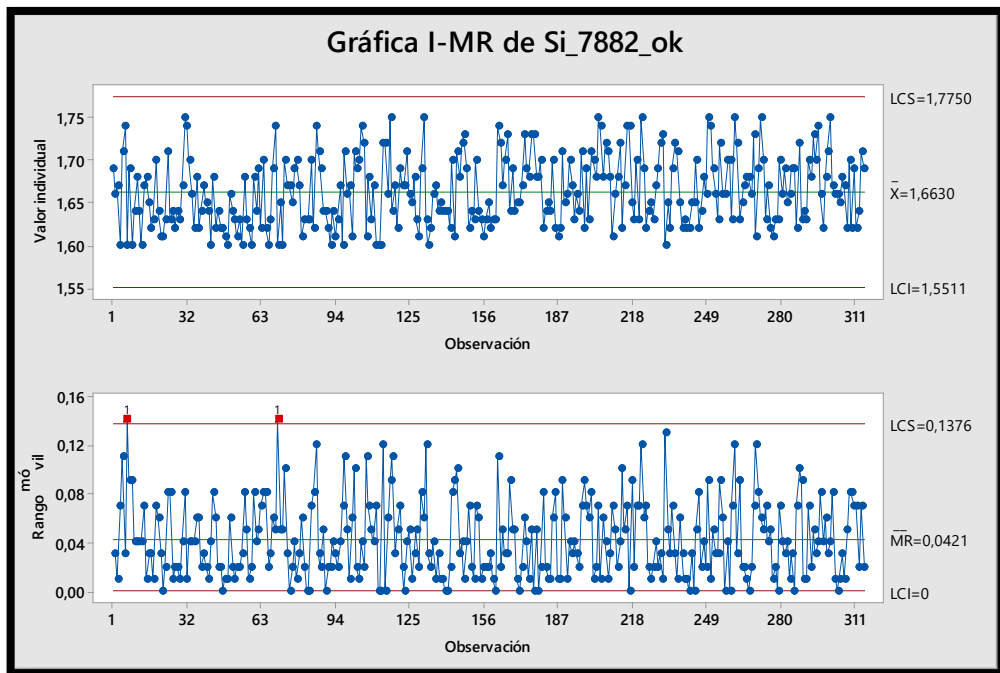
Gráfica 43. Gráficas de control del Si en el código 7882 del horno 21.



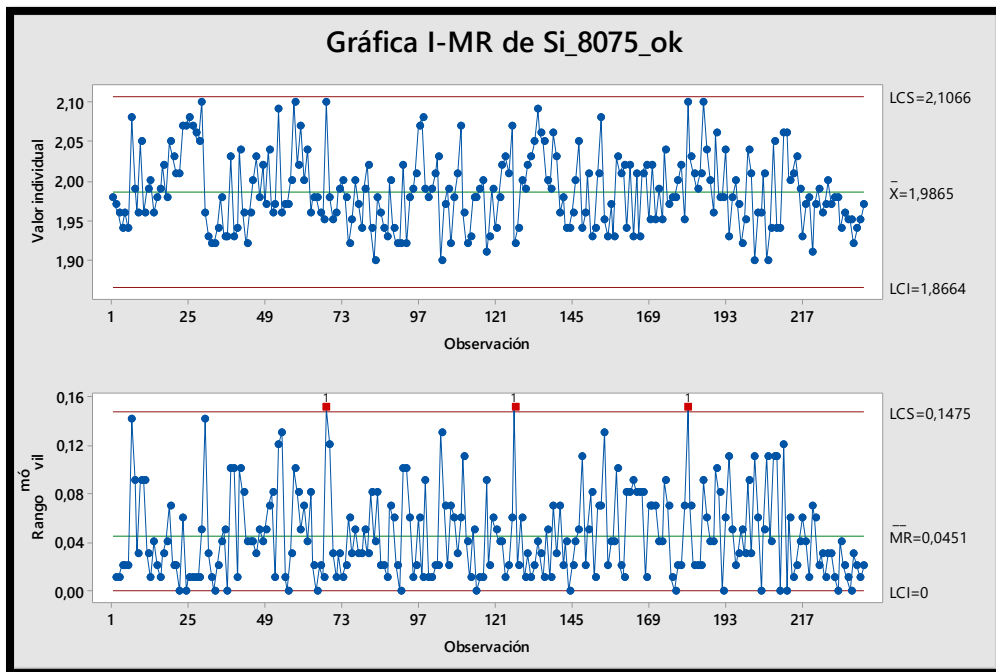
Gráfica 44. Gráficas de control del Si en el código 8075 del horno 21.



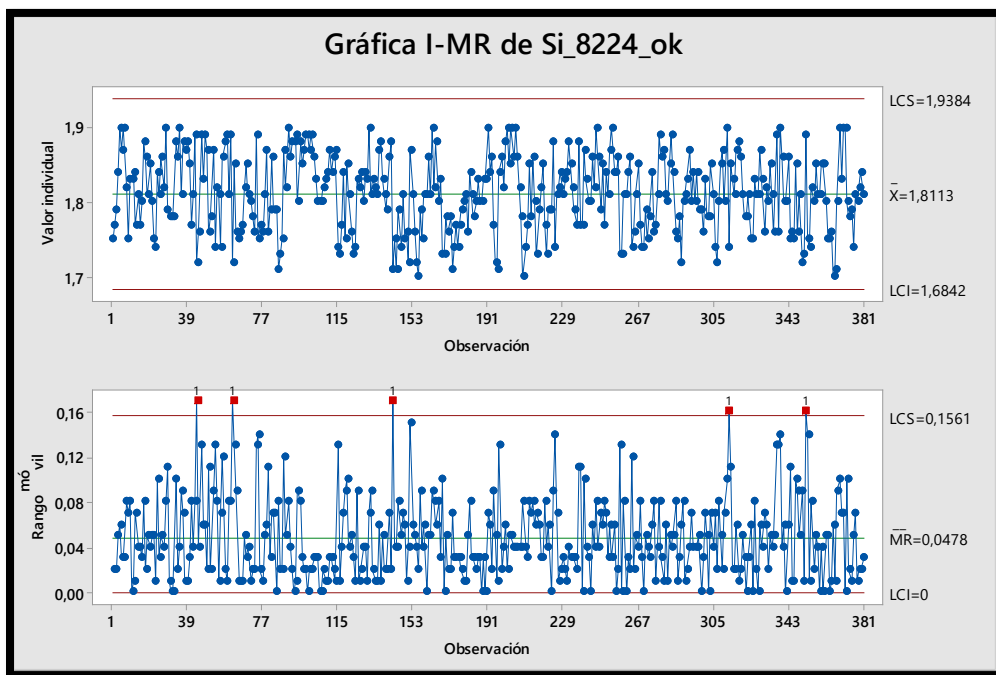
Gráfica 45. Gráficas de control del Si en el código 8224 del horno 21.



Gráfica 46. Gráficas de control del Si en el código 7882 del horno 22.



Gráfica 47. Gráficas de control del Si en el código 8075 del horno 22.

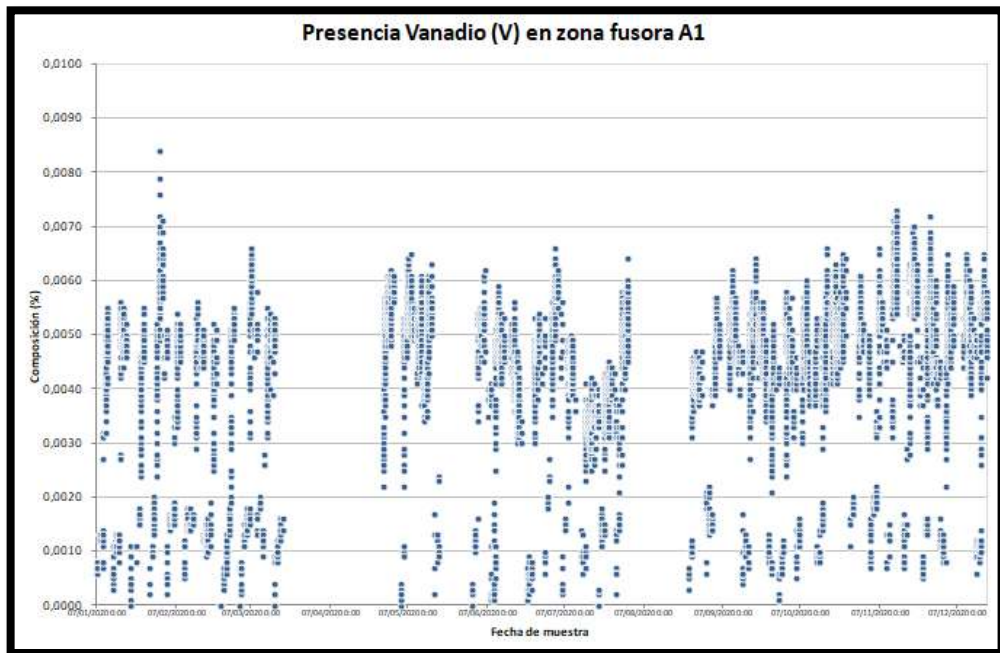


Gráfica 48. Gráficas de control del Si en el código 8224 del horno 22.

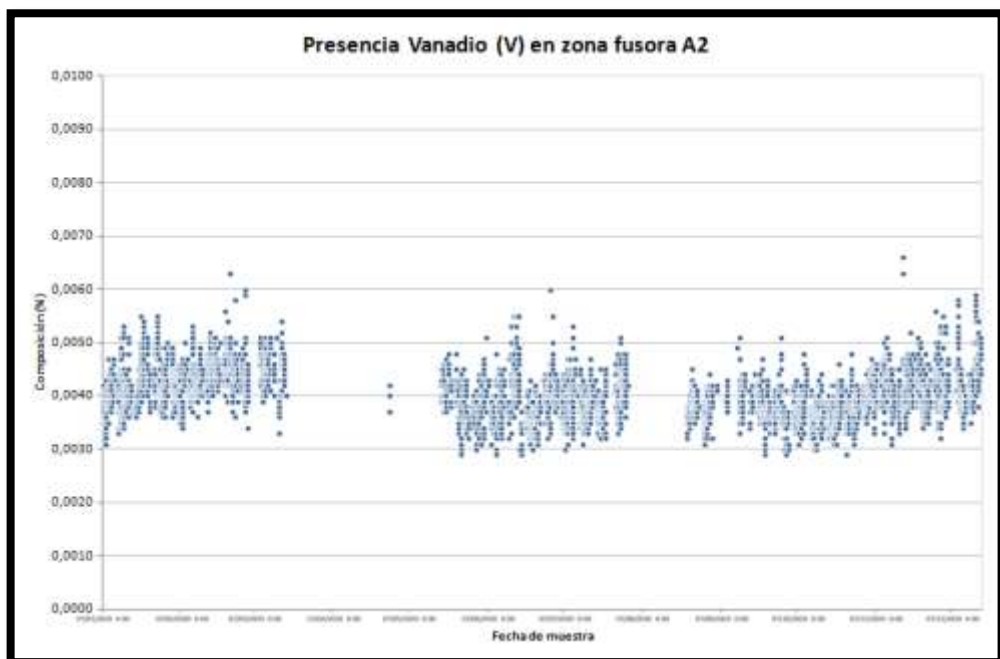
6.3. Resultados del estudio de los elementos residuales.

Este estudio busca diferencias significativas en las naves fusoras por la presencia de elementos residuales. Como se ha comentado anteriormente, son cuatro los elementos residuales a analizar, comparando su presencia en las tres zonas fusoras a lo largo del año 2020.

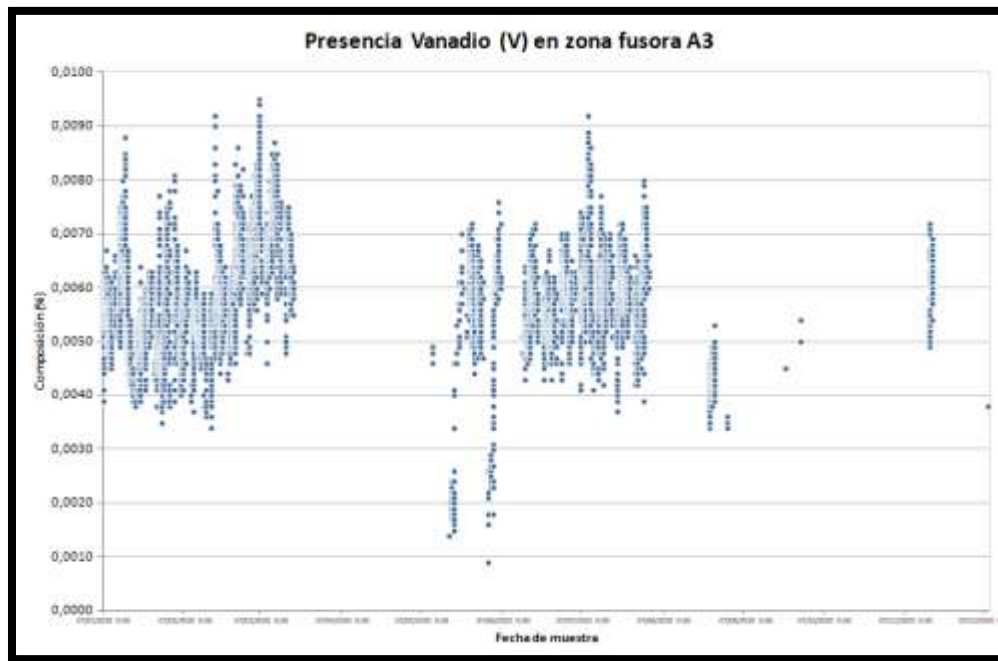
- Vanadio (V).



Gráfica 49. Vanadio (V) en zona fusora A1.

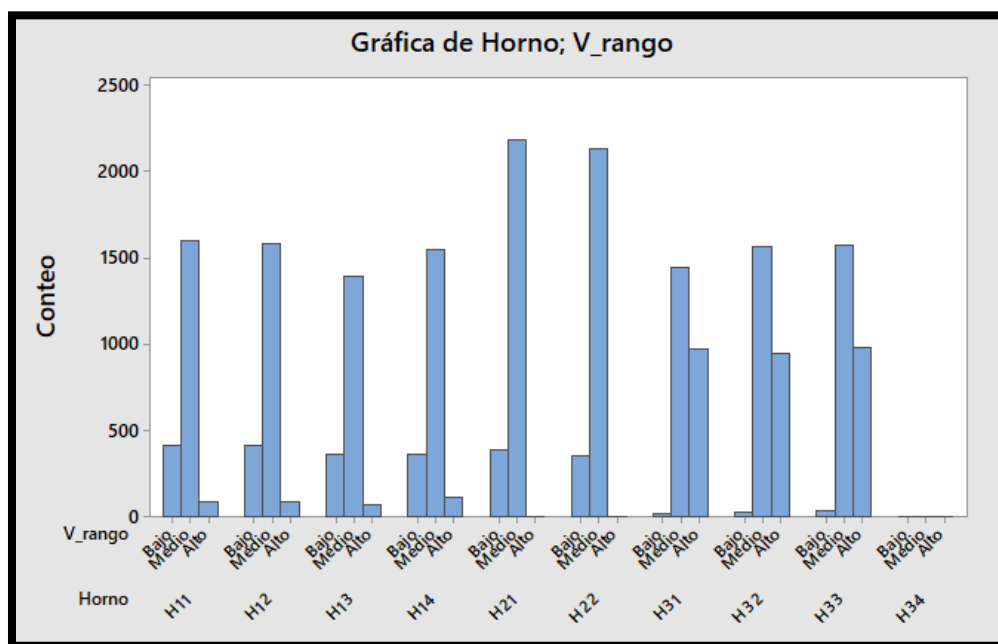


Gráfica 50. Vanadio (V) en zona fusora A2.



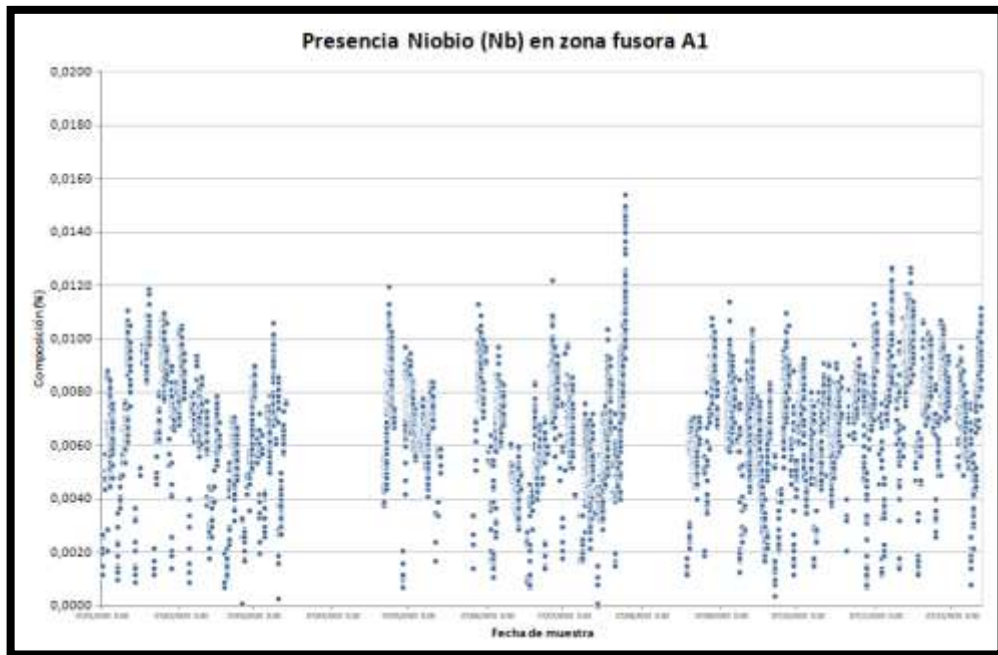
Gráfica 51. Vanadio (V) en zona fusora A3.

Las Gráfica 49, Gráfica 50 y Gráfica 51, representan la presencia de Vanadio (V) en las tres zonas fusoras. La Gráfica 52 representa la presencia de Vanadio (V) pero agrupada por rangos en función de los hornos. Se observa que en la zona fusora A1 hay valores de todos los rangos, principalmente del medio. En la zona fusora A2, sus valores se concentran en el rango medio, mientras que en la zona fusora A3, se encuentran tanto en el rango medio como alto.

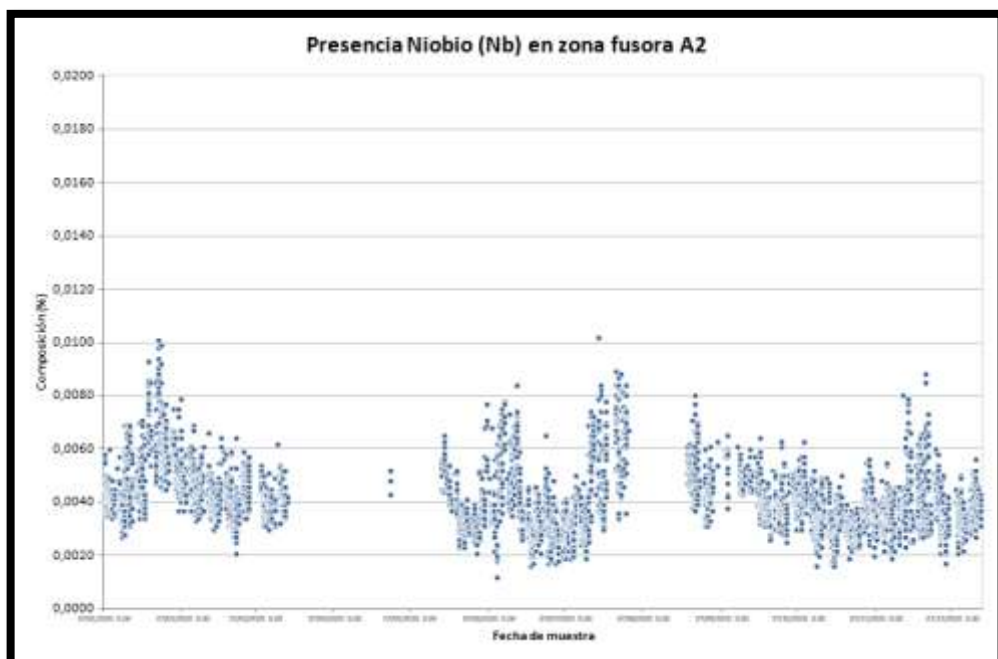


Gráfica 52. Vanadio (V) por rangos para cada horno.

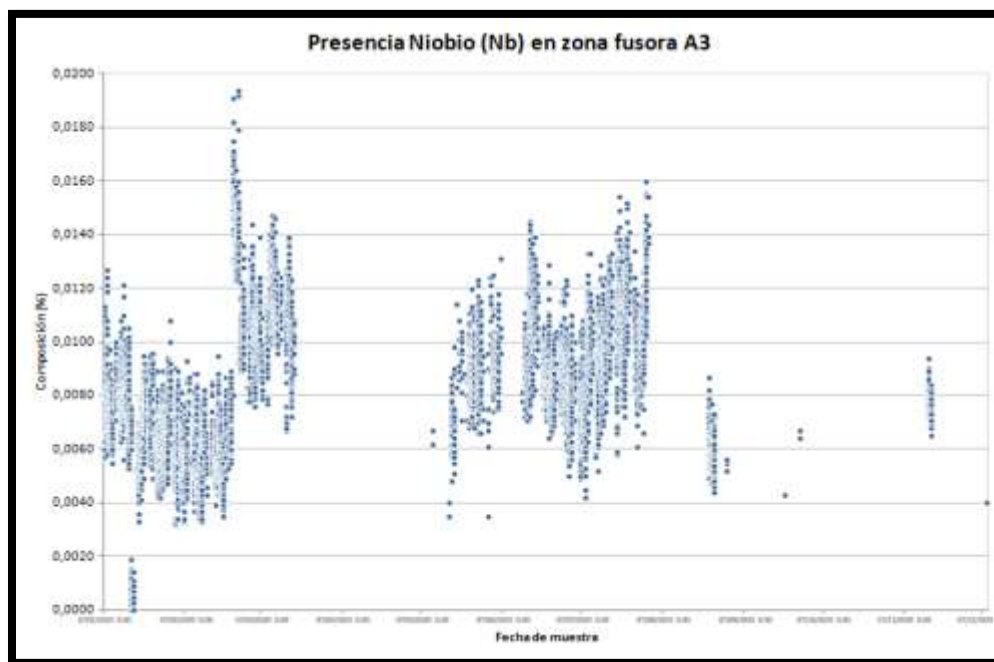
- Niobio (Nb).



Gráfica 53. Niobio (Nb) en zona fusora A1.

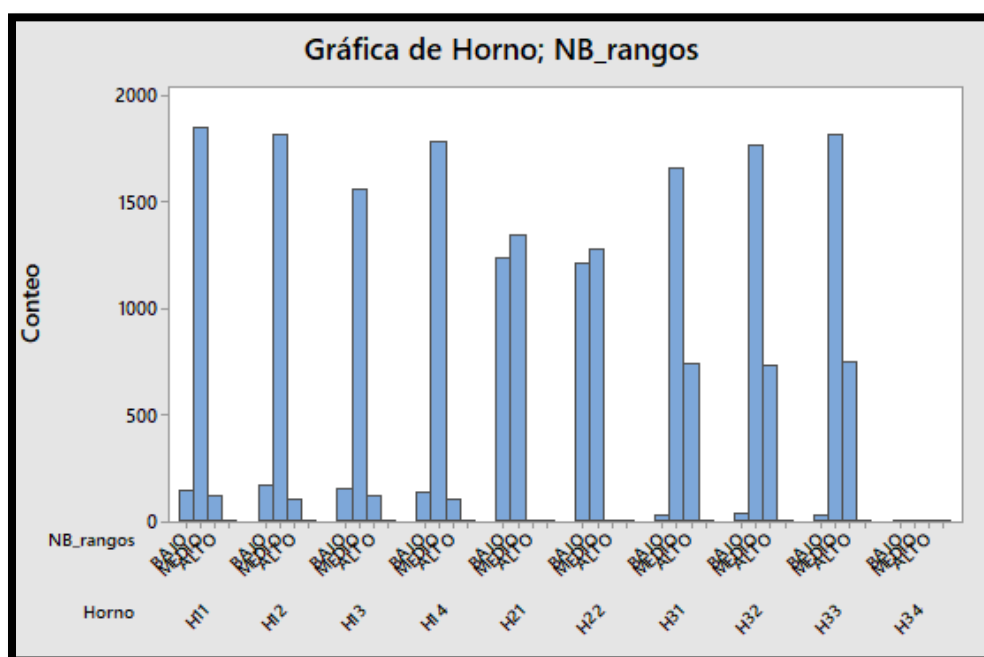


Gráfica 54. Niobio (Nb) en zona fusora A2.



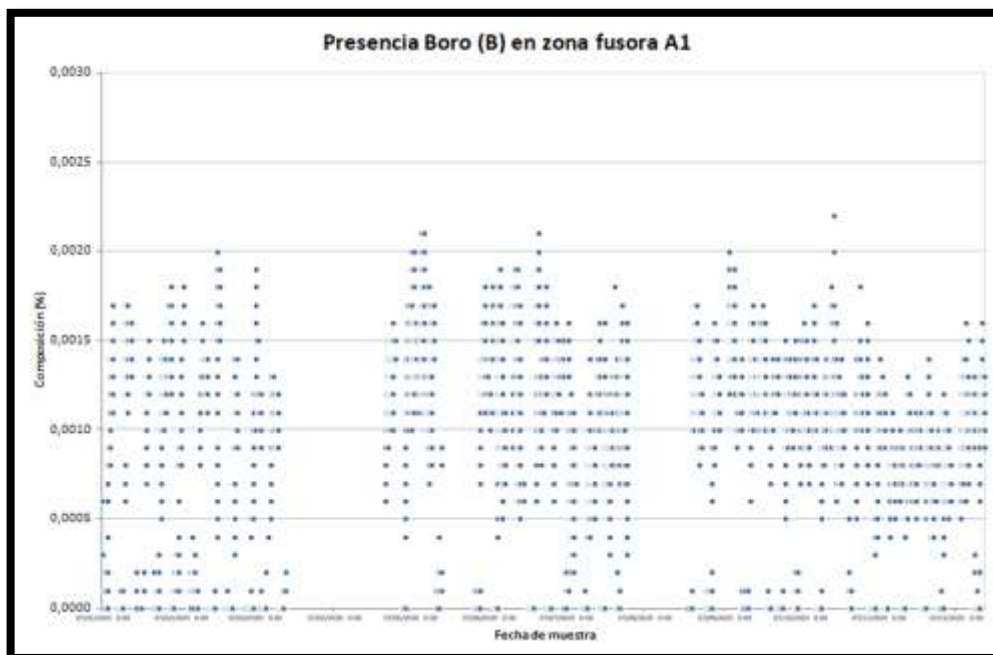
Gráfica 55. Niobio (Nb) en zona fusora A3.

Las Gráfica 53, Gráfica 54 y Gráfica 55, representan la presencia de Niobio (Nb) en las tres zonas fusoras. La Gráfica 56 representa la presencia de Niobio (Nb) pero agrupada por rangos en función de los hornos. Se observa que en la zona fusora A1 hay valores principalmente del rango medio. En la zona fusora A2, sus valores se concentran tanto en el rango bajo como en el medio, mientras que en la zona fusora A3, se encuentran principalmente en el rango medio, aunque el rango alto también tiene importancia.

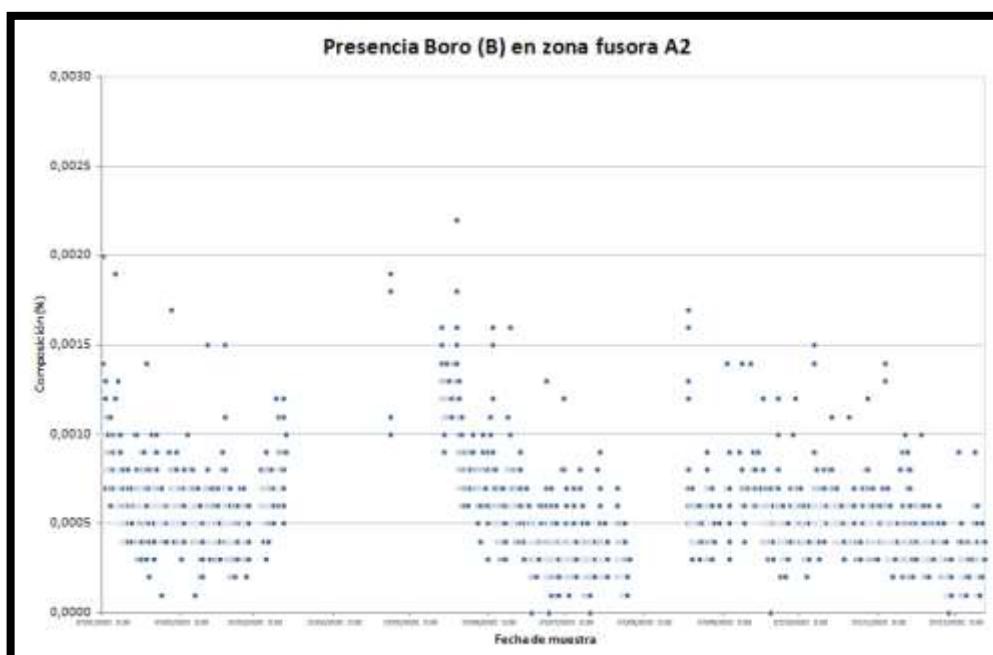


Gráfica 56. Niobio (Nb) por rangos para cada horno.

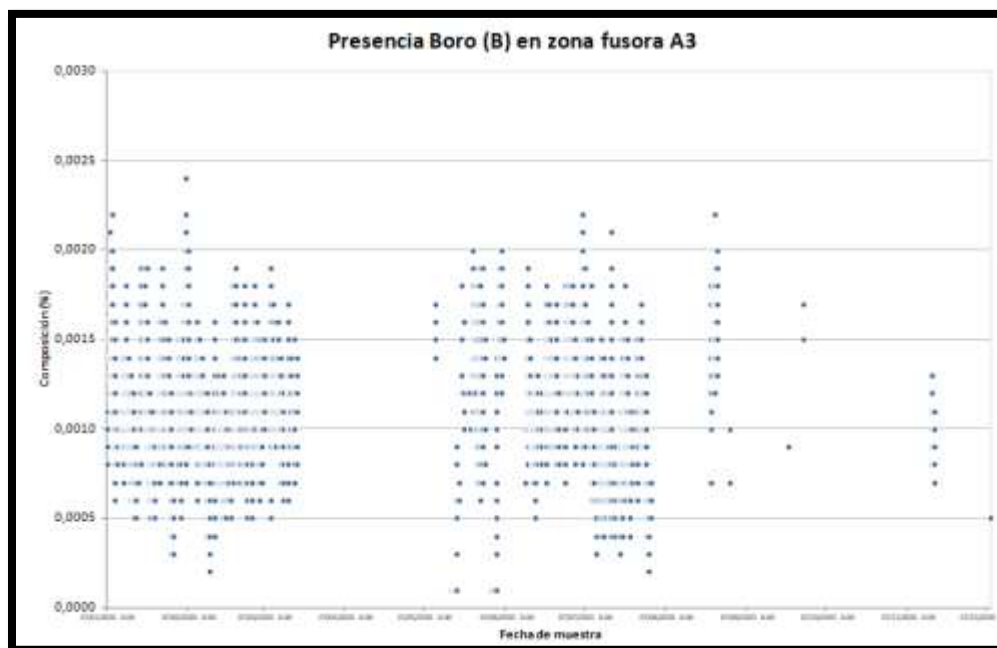
- Boro (B).



Gráfica 57. Boro (B) en zona fusora A1.

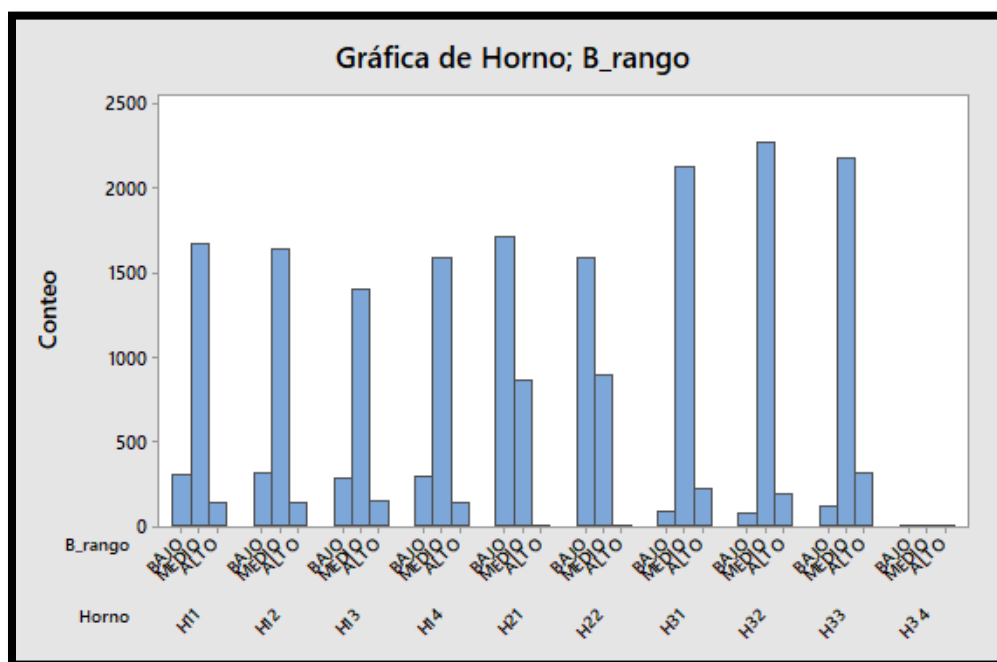


Gráfica 58. Boro (B) en zona fusora A2.



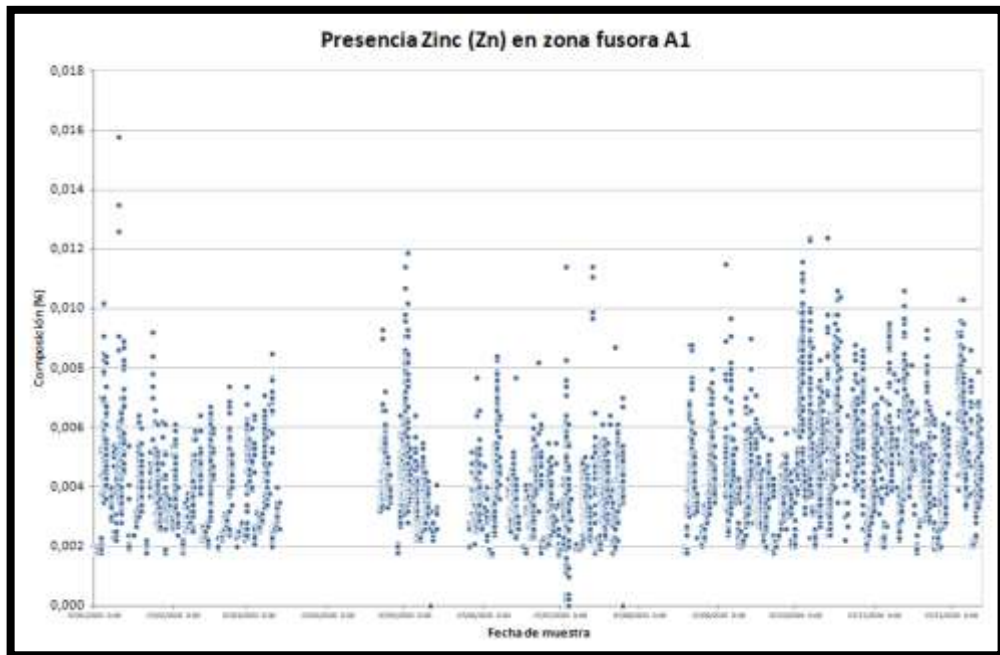
Gráfica 59. Boro (B) en zona fusora A3.

Las Gráfica 57, Gráfica 58 y Gráfica 59, representan la presencia de Boro (B) en las tres zonas fusoras. La Gráfica 60 representa la presencia de Boro (B) pero agrupada por rangos en función de los hornos. Se observa que tanto en la zona fusora A1 como en la A3 hay valores principalmente del rango medio. Sin embargo en la zona fusora A2, sus valores se concentran tanto en el rango bajo como en el medio.

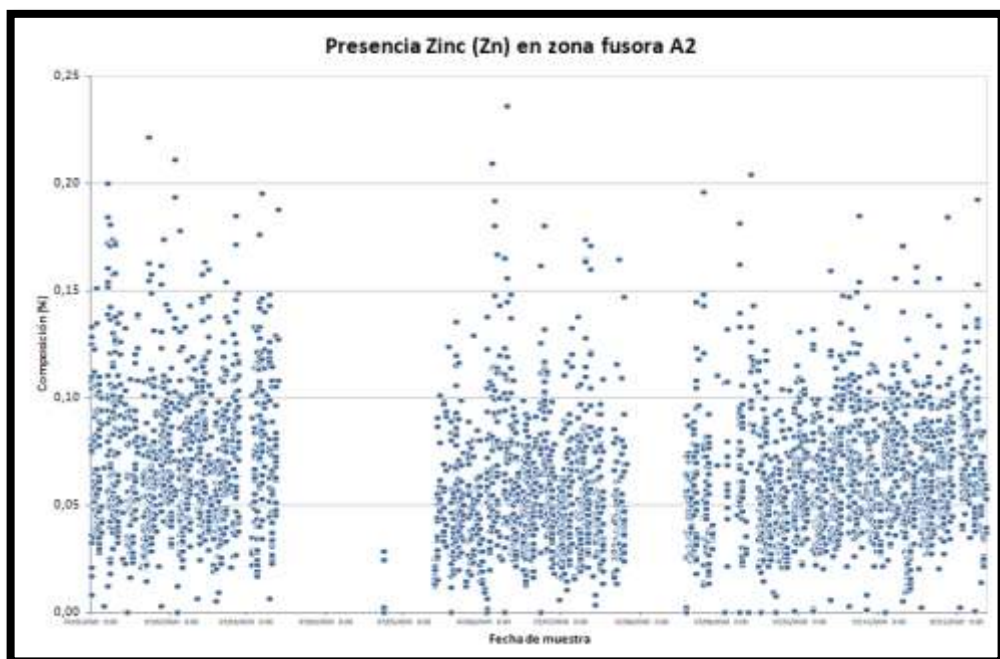


Gráfica 60. Boro (B) por rangos para cada horno.

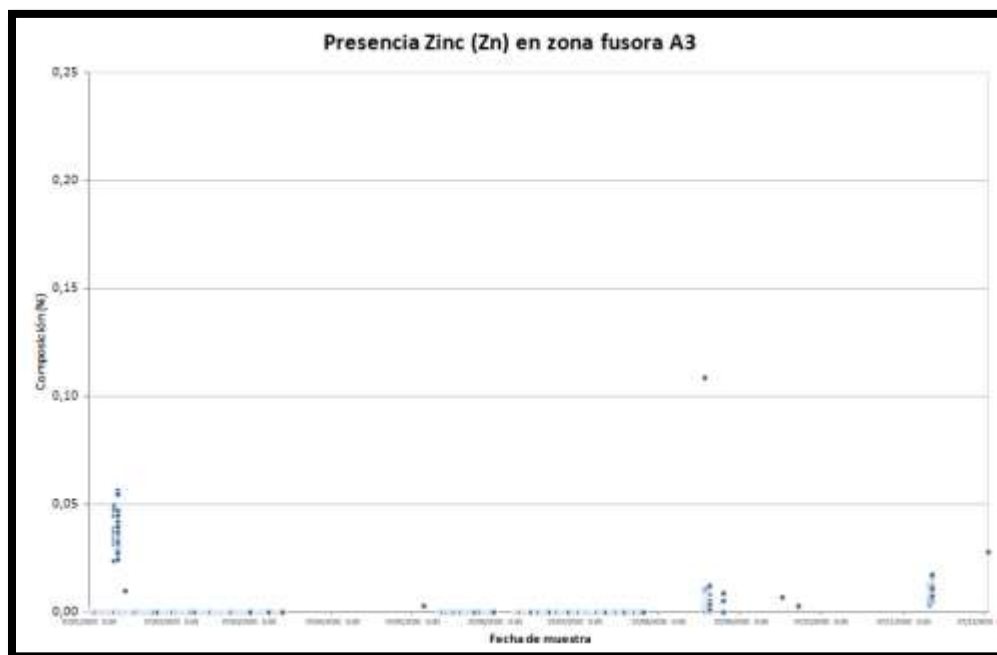
- Zinc (Zn).



Gráfica 61. Zinc (Zn) en zona fusora A1.

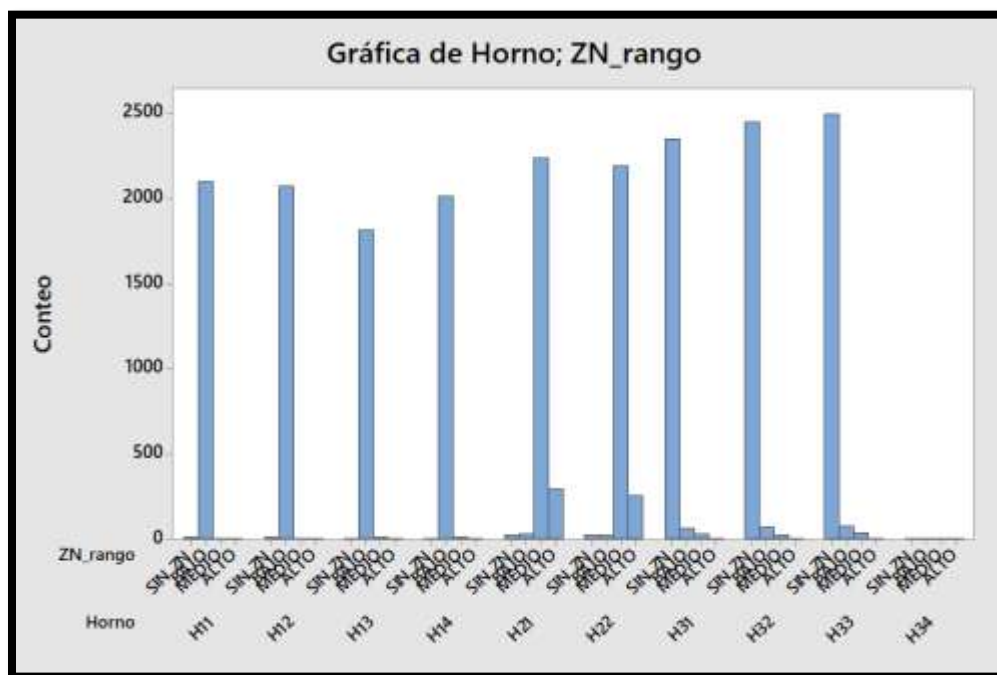


Gráfica 62. Zinc (Zn) en zona fusora A2.



Gráfica 63. Zinc (Zn) en zona fusora A3.

Las Gráfica 61, Gráfica 62 y Gráfica 63, representan la presencia de Zinc (Zn) en las tres zonas fusoras. La Gráfica 64 representa la presencia de Zinc (Zn) pero agrupada por rangos en función de los hornos. Se observa que en la zona fusora A1 todos los valores se encuentran en el rango bajo. En la zona fusora A2, sus valores se concentran en el rango medio con algunos valores en el alto, mientras que la zona fusora A3 no tiene presencia de Zinc (Zn).



Gráfica 64. Zinc (Zn) por rangos para cada horno.

6.4. Resultados del estudio de los analistas.

En este análisis se ha elegido el código 7882 para cada zona fusora con los valores del Espectrómetro.

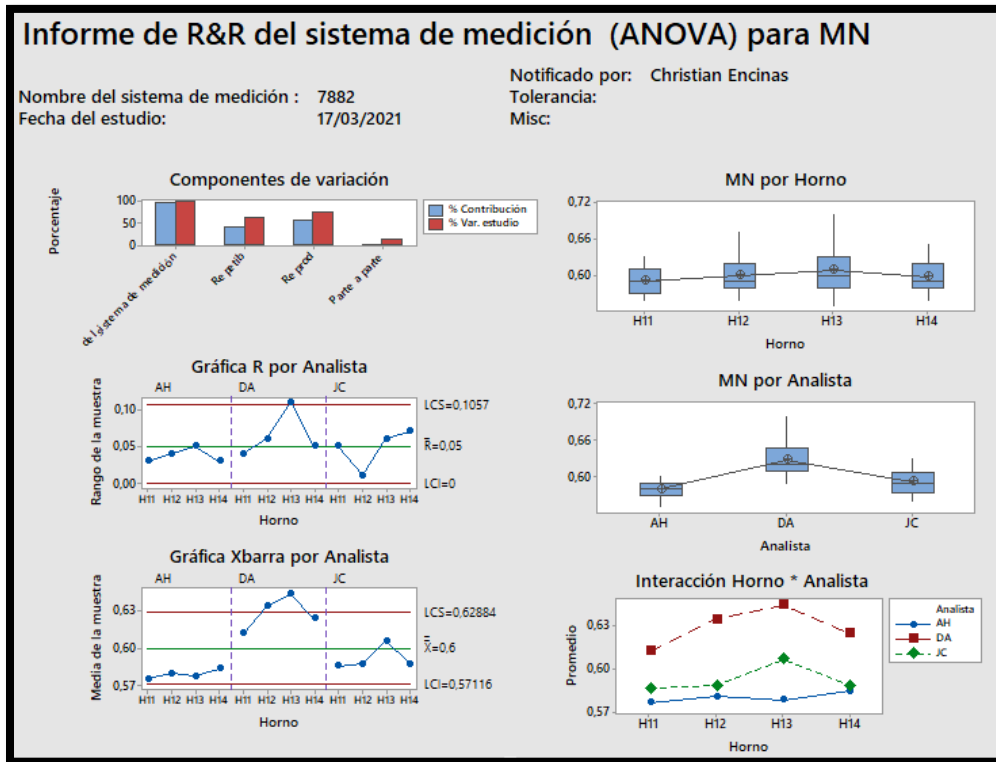
El análisis R&R muestra por resultados seis gráficas con la siguiente información. [39]

- El gráfico Componentes de Variación es un resumen del análisis, donde se indica la repetibilidad y la reproducibilidad entre otros valores.
- La Gráfica R por analista representa los valores dentro del rango de medidas, donde dichos valores se deben de repartir tanto por encima como por debajo de la línea central.
- La Gráfica Xbarra por Analista es un gráfico de control, donde interesa que haya datos fuera de los límites para comprobar que el sistema de control puede distinguir eficazmente las diferentes partes.
- La Gráfica Elemento por Horno representa las mediciones medias por horno, y permite visualizar si algún horno tiene mediciones con más variación.
- La Gráfica Elemento por Analista representa las mediciones promedio por analista y permite visualizar si algún analista produce mediciones diferentes.
- La Gráfica Horno*Analista debe representar una mediciones prácticamente paralelas que indiquen que los analista tienen los mismos valores tomados.

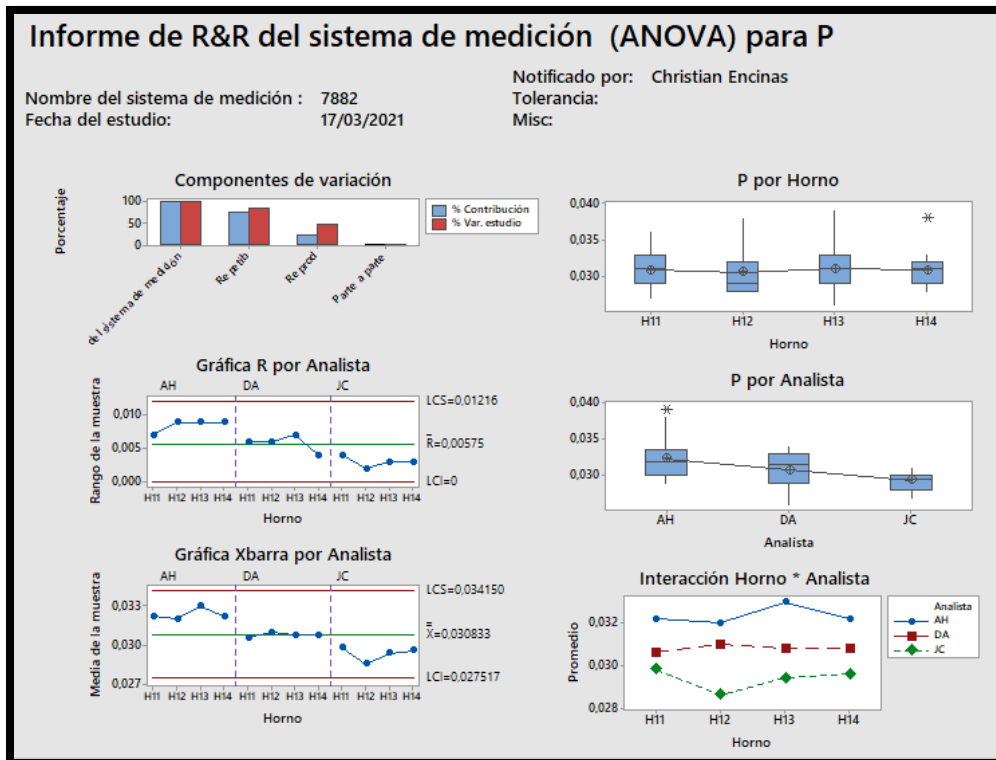
Los resultados del estudio por zona fusora son los siguientes.

- Zona fusora A1.

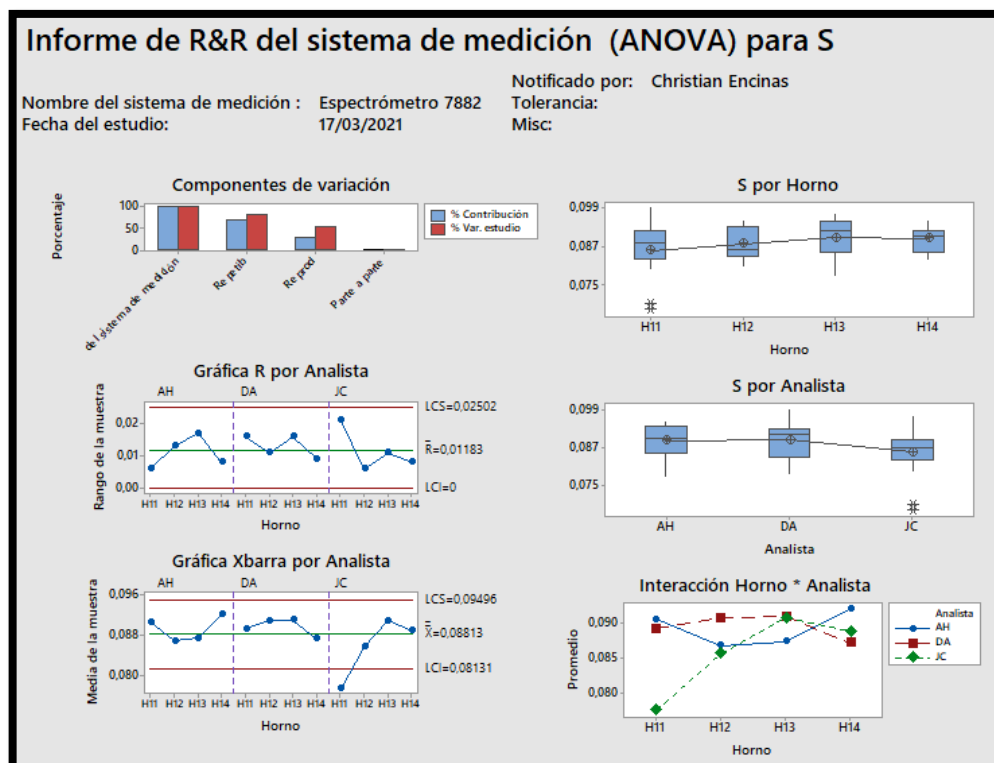
Las Gráfica 65, Gráfica 66 y Gráfica 67, representan los análisis R&R de la zona fusora A1. Los resultados que se pueden observar en ellas son los siguientes. La repetibilidad y la reproductividad tienen unos valores altos en todos los elementos. Los valores en la Gráfica R por analista se reparten tanto por encima como por debajo de la línea central y dentro de los límites. En las Gráficas Xbarra por analista existen datos fuera de los límites menos en el Fósforo (P). En todas las gráficas Elemento por horno y Elemento por analista se observa que prácticamente todas las medidas son del mismo orden, sin encontrar mediciones diferentes. En la última Gráfica, se observa que para el Manganeso (Mn) y el Fósforo (P) las mediciones sí son paralelas mientras que en el Azufre (S) no lo son.



Gráfica 65. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A1.



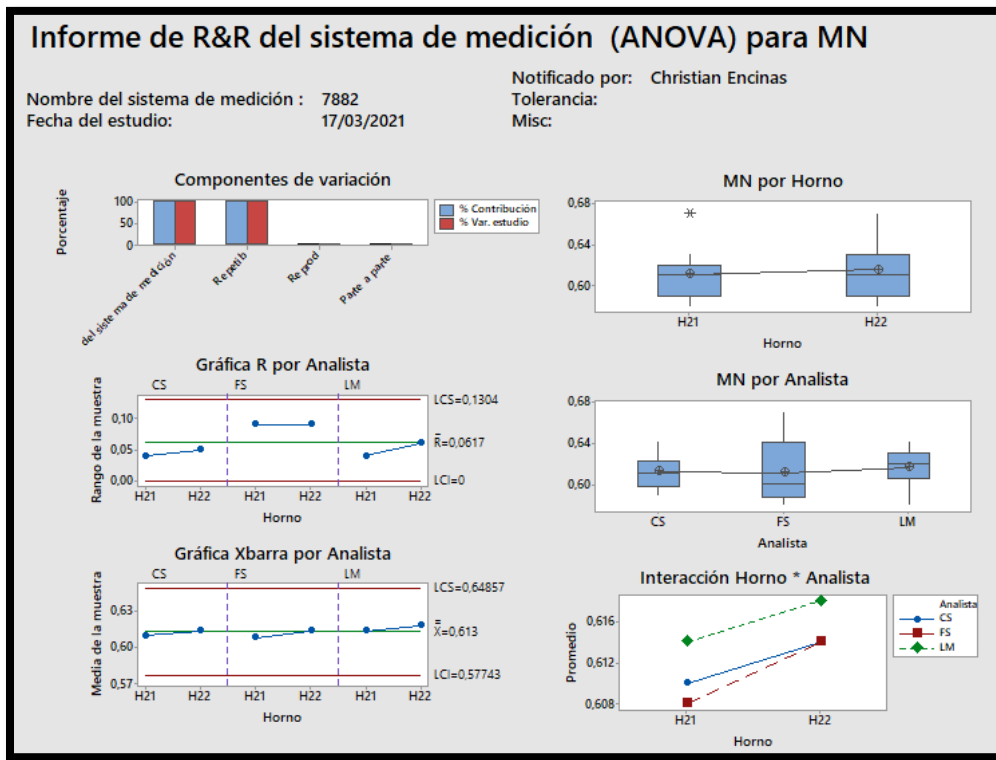
Gráfica 66. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A1.



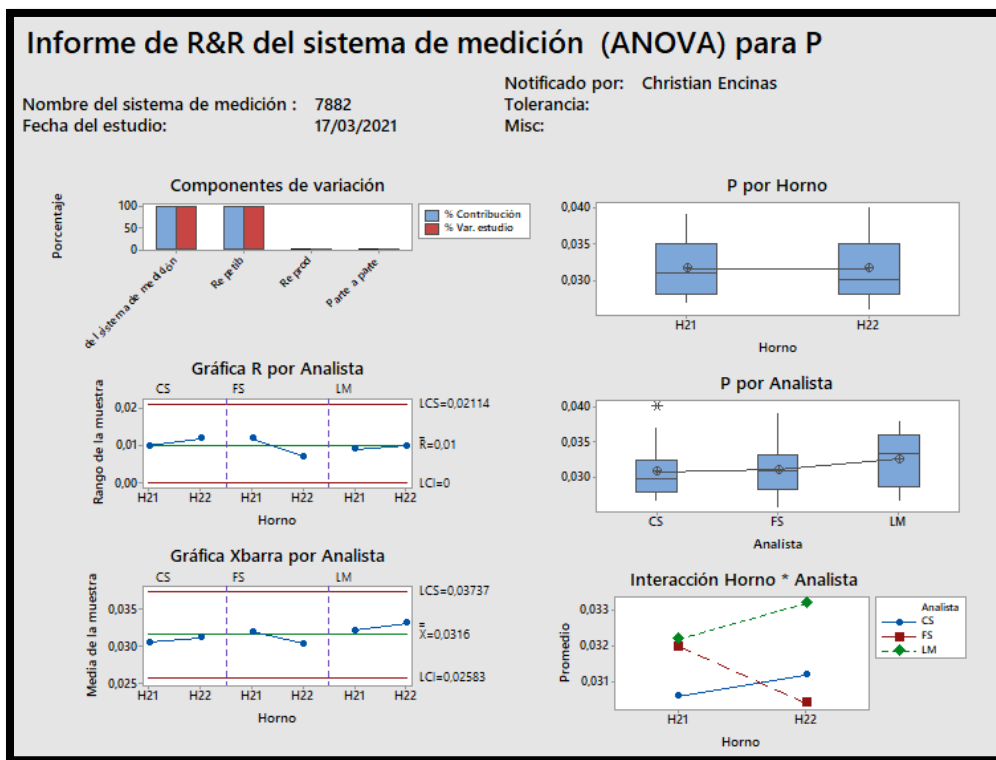
Gráfica 67. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A1.

- Zona fusora A2.

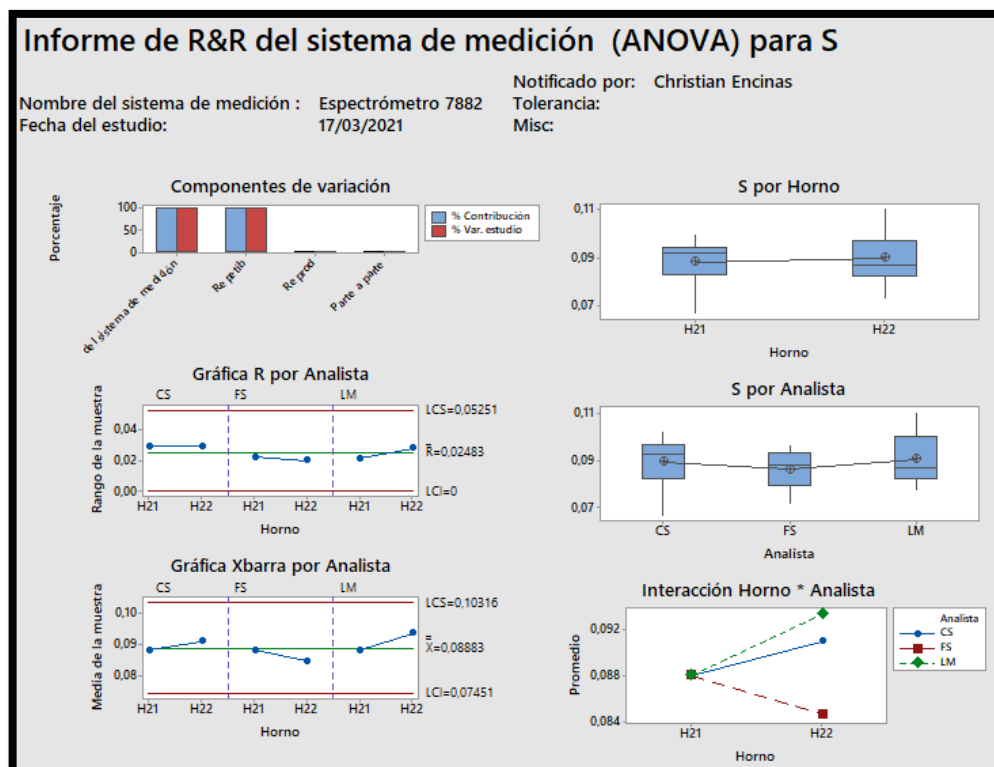
Las Gráfica 68, Gráfica 69 y Gráfica 70, representan los análisis R&R de la zona fusora A2. Los resultados que se pueden observar en ellas son los siguientes. La repetibilidad tiene unos valores altos en todos los elementos mientras que en la reproductividad son nulos. Los valores en la Gráfica R por analista se reparten tanto por encima como por debajo de la línea central y dentro de los límites. En las Gráficas Xbarra por analista no existen datos fuera de los límites. En todas las gráficas Elemento por horno y Elemento por analista se observa que prácticamente todas las medidas son del mismo orden, sin encontrar mediciones diferentes. En la última Gráfica, se observa que para el Manganeso (Mn) las mediciones son prácticamente paralelas mientras que en el Fósforo (P) y el Azufre (S) no lo son.



Gráfica 68. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A2.



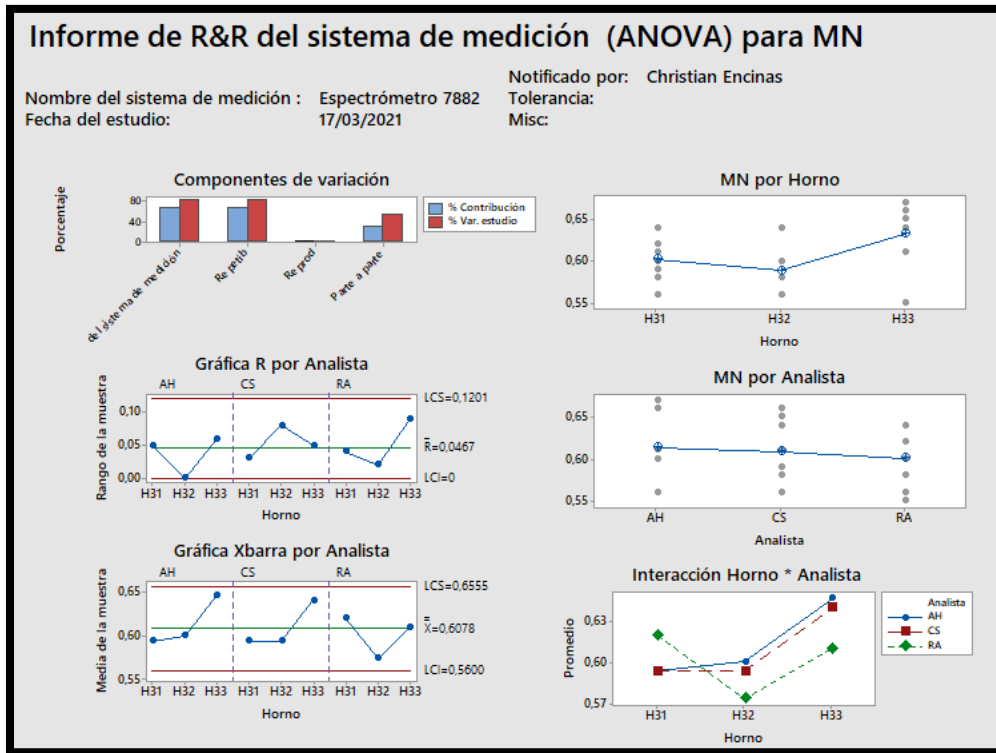
Gráfica 69. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A2.



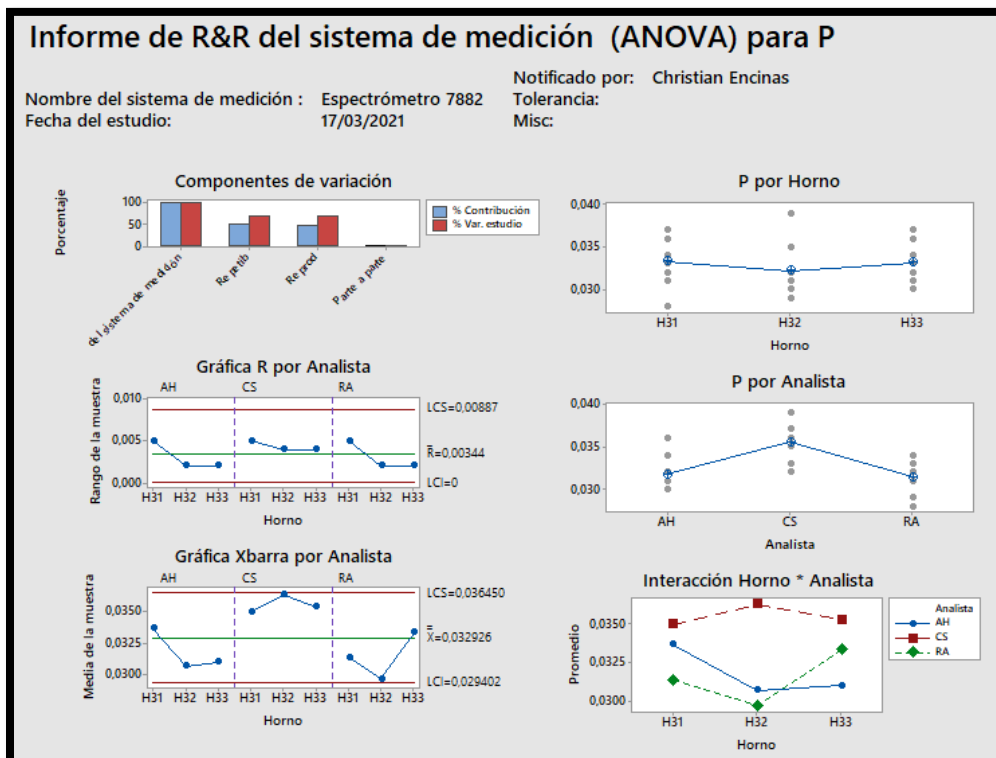
Gráfica 70. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A2.

- Zona fusora A3.

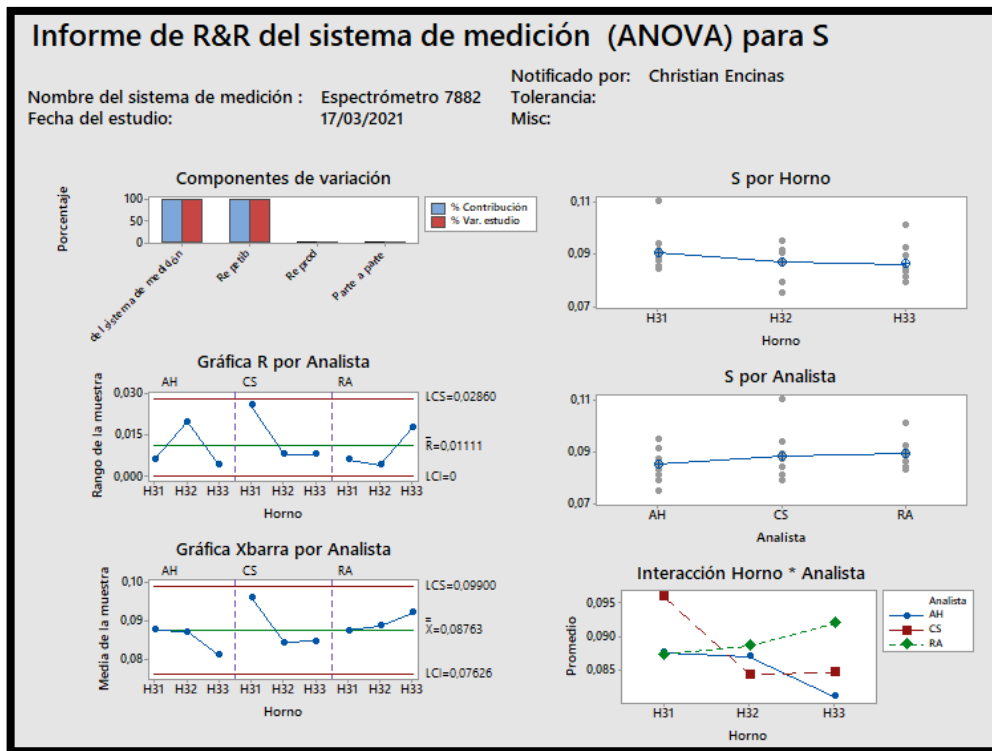
Las Gráfica 71, Gráfica 72 y Gráfica 73, representan los análisis R&R de la zona fusora A3. Los resultados que se pueden observar en ellas son los siguientes. La repetibilidad tiene unos valores altos y en la reproductividad son nulos para el Manganeso (Mn) y el Azufre (S), mientras que para el Fósforo (P) ambos son altos. Los valores en la Gráfica R por analista se reparten tanto por encima como por debajo de la línea central y dentro de los límites. En las Gráficas Xbarra por analista no existen datos fuera de los límites. En todas las gráficas Elemento por horno y Elemento por analista se observa que prácticamente todas las medidas son del mismo orden, sin encontrar mediciones muy diferentes. En la última Gráfica, se observa que ninguna de las mediciones es paralela.



Gráfica 71. Análisis R&R del Manganeso (Mn) en la zona fusora A3.



Gráfica 72. Análisis R&R del Fósforo (P) en la zona fusora A3.



Gráfica 73. Análisis R&R del Azufre (S) en la zona fusora A3.

6.5. Resultados de la estrategia de control para la producción.

La aplicación desarrollada necesita estar relacionada con la base de datos Gamas, en la cual se recogen los límites de trabajo de todos los códigos. Los elementos que se controlan con esta aplicación son el Carbono (C), el Silicio (Si), el Manganeso (Mn), el Azufre (S), el Fósforo (P), el Estaño (Sn), el Cromo (Cr), el Molibdeno (Mn) y el Cobre (Cu).

| | COD | Caldo | LTI_C | LTS_C | OBJ_C | LTI_Si | LTS_Si | OBJ_Si | LTI_Mn | LTS_Mn | OBJ_Mn |
|---------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Línea 1 | 7139 | 6 | 3,70 | 3,80 | 3,75 | 1,80 | 2,00 | 1,90 | 0,70 | 0,85 | 0,60 |
| Línea 2 | 8232 | 6 | 3,73 | 3,83 | 3,75 | 1,80 | 2,00 | 1,90 | 0,70 | 0,85 | 0,75 |
| LT_COMÚN | | | 3,73 | 3,80 | No | 1,80 | 2,00 | Si | 0,70 | 0,85 | Si |
| LT_alternativo | | | 3,70 | 3,80 | 3,75 | 1,80 | 2,00 | 1,90 | 0,70 | 0,85 | 0,78 |
| Ajuste cuchara otra pieza (%Elemento) | | | | | 0,00 | | | 0,00 | | | 0,00 |
| Ratio aprovechamiento | | | | | 1,00 | | | 0,75 | | | 0,70 |
| Ajuste (kg/Tm_metal) | | | | | 0,000 | | | 0,000 | | | 0,000 |

Ilustración 37. Aplicación de control de los componentes químicos.

En la Ilustración 37, se muestra la aplicación creada. Los operarios solo tienen que añadir los dos códigos que se van a fundir y esperar para conocer los límites de trabajo.

La aplicación busca en la base de datos Gamas el tipo de caldo (en rojo), los límites de trabajo superior e inferior, además del valor objetivo de los elementos a controlar.

El funcionamiento de la aplicación se basa en buscar un límite de trabajo común para ambas piezas. Para ello, busca el mayor LTI y el menor LTS de ambos códigos. Si la diferencia es superior a 0,1 entre ambos límites de trabajo, el valor del elemento debe encontrarse dentro de ese rango. Sin embargo, si la diferencia es menor a 0,1 entre ambos límites, tenemos que buscar un límite de trabajo alternativo, debido a que no pueden realizar un ajuste efectivo menor a 0,1 por la incertidumbre de los equipos.

En caso de que se tenga que trabajar con un límite de trabajo alternativo, la aplicación selecciona el menor LTI y LTS entre ambos códigos para ello. El valor objetivo lo calcula como un promedio entre ambos límites de trabajo. Eligiendo estos límites de trabajo, conseguimos que el código con límites inferiores no salga con un valor elevado de ese elemento. Sin embargo, el otro código saldrá con valores inferiores a los de su límite de trabajo. Este problema se soluciona añadiendo en la cuchara más cantidad de dicho elemento. La aplicación también se encarga de calcular la cantidad necesaria de elemento a añadir en la cuchara mediante el valor "Ajuste".

Calculados los límites de trabajo, y en caso de tener que realizar un ajuste en cuchara, conocido su también la cantidad a añadir, los analistas pueden empezar con la fusión del metal.

7. Conclusiones.

La realización de estos estudios, con la obtención y análisis de sus resultados, nos llevan a establecer una serie de conclusiones sobre ellos.

Se parte de la idea de la necesidad de realizar un experimento como el Carbodeterminador para obtener la composición adecuada del Carbono (C) y del Silicio (Si) en el caldo del metal fundido, debido a que los valores obtenidos a través del Espectrómetro no son fiables. Las causas a la falta de fiabilidad del Espectrómetro se deben a la incertidumbre del valor obtenido para el Carbono (C) cuando se trabaja en rangos altos de este elemento. Esto está relacionado con la longitud de onda considerada por el equipo para el Carbono (C), así como su volatilidad al no tratarse de una fundición blanca. Tras este estudio podemos confirmar que las medidas tomadas por el Espectrómetro no son las adecuadas. La mayoría de los valores del Carbono (C) se encuentran fuera de sus límites de trabajo, sin embargo los del Carbodeterminador sí se encuentran dentro de ellos. En el Silicio (Si), estos errores son más difíciles de apreciar, ya que la mayoría de los valores medidos por el Espectrómetro sí se encuentran dentro de los límites de trabajo, pero no son similares a los valores obtenidos por el Carbodeterminador. Por lo tanto, se confirma que las mediciones del Espectrómetro para estos elementos no son fiables, siendo necesaria la realización del Carbodeterminador para ambos elementos.

Con el estudio que se realiza al Carbono (C) y al Silicio (Si) se busca comprobar que los datos tomados se ajustan a algún tipo de distribución. La más adecuada es la distribución normal, la cual buscamos mediante la realización de histogramas con los datos. En ellos se observa que no se ajustan a una distribución normal. Al comprobar si estos datos pueden ajustarse a otro tipo de distribuciones, comprobamos que ninguna mejora el resultado obtenido por la distribución normal. La razón de este suceso se debe a la fusión simultánea de dos códigos. La creación de nuevos límites de trabajo provoca que la composición tome diferentes valores sin un motivo aparente. Por esto, cuando representamos todos los valores juntos, el comportamiento que se observa no se ajusta a una ley normal. Los gráficos de control, nos permiten conocer si las mediciones tomadas son fiables. En estos gráficos de control, la mayoría de valores se encuentran dentro de los límites de control, por lo que las medidas tomadas tienen una gran estabilidad, proporcionando fiabilidad.

El estudio de los elementos residuales nos muestra que estos elementos se encuentran presentes en distintos rangos en todos los hornos. Su presencia en estas cantidades no tiene influencia sobre las propiedades de las piezas. Esta es la razón por la que no se puede discriminar las chatarras de acero con

contenidos de elementos residuales. El caso del Zinc (Zn) es particular, ya que se observa que puede encontrarse en cantidades más elevadas, sin embargo su presencia tampoco tiene influencia en las propiedades de las piezas. El problema que encontramos se trata, de que se volatiliza y necesitamos recogerlo mediante aspiración. Por esto, los paquetes de chatarra se llevan a la zona fusora A2, como se observa en la *Gráfica 64*, debido a que los hornos 21 y 22 cuentan con los sistemas de aspiración más grandes.

El estudio R&R realizado a los analistas nos permite visualizar la variabilidad del sistema de medición. En ellos, se observa que hay cierta variación entre las medidas de los analistas. Las causas de esta variación se vuelvan a deber a la fusión de dos códigos de manera simultánea y que las medidas realizadas no son a la misma fecha. Como todos los analistas no miden sobre la misma muestra, esto provoca que el código analizado este fundido simultáneamente con diferentes códigos y diferentes límites de trabajo. Por lo tanto, estas son las principales causas de que los analistas tengan diferentes valores en sus mediciones.

La fusión simultánea de dos códigos provoca que a la hora de realizar estudios estadísticos, estos no den resultados ideales como se esperan.

La creación de la aplicación que te indica los límites de trabajo y el ajuste en cuchara suponen para los analistas, poder obtener caldo de metal fundido con una mayor rapidez y fiabilidad que si tuvieran que realizar este trabajo de manera manual.

8. Líneas de futuro.

Este trabajo realizado puede ser complementado aumentando el análisis de la composición química del metal fundido al resto del proceso de obtención de piezas.

Se puede relacionar los datos de composición con las piezas defectuosas o no conformes. Para ello, se debe comprobar cómo influye la composición química en la obtención de piezas defectuosas, buscando cuáles pueden ser las causas y las posibles soluciones.

Otra línea de trabajo sería centrarse en los hornos de fusión. A partir de los datos de la composición química para cada pieza, ver si existe alguna relación con el consumo de energía o el consumo de elementos refractarios.

9. Bibliografía.

- [1] Lingotes Especiales S.A., Última consulta 05/04/2021. Disponible en <https://www.lingotes.com/>
- [2] (2015) *Made in Spain – LE FC* [Archivo de video]. Última consulta 05/04/2021. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=NCFrX0sczhl>
- [3] (2015) *Hecho en CyL – Dona Dona, Lingotes Especiales y Proxima Systems* [Archivo de video]. Última consulta 05/04/2021. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=jKSDA1DNuLM>
- [4] (2011) *Made in Castilla y León – Lingotes Especiales, Onys Solar y Beneficio Económico* [Archivo de video]. Última consulta 05/04/2021. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=-N1bTvwgkvA>
- [5] APRAIZ, J. (Madrid 1998). *Fundiciones*. CIE Inversiones Editoriales DOSSAT 2000.
- [6] IZAGA, J.; INTXAUSTI. P. (1993). *Metalurgia de las Fundiciones de Hierro*. Azterlan.
- [7] *Apuntes Ciencia de Materiales*. Segundo curso de Ingeniería Mecánica. Universidad de Valladolid, UVa.
- [8] OPOSINET. *Tema 23 – Fundiciones. Clasificación. Estructura metalográfica. Transformaciones metalúrgicas. La influencia en sus propiedades de los tratamientos térmicos. Formas comerciales*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://www.oposinet.com/temario-de-fabricacion-mecanica-secundaria/temario-1-fabricacion-mecanica/tema-23-fundiciones-clasificacin-estructura-metalografica-transformaciones-metalurgicas-la-influencia-en-sus-propiedades-de-los-tratamientos-trmicos-formas-comerci/>

[9] INGEMECÁNICA. *Tutorial nº 108 – Estudio y Clasificación de las Fundiciones*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn108.html>

[10] INSTITUTO ASTECO (Julio 2018). *Tipos de fundiciones de hierro*. Última consulta 20/05/2021. Disponible <https://institutoasteco.com/asteco/tipos-de-fundiciones-de-hierro/>

[11] ESTUDIO Y ENSAYO DE MATERIALES (2008). *Fundiciones*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://estudiodyensayo.files.wordpress.com/2008/11/fundiciones.pdf>

[12] CASTRO, G. (Febrero 2009). *Fundiciones*. Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A. Última consulta 20/05/2021. Disponible en https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Fundiciones.pdf

[13] *Tratamiento térmico de las fundiciones*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF04/es_DFM_DMMF04_Contenidos/website_41_tratamientos_trmicos_de_las_fundiciones.html

[14] RADVER. *Tratamientos térmicos*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://www.radver.com/procesos/tratamientos-termicos.html>

[15] CRESPO, E.; APARICIO, D. (2005). *Tratamientos térmicos de una fundición blanca*. Revista Metalspain. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <http://www.metalspain.com/pruebaNUEVOsitio/ArtTT.pdf>

[16] *Tipología de defectos en fundición por gravedad*. [https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DMMF/DMMF03/es_DFM_DMMF03_Contenidos/website_21_tipologia_d e_defectos_en_fundicin_por_gravedad.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DMMF/DMMF03/es_DFM_DMMF03_Contenidos/website_21_tipologia_de_defectos_en_fundicin_por_gravedad.html)

[17] SERRANO, R. *Defectos en las piezas fundidas*. Universidad de Málaga. Última consulta 20/05/2021. Disponible en http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos_Fundicion_9.pdf

[18] FUMBARRI DURANGO (2013 - 2014). *The Heavy Casting Foundry Blog. Defects*. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://fumbarri.wordpress.com/category/defects/>

[19] LOIZAGA, A; SERTUCHA, J; SUÁREZ, R. (2008). *Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido*. Real Sociedad Española de Química. Última consulta 20/05/2021. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/40836140_Defectos_metalurgicos_generados_por_la_presencia_de_gases_en_el_metal_fundido

[20] RODRÍGUEZ, T.; PARADA, A.; ORDÓÑEZ, U. (2010). *Predicción de defectos en piezas fundidas mediante el uso de la simulación*. Revista Cubana de Ingeniería. Última consulta 20/05/2021. Disponible en <https://1library.co/document/zlrmjrgz-prediccion-de-defectos-piezas-fundidas-mediante-uso-simulacion.html>

[21] STEFANESCU, D.M. (1988). *ASM HANDBOOK, VOLUMEN 15 CASTING*.

[22] *Capítulo II. Influencia de un tercer elemento en la fundición gris*. Última consulta 25/05/2021. Disponible en http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_43_187_9_280.pdf

[23] VARGAS,E. (2017). *Influencia de la materia prima en las características de las fundiciones grises del norte de Perú*. Universidad de Piura. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3210>

[24] GONZAGA, R.; FERNÁNDEZ, J. (2006). *Dependencia de las propiedades mecánicas y de la composición química en la fundición de grafito esferoidal*. Revista de Metalurgia, 42. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/9/9>

[25] TORO, R. (2017). *Capítulo I. Fundiciones grises*. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <https://silo.tips/download/capitulo-i-fundiciones-grises>

[26] CORONA-TENORIO, I.; RODRIGUEZ, J.L.; CHÁVEZ-ALCALÁ, J.F.; TORRES, G. *Influencia del molibdeno sobre la microestructura y propiedades de resistencia en hierro nodular*. Última consulta 25/05/2021. Disponible en http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20050662_2831.pdf

[27] LACAZE, J.; SERTUCHA, J.; LARRAÑAGA, P.; SUÁREZ, R. (2016). *Influencia del carbono, silicio, níquel y otros elementos de aleación sobre las propiedades mecánicas de la fundición con grafito esferoidal en bruto de colada*. Revista de Metalurgia, 52. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1383>

[28] MARTÍN, L.O.; GARCÍA, A.; PINO, L.; SIMÓN, A. (2010). *Fundición gris aleada con Al, Si y Mn para la fabricación de las chumaceras de los carros ferroviarios para el transporte de la caña*. Universidad de Camagüey. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <https://biblat.unam.mx/hevila/Centroazucar/2010/vol37/no1/7.pdf>

[29] ROSARIO, S.; VILLACORTA, H.; FALCONI, V.; RENGIFO, W.; MARTÍNEZ, J.M. (2011). *Influencia del cobre en la transformación gamma-alfa en la fundición gris y nodular. Templabilidad*. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/667/521>

[30] ASENJO, I.; LARRAÑAGA, P.; GARAY, J.; SERTUCHA, J. (2011). *Influencia de la composición química de diferentes chatarras de acero sobre las propiedades mecánicas de la fundición con grafito esferoidal*. Revista de Metalurgia, 42. Última consulta 25/05/2021. Disponible en <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1199>

[31] ECOEMBES (2019). *Metales reciclables: ¿cuáles son?* Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://ecoembesdudasreciclaje.es/metales-reciclables/>

[32] GBM METAL GROUP. *Proceso del reciclaje. Reciclar es revivir*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en <http://gbpmetalgroup.com/proceso-de-reciclaje/>

[33] NIROSA (2020). *Reciclaje de metales*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://nirosa.es/reciclaje-de-metales/>

[34] CIENCIAS AMBIENTALES (2016). *¿Cómo se recicla el aluminio?* Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/como-se-recicla-el-aluminio-13418>

[35] ECOEMBES (2019). *Cómo es el proceso de reciclaje del aluminio*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://ecoembesdudasreciclaje.es/como-es-el-proceso-de-reciclaje-del-aluminio/>

[36] FUNDICIONES FERRER (2019). *El cobre, un buen material que se recicla*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://www.fundicionesferrer.com/es/blog/el-cobre-un-buen-material-que-se-recicla/>

[37] CECCATO, D.M.; MASUERO, A.B.; MORAES, C.A.M.; VILELA, A.C.F. (2009). *Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762009000100008&script=sci_abstract&tIng=es

[38] STEINERT. *Valorizar y regenerar de forma rentable la escoria de fundición*. Última consulta 26/05/2021. Disponible en <https://steinertglobal.com/es/escorias-y-cenizas/escoria-de-fundicion/>

[39] SLEEPER, A.D. (2005). *Design for six sigma statistics*. Six Sigma Operational Methods.

