

**EFFECTO DE LA ALÚMINA (Al_2O_3) SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
DE LA ESCORIA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FERRONÍQUEL**

WILLIAM EDISON PATIÑO LÓPEZ



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

**EFFECTO DE LA ALÚMINA (Al_2O_3) SOBRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
DE LA ESCORIA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FERRONÍQUEL**

Trabajo de grado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO METALÚRGICO.

WILLIAM EDISON PATIÑO LÓPEZ.

**Director:
FABIO RAÚL PÉREZ VILLAMIL
MAGISTER EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

Nota de aceptación.

Firma del presidente del jurado.

Firma del jurado.

Firma del jurado.

Tunja, 14 de septiembre del 2018.

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería, reside en ella misma, por lo tanto, no responde de los conceptos expresados en este Proyecto de Grado.

Se autoriza la reproducción indicando el origen.

DEDICATORIA.

Al creador de vida, quien me ha brindado fortaleza y sabiduría para persistir cuando he estado a punto de renunciar; por ello, con toda la humildad que de mi corazón proviene, dedico esencialmente mi trabajo a Dios.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.

Con mucho cariño, para mis padres quienes han estado conmigo en todo momento, ofreciendo su apoyo, comprensión y amor, formando así lo que hoy soy como persona, mis valores y mis principios. Gracias por todo papá y mamá, por creer en mí y brindarme una carrera para mi futuro que de ahora en adelante ya depende de mis esfuerzos. De todo corazón, gracias.

A mi sobrina Sofía, quien es la luz y la alegría en nuestro hogar.

A mis hermanos, por estar siempre presentes apoyándome para alcanzar mis metas. Hermanos, los quiero mucho.

“La Educación es el pasaporte hacia el futuro, el mañana pertenece a aquellos que se preparan para él en el día de hoy.” Malcom X.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por amparar todo mi camino, por darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades brindándome una vida llena de aprendizajes y buenas experiencias.

Le doy gracias a mis padres, por los valores inculcados y el incondicional apoyo que de su parte he recibido. A mi madre Rosa López, porque gracias a sus buenos ejemplos y sabios consejos me ha enseñado a nunca rendirme y siempre perseverar por mis sueños. A mi padre Florentino Patiño, que con su paciencia y sabiduría hizo de mí una gran persona.

A mis hermanos Alexander y Steven, que gracias a sus consejos he afrontado y superado los retos que en mi vida se han presentado.

A mi director de tesis, el Ingeniero Fabio Raúl Pérez Villamil, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos y experiencia aportó al desarrollo y culminación de este proyecto. Muchas gracias Ingeniero.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a la escuela de ingeniería Metalúrgica, Y a los ingenieros quienes me compartieron sus conocimientos durante el transcurso de mi carrera, gracias.

A Carlos Eduardo Gamboa Gonzales, por su colaboración y ayuda brindada durante el desarrollo del proyecto. A mis amigos de formación, con quienes compartí esta bella etapa de mi vida. A todos, GRACIAS...

"La gratitud es la memoria del corazón". Lao Tse

CONTENIDO.

	Página.
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. MARCO TEÓRICO.	19
3.1 FERRONÍQUEL EN COLOMBIA.	19
3.2 FERRONÍQUEL	20
3.2.1 Producción.....	20
3.2.2 Extracción.	21
3.2.3 Preparación.....	22
3.3 CALCINACIÓN	23
3.3.1 Objetivos de la calcinación.....	23
3.3.2 Tipos de calcinación	24
3.3.3 Usos.....	25
3.3.4 Reacciones de calcinación	26
3.3.5 Entalpia de calcinación.....	26
3.3.6 Horno Rotatorio	27
3.4 FUSIÓN	28
3.4.1 Horno Eléctrico de Arco (HEA).....	29
3.4.2 Calentamiento por inducción.	41
3.4.3 Horno de inducción.	42
3.5 AFINO:	45

3.5.1	Horno Cuchara.....	45
3.6	ESCORIA:	47
3.6.1	Escoria de Horno Eléctrico de Arco:	47
3.6.2	Escoria de Alto Horno	49
3.6.3	Propiedades generales de las escorias	55
4.	METODOLOGÍA.	60
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.	61
5.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	61
5.2	ESCORIA.	61
5.3	ALÚMINA.	61
5.4	PREPARACIÓN MECÁNICA.....	62
5.4.1	Trituración.....	62
5.4.2	Cuarteo.....	62
5.5	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO.....	63
5.6	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.	66
5.6.1	Fluorescencia de Rayos X (FRX).....	66
5.6.2	Difracción de Rayos X (DRX).....	68
5.7	FUSIÓN:.....	70
5.7.1	Carburo de Silicio, SiC.....	70
5.7.2	Concrax 1700	72
5.7.3	Curva de calentamiento.	72
5.7.4	Horno de Inducción.....	75

5.8	DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	76
5.8.1	Crisol de carburo de silicio N°6.	74
5.8.2	Cables conductores.	75
5.8.3	Tapa refractaria.	76
5.8.4	Termocupla tipo R.	76
5.8.5	Pistola de temperatura.	77
5.8.6	Electrodos de grafito.	77
5.8.7	Fases del montaje para medir la conductividad eléctrica de la escoria fundida.....	79
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
6.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	84
6.1.1	Análisis granulométrico de la escoria de Ferroníquel.	84
6.1.2	Análisis granulométrico de la Alúmina pura.....	85
6.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	87
6.2.1	Análisis Difracción de Rayos X escoria de ferroníquel.....	87
6.2.2	Análisis Difracción de Rayos X muestra de alúmina	93
6.2.3	Análisis Fluorescencia de Rayos X, de la muestra de escoria de ferroníquel	96
6.2.4	Análisis Fluorescencia de Rayos X, de la muestra de alúmina.....	99
6.3	FUSIÓN	102
6.3.1	Curva de calentamiento Concrax 1700.....	102
6.3.2	Temperatura de Liquidus.	110
6.4	DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.	109

7. CONCLUSIONES	120
8. RECOMENDACIONES	122
9. BIBLIOGRAFÍA.	123
10.INFOGRAFIA.....	123
11.ANEXOS.....	124

LISTA DE FIGURAS.

	Página.
Figura 1. Complejo industrial Cerro Matoso S.A. Montelibano Córdoba.	20
Figura 2. Flujograma de producción del Ferroníquel.....	21
Figura 3. Frente de excavación del mineral laterítico de níquel Cerro Matoso S. .	22
Figura 4. Trituradora de doble rodillo.	23
Figura 5. Horno Rotatorio.....	28
Figura 6. Circuito básico del Horno Eléctrico de Corriente Alterna.	31
Figura 7. Esquema eléctrico básico y Circuito eléctrico simplificado del Horno Eléctrico de Arco Trifásico.	33
Figura 8. Circuito básico del Horno Eléctrico de Corriente Continua.	34
Figura 9. Esquema eléctrico del Horno de Arco de C.C convencional.....	35
Figura 10. Subestación transformadora de corriente eléctrica.....	36
Figura 11. Cable refrigerado con agua.....	37
Figura 12. Conjunto de brazos porta-electrodos y Mordaza	38
Figura 13. Cuba con paneles refrigerados con agua.	40
Figura 14. Plataforma y Estructura del HEA.	41
Figura 15. Conjunto, Bobina-Pieza.	43
Figura 16. Distribución general del Horno de Inducción.....	44
Figura 17. Distribución general del Horno Cuchara.	46
Figura 18. Escoria del proceso de obtención de Ferroníquel.....	52
Figura 19. Conductividad Eléctrica de óxidos comunes medida a su Temperatura de Liquidus.....	55

Figura 20. Celda para medir Conductividad Eléctrica.	56
Figura 21. Medición de la Resistencia Eléctrica en suelos.	58
Figura 22. Medidor de Resistividad de cuatro pines tipo Nilsson.	59
Figura 23. Escoria de Ferroníquel y Alúmina pura.	61
Figura 24. Cuarteo de la Escoria y Cuarteo de la Alúmina.	62
Figura 25. Tamices y Tamizador automático.	64
Figura 26. Peso retenido en cada tamiz para la muestra de Escoria y Alúmina respectivamente.....	64
Figura 27. Geometría de excitación en FRX.	67
Figura 28. Equipo de Fluorescencia de Rayos X.	68
Figura 29. Difractometro de Rayos X.	69
Figura 30. Crisoles de Carburo de Silicio y Refractario Concrax 1700.	71
Figura 31. Crisol de SiC recubierto con Concrax 1700.	73
Figura 32. Mufla multipropósito y su sistema de calentamiento.	74
Figura 33. Panel de control del Horno de Inducción de Alta Frecuencia y Bobina de trabajo.....	75
Figura 34. Crisol de SiC N°4.	76
Figura 35. Tapa refractaria y Cable niquelado.	77
Figura 36. Termocupla tipo R y Controlador de temperatura MaxThermo.	78
Figura 37. Electrodo de Grafito ARC-AIR y Pistola de temperatura DT-8869H...	79
Figura 38. Mezcla de Escoria de Ferroníquel Y Alúmina para fusión y Calentamiento del crisol SiC en la bobina de trabajo del Horno de Inducción.	80
Figura 39. Termocupla tipo R e Inmersión de Electrodo de Grafito.....	81
Figura 40. Calibración del equipo medidor de Resistencia tipo Nilsson.....	82

Figura 41. Medición de la Resistencia y Montaje de los Electrodo de Grafito.	82
Figura 42. Esquema general del proceso.	83
Figura 43. Estructura Cristalina del SiO ₂ y Estructura Amorfa del SiO ₂	88
Figura 44. Xenolito de Peridotita tipo Iherzolita con cristales de Olivino incluidos	90
Figura 45. Variedades azules y rosas del Corindón.	94
Figura 46. Inicio del Calentamiento y Fin del Calentamiento.	102

LISTA DE TABLAS.

	Página.
Tabla 1. Características de los tamices A.F.S. y de los tamices Fischer.....	63
Tabla 2. Clasificación de los tamices usados para la muestra de Alúmina.	63
Tabla 3. Clasificación de los tamices usados para la muestra de Escoria.	64
Tabla 4. Mezclas para fusión.....	70
Tabla 5. Datos obtenidos por el Análisis Granulométrico de la Escoria.	84
Tabla 6. Datos obtenidos por el Análisis Granulométrico de la Alúmina.	86
Tabla 7. Fases presentes en la Escoria DRX.....	87
Tabla 8. Fases presentes en la Escoria.	92
Tabla 9. Fases presentes en la Alúmina DRX.....	93
Tabla 10. Fases presentes en la Alúmina.	95
Tabla 11. Composición elemental de la Escoria FRX.....	96
Tabla 12. Composición química de la muestra de Escoria FRX.....	97
Tabla 13. Compuestos encontrados en la muestra de Escoria.	97
Tabla 14. Composición química promedio (%) de las Escorias generadas por las principales plantas productoras de Ferroníquel en el mundo.	98
Tabla 15. Composición elemental y química de la muestra de Alúmina FRX.	99
Tabla 16. Compuestos encontrados en la muestra de Alúmina.	100
Tabla 17. Composición química de la Escoria obtenida después de la fusión de cada mezcla con su respectivo porcentaje agregado en peso de Alúmina.....	101
Tabla 18. Datos registrados de la Temperatura de Liquidus en la fusión de cada mezcla de Escoria con su respectivo porcentaje de Alúmina en peso.....	104

Tabla 19. Comparación de los datos de Temperatura de Liquidus calculados experimentalmente frente a los datos medidos por el Software SlagAn3.	104
Tabla 20. Resistencias Eléctricas medidas en cada una de las mezclas con sus respectivos valores de Temperatura registrados.	110
Tabla 21. Análisis de los datos evaluados de Resistencia y Temperatura con respecto a la desviación estándar calculada para cada una de las mezclas de Escoria con su respectivo porcentaje en peso de Alúmina.	111
Tabla 22. Resultados de la prueba de Conductividad Eléctrica de cada mezcla medida a su Temperatura de Liquidus.	112

RESUMEN.

Las escorias en los procesos metalúrgicos cumplen papeles esenciales como: desulfurar, desfosforar y en el caso específico del proceso de obtención de ferroníquel por pirometalurgia el de servir como conductores eléctricos. En general según el propósito, la escoria juega un papel que depende de sus propias características como: la fluidez, la erosión o ataque químico del refractario que depende de las condiciones químicas de la escoria, la temperatura de fusión y la composición química, y de estas se derivan otras tales como: viscosidad, tensión superficial, capacidad calorífica, acidez y conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica en las escorias fundidas es una propiedad de vital importancia en procesos de fundición y refinación en hornos de arco eléctrico e inducción, donde por el tenor del metal aprovechable este se encuentra en bajas proporciones. Esta propiedad establece el consumo de corriente eléctrica y la energía necesaria para el calentamiento del metal por acción de la interface escoria-metal.

En este proyecto se evalúa el efecto de la alúmina sobre la conductividad eléctrica de la escoria del proceso de obtención de ferroníquel. Para ello se tomó una muestra de escoria proveniente del proceso de fusión de mineral laterítico de níquel para producción de ferroníquel y una muestra de alúmina pura, a estas muestras se les realizó una preparación mecánica y análisis granulométrico por tamizado, hasta obtener un tamaño de grano de trabajo en la escoria de 0.6mm (malla 30), y en la alúmina de 0.075mm (malla 200), las muestras fueron llevadas a ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX) y Difracción de rayos X (DRX) para determinar la concentración de elementos químicos e identificar especies mineralógicas.

Se realizaron 7 mezclas de 300 gramos de escoria y alúmina en concentraciones de 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, y 50% de alúmina en peso respectivamente. Cada mezcla fue llevada a fusión en un horno de inducción de alta frecuencia IMKW. Una vez se fundió el material a una temperatura que oscila entre los 1350°C y 1600°C se ingresaron 2 electrodos de grafito en conexión directa con el medidor de resistencia tipo Nilsson con el cual se tomó la resistencia de la escoria fundida, obteniendo valores ascendentes de resistencia conforme aumenta el porcentaje de alúmina en las mezclas; iniciando con una resistencia de 1,1Ω para 0% de alúmina y de 8,5Ω para el 50% de alúmina.

1. INTRODUCCIÓN.

Colombia es un productor importante de ferroníquel en América Latina, junto con Brasil, Cuba y República Dominicana. La producción de ferroníquel nacional se desarrolla en el departamento de Córdoba, en el municipio de Montelíbano, en el complejo industrial y minero de *CERRO MATOSO S.A.*, hoy propiedad de *SOUTH 32*, multinacional Anglo-australiana. Toda su producción se exporta a los mercados internacionales, siendo los países asiáticos su principal destino, seguido por la Unión Europea. *CERRO MATOSO S.A.*, es la única empresa en Colombia que produce ferroníquel, y es la cuarta mina de níquel a cielo abierto más grande del mundo y la primera en América.

El ferroníquel es una aleación de, níquel (aproximadamente 35%) y de hierro (aproximadamente 65%), esta mezcla metálica posee una alta resistencia a la corrosión y a temperaturas elevadas. Su uso más importante está asociado como ferroaleante para las industrias que fabrican acero inoxidable. El ferroníquel hace parte de las exportaciones tradicionales de Colombia, junto al petróleo, el café y el carbón.

En el procesamiento de mineral laterítico de níquel en Colombia, la fusión se realiza en un Horno Eléctrico de Arco, donde se funde calcina pre-reducida previamente en un Horno Rotatorio y la cual posee aproximadamente 2% de níquel, como productos de fusión se obtiene: metal y escoria en proporción de 1 a 15 respectivamente, motivo por el cual, la operación de este reactor depende de las propiedades de la escoria en especial su composición química y temperatura de fusión, variables de las cuales modifican la conductividad eléctrica de la misma. La escoria proveniente del proceso de obtención de ferroníquel contiene principalmente 4 especies, MgO - SiO_2 - Al_2O_3 y FeO .

La etapa de fusión del material calcinado representa la operación más importante del tratamiento pirometalúrgico. La calcina fundida en el Horno Eléctrico de Arco forma grandes cantidades de escoria, la conductividad eléctrica de esta constituye uno de los factores más importantes que afectan el modo de operación del horno; y la vez se transforma en el principal problema, puesto que controlar y mantener una conductividad eléctrica constante en la escoria es muy complicado.

Esta investigación busca establecer cómo la alúmina (Al_2O_3), incide sobre la propiedad conductora de una escoria del proceso de obtención de ferroníquel, abarcando principalmente el cambio que sufre la escoria con respecto a su conductividad eléctrica cuando se aumenta el contenido de alúmina dentro de la composición química de la misma.

2. JUSTIFICACIÓN.

En metalurgia se usa la escoria con diferentes propósitos, entre ellos: refinar metal, controlar conductividad térmica, proteger las paredes de los reactores de la radiación del arco eléctrico, filtrar el metal líquido separando las inclusiones, recoger ciertos elementos de aleación, conducir electricidad o temperatura, etc.

En general según el propósito metalúrgico la escoria juega un papel que depende de sus propias características como su temperatura de fusión y composición, y de las que de estas dos se derivan, otras tales como: viscosidad, tensión superficial y conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica de la escoria es un parámetro muy importante para tener en cuenta puesto que cumple un papel fundamental en la elaboración y funcionamiento del Horno Eléctrico de Arco. Debido a esto se hace necesario el desarrollo de esta investigación, con el fin de analizar, evaluar y determinar soluciones que ayuden a controlar esta variable, beneficiando así, empresas dedicadas a la obtención y manufactura de ferroníquel, alcanzando con ello un óptimo control y un mejor rendimiento del proceso de fusión en el Horno Eléctrico de Arco, disminuyendo costos de fabricación del producto y aumentando eficiencia en la producción.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1 FERRONÍQUEL EN COLOMBIA.

La explotación de ferroníquel en el país se remonta a los años 50, cuando dos firmas internacionales presentaron propuestas para buscar hierro y minerales en la región de Montelibano Córdoba. En 1963, después de varias negociaciones fue autorizada la búsqueda de níquel en la zona, así nació el primer contrato con 25 años de autorización para la explotación minera a cielo abierto.

Años después, durante el gobierno del presidente, Julio Cesar Turbay Ayala se suscribió el contrato de 1970 a través del cual se amplió el plazo de la concesión condicionando una serie de beneficios para los habitantes de Montelibano.

En los años 70 la, *RICHMOND PETROLEUM*, entregó el negocio a la *HANNA MINING CO.* y el, *IFI (INSTITUTO DEL FOMENTO INDUSTRIAL)*, y meses después nació *CERRO MATOSO S.A.* En 1982 ya estaba produciendo ferroníquel. Sin embargo, en 1989, *HANNA MINING CO.* se retiró de la mina y entró *BHP BILLITON*, que poco a poco fue comprando acciones al *IFI*, hasta quedarse en 2005 con el 99,9% del total de acciones en la empresa¹.

A nivel del mercado internacional, Colombia es el tercer productor de ferroníquel de América Latina, después de Cuba y República dominicana.

En el caso específico de *CERRO MATOSO S.A.*, toda su producción se exporta a los mercados internacionales siendo los países asiáticos su principal destino seguido por los países que conforman la Unión europea. La producción de ferroníquel en la empresa, *CERRO MATOSO S.A.*, empezó en 1982.

Actualmente la empresa aporta el 10% de la producción mundial de ferroníquel. Hoy *CERRO MATOSO S.A.*, produce utilidades del orden de los \$17 mil millones mensuales. Con el contrato suscrito en noviembre de 1996, la empresa obtuvo bases legales para extender su presencia en la mina hasta el año 2029.

¹ Cerro Matoso S.A. Control de operaciones RKEF. 2006.

Figura 1. Complejo industrial Cerro Matoso S.A. Montelibano Córdoba.



Fuente: www.las2orillas.co

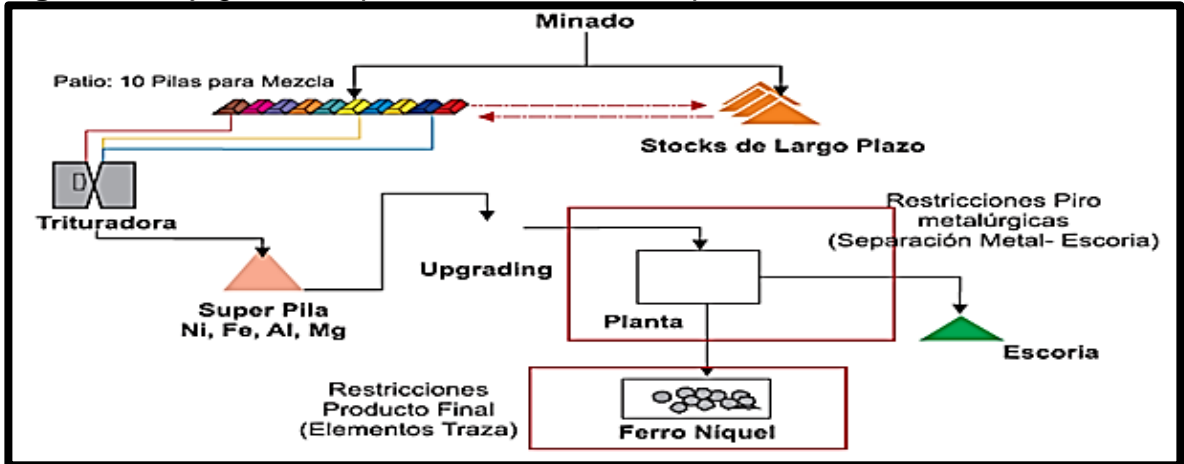
3.2 FERRONÍQUEL

El ferroníquel, es una aleación de níquel-hierro, de alta dureza y de color blanco brillante, posee alta resistencia a la corrosión y conserva una resistencia alta a temperaturas elevadas. Este metal ferromagnético es fácilmente transformado en una variedad de productos, su uso más importante es como ferroaleación para las industrias que fabrican acero inoxidable².

3.2.1 Producción: Los 3 principales países productores de níquel a nivel mundial son: Indonesia, con aproximadamente 400.000 toneladas producidas anualmente, seguido de Filipinas, con una cifra de alrededor de 230.000 toneladas anuales y Canadá con 210.000 toneladas año, Colombia ocupa el puesto número 11 con una producción aproximada de 49.000 toneladas anuales, y sus reservas están proyectadas por más de 15 años. El proceso de transformación del mineral laterítico de níquel a ferroníquel, está dado por el siguiente flujo de producción.

² Oleg Palyakov, Technology of Ferronickel – National Metallurgical Academy of Ukraine. Chapter 10.

Figura 2. Flujo de producción del Ferroníquel.



Fuente: Cerro Matoso S.A. Unidad de Negocio Mina, septiembre de 2007.

3.2.2 Extracción: Aunque se puede extraer mediante minería subterránea, en la mayor parte del mundo el mineral laterítico de níquel se extrae mediante minería a cielo abierto, donde para la extracción y remoción del mineral se pueden emplear explosivos o palas excavadoras. Una vez el mineral es extraído, se lleva a camiones de alrededor de las 50 a 95 toneladas de capacidad, los cuales trasladan el mineral desde la mina hasta la planta de procesamiento donde es descargado en el patio de trituración; en esta fase se disminuye la granulometría del mineral para poder homogeneizarlo y depositarlo en pilas o stocks donde es clasificado según la calidad del níquel la cual es medida con respecto al tenor del mineral³.

³ (s.f.). CERRO MATOSO S.A. Manual del proceso de producción de ferroníquel. Sección 3000.

Figura 3. Frente de excavación del mineral laterítico de níquel Cerro Matoso S.A.



Fuente: Autor.

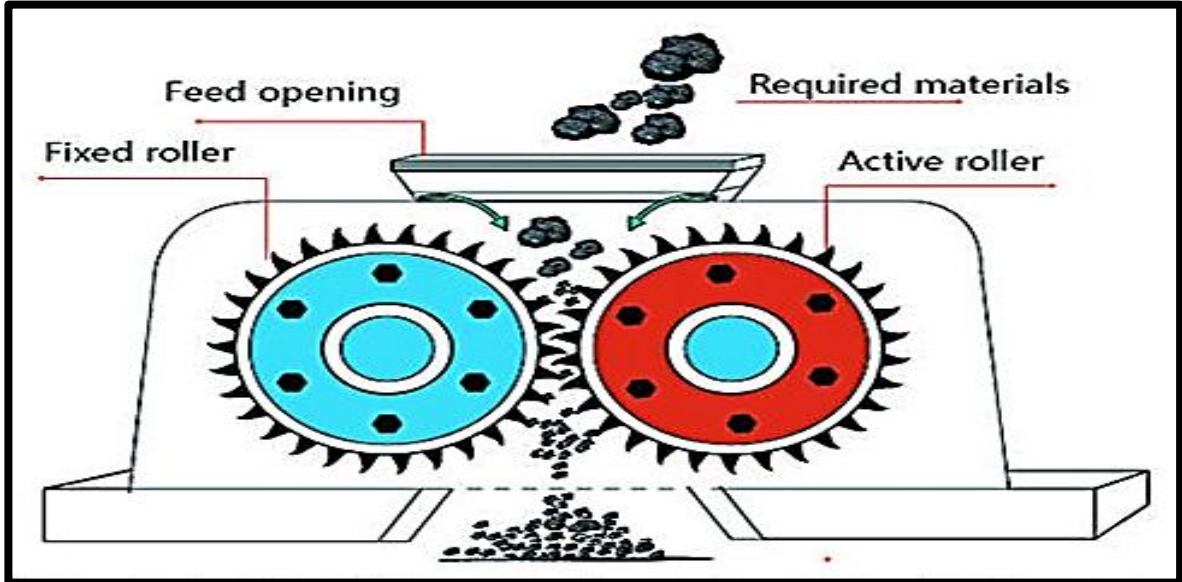
3.2.3 Preparación:

3.2.3.1 Primera etapa de trituración: El mineral es separado por una criba fija y los materiales de mayor tamaño caen a un triturador de mandíbulas donde se reduce el mineral con un tamaño de grano inicial promedio de 120 cm a 30 cm-20 cm, posteriormente el mineral es enviado por bandas transportadoras hacia la siguiente etapa de trituración.

3.2.3.2 Segunda etapa de trituración: El mineral llega por la banda transportadora hacia el triturador de doble rodillo el cual reduce el mineral a un tamaño promedio de 20 a 10 cm.

3.2.3.3 Tercera etapa de trituración: Finalmente el mineral pasa por un segundo triturador de doble rodillo el cual reduce todo el mineral a un tamaño máximo de 6 cm. El mineral triturado se almacena en dos pilas al aire libre, el propósito principal de las pilas es garantizar la homogenización para la alimentación de la planta de procesamiento. Debido a que el mineral se encuentra expuesto al medio ambiente, este posee un porcentaje de humedad promedio de 30 - 40 %, por tal motivo se requiere secar el mineral hasta obtener el menor porcentaje de humedad razón por el cual el mineral es llevado a un horno de secado.

Figura 4. Trituradora de doble rodillo.



Fuente: www.alibaba.com

3.3 CALCINACIÓN

La calcinación, es una reacción heterogénea y endotérmica con gasificación incompleta del sólido en reacción. El factor de control de la cinética de la reacción es la difusión del calor hacia el interior del grano requiriéndose un gradiente térmico pronunciado entre la superficie y el núcleo de la partícula, con lo cual la temperatura real de calcinación debe ser superior a la teórica y tanto mayor cuanto más grande sea el tamaño de los granos del mineral. El tiempo de reacción completa de la partícula es también función del tamaño de la partícula y varía según una función del cuadrado de su diámetro esférico equivalente, siendo por tanto más rápida la calcinación de partículas finas que la de partículas gruesas⁴. En sentido metalúrgico calcinar una sustancia mineral, es descomponerla térmicamente (pirólisis) sin que se produzca un cambio de su estado y sin que necesariamente se dé una reacción química con la atmósfera del reactor.

3.3.1 Objetivos de la calcinación:

⁴ CERRO MATOSO S.A. Calcinación. Disponible en CEDIT (D1- 07-027). 1-22 Pág.

- ✓ Reducir parcialmente el óxido de hierro presente facilitando la posterior fusión del mineral.
- ✓ Eliminar el agua física y química, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre entre otros. El CO₂, y el H₂O que se encuentran dentro de la composición del mineral dada su elevada capacidad calorífica y capacidad oxidante, enfrían la carga, queman el carbón y diluyen los gases de reacción aumentando el caudal a depurar.
- ✓ Expulsar compuestos orgánicos volátiles que no pueden ser separados con la trituration ni el lavado, este proceso es útil cuando los minerales deben ser transportados a grandes distancias pues disminuye los gastos de transporte.

3.3.2 Tipos de calcinación:

3.3.2.1 **Calcinación oxidante:** En ella se da la adición de oxígeno, este tipo es usado comúnmente para convertir menas sulfurosas a óxidos en la recuperación de metales como el zinc, el plomo y el cobre.

3.3.2.2 **Calcinación reductora:** El proceso se realiza en atmósfera reductora sin presencia de oxígeno, se puede presentar también una pre-reducción de algunos elementos químicos del mineral tal es el caso de los minerales de hierro.

3.3.2.3 **Calcinación cáustica:** Deriva de la causticidad o afinidad de los óxidos nacientes por el agua, se realiza a temperaturas próximas a las del equilibrio de descomposición, a presión ambiental, y con tiempos de residencia en el reactor ajustados a los necesarios.

En este proceso la estructura cristalina del material calcinado pasa a un estado amorfo, el tamaño de grano del mineral disminuye quedando finamente distribuido. La calcinación caustica se aplica fundamentalmente con fines metalúrgicos.

3.3.2.4 **Calcinación a muerte:** Se lleva a cabo con temperaturas y tiempos de residencia superiores a los realizados en la calcinación caustica, siendo el desarrollo de los cristales tanto mayor cuanto más alta haya sido la temperatura y el tiempo de exposición al calor, el tamaño de grano del mineral es relativamente grueso. La calcinación a muerte se aplica en la preparación de refractarios de magnesita y dolomía.

3.3.3 Usos: La calcinación se aplica para la preparación de fundentes destinados a operaciones de alto nivel térmico, por ejemplo: en la producción de óxido de calcio o magnesio para su reducción en horno eléctrico, en la descomposición del hidrato de alúmina a alúmina, y a los carbonatos de hierro como preparación previa a su sinterización. Otra forma de usar los procesos de calcinación es en fines complementarios a la metalurgia como⁵:

- ❖ Coquización de hullas.
- ❖ Grafitización de antracitas para electrodos.
- ❖ Destilación de sulfuros en especial de la pirita para recuperar el azufre lábil en forma de vapor.

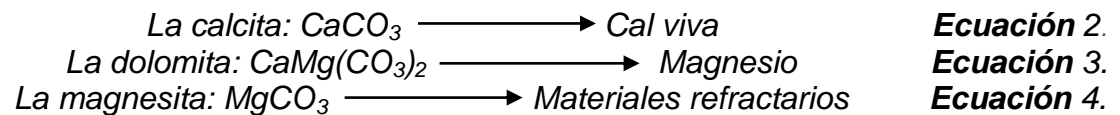
Este proceso de calcinación está representado por la siguiente reacción química:



Donde:

- M, es un metal divalente.
- MO, es óxido del metal divalente.
- CO₂, es dióxido de carbono.

Los componentes de los minerales del grupo de los carbonatos son de alta importancia para los procesos metalúrgicos, es por ello que se obtienen por medio de la calcinación. Entre los carbonatos que destacan tenemos:



⁵ Disponible en: <https://es.scribd.com/document/241725160/Calcinacion-pdf>

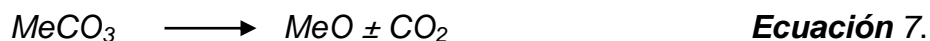
3.3.4 Reacciones de calcinación: Las reacciones de calcinación pueden incluir disociación térmica, incluyendo la destilación destructiva de los compuestos orgánicos (es decir, calentar un material rico en carbono en ausencia de aire u oxígeno, para producir sólidos, líquidos y gases). generalmente las reacciones se llevan a cabo en o por encima de la temperatura de descomposición térmica, en la cual un compuesto químico sufre una termólisis, es decir, se descompone en otros más simples sin llegar necesariamente a dividirse en los elementos químicos que lo constituyen. Por ejemplo, el carbonato de calcio se descompone en óxido de calcio y dióxido de carbono⁶.



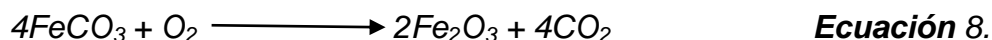
En otros compuestos se pueden llegar a separar sus átomos constitutivos, por ejemplo, el agua calentada a más de 2500°C rompe sus enlaces y se convierte en átomos de hidrógeno y oxígeno.



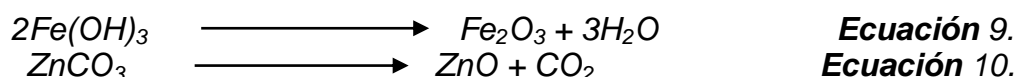
La calcinación de un carbonato puede expresarse por la siguiente reacción:



En un yacimiento común de hierro los carbonatos que suele contener se descomponen de la siguiente manera en presencia de oxígeno:



De este modo se obtiene el óxido del metal:



3.3.5 Entalpia de calcinación: La entalpía de calcinación a temperatura T, es la suma del calor de descomposición del carbonato en condiciones estándar de presión y temperatura inverso al de formación dado en las tablas termoquímicas y del calor sensible del sistema entre 298 y T (K), función de su calor específico medio: $(C_p)_S$ ⁷.

$$\Delta H = \Delta H^\circ + \int_{298}^T (C_p)_S dT \quad \text{Ecuación 11.}$$

⁶ Disponible en: <http://calcinacion.blogspot.com>

⁷ Disponible en: <http://www.qfa.uam.es/labqui/presentaciones/Tema5.pdf>

A su vez, la entalpía libre de la calcinación a la temperatura: T y presión: P de CO₂, vendrá dada por:

$$\Delta G(T) = \Delta G^\circ(T) + RT \ln p \quad \text{Ecuación 12.}$$

Para la temperatura T, y la presión: P_e, de equilibrio se tendrá:

$$\Delta G^\circ(T) + RT \ln p = 0 \quad \text{Ecuación 13.}$$

Por tanto, el potencial de calcinación de la atmósfera del reactor caracterizado por los parámetros: (T, P), se expresará según:

$$\Delta G(T) = RT \ln (p/p_e) \quad \text{Ecuación 14.}$$

En la calcinación a presión atmosférica la presión: P, es siempre inferior a 1 atm, y, por lo tanto, a partir de la temperatura: T, para la cual la presión P es igual o superior a 1 atm, se garantizará la descomposición del carbonato. Dicha temperatura mínima de calcinación se obtiene por la expresión:

$$\Delta G^\circ(T_c) = 0 \quad \text{Ecuación 15.}$$

3.3.6 Horno Rotatorio: Por lo general la calcinación se realiza en Hornos Rotatorios, los cuales se llevan a una temperatura de calcinación promedio de 850°C. El Horno Rotatorio es un reactor gas-sólido, donde los gases de combustión fluyen en contracorriente con respecto al lecho de mineral que se desplaza por el movimiento de rotación y la inclinación del horno. En estos hornos se distinguen tres zonas que son⁸:

3.3.6.1 Zona de precalentamiento: Con temperaturas entre 30° y 100°C, se elimina la humedad libre por evaporación. La carga sólida se precalienta a contracorriente con los gases calientes del horno⁹.

3.3.6.2 Zona de reacción: Tiene lugar la descomposición de los hidratos o carbonatos. Esta zona a la vez puede estar dividida en dos fases que son: La fase de pre-reducción en la cual ocurre la eliminación de humedad ligada y pérdida de volátiles entre los 100 y 600°C; y fase de reducción, donde la temperatura supera los 600°C, se completa la pérdida de humedad ligada y se da la reducción de los óxidos de hierro y níquel por la acción de los agentes reductores: carbón, monóxido de carbono e hidrógeno gaseoso, dependiendo de las condiciones de operación de la atmósfera y del perfil de temperatura dentro del horno .

⁸ (s.f.). CERRO MATOSO S.A. Manual de calcinación de ferroníquel Sección 3000.

⁹ (s.f.). FEECO, I. the rotary kiln handbook.

3.3.6.3 **Zona de enfriamiento:** Los productos de calcinación se enfrían con aire a contra corriente. El producto obtenido del Horno Rotatorio es un material reducido llamado calcina el cual puede contener trazas de impurezas tales como: azufre y carbono.

Figura 5. Horno Rotatorio.



Fuente: Autor.

3.4 FUSIÓN

La fusión es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia del sólido al líquido por la acción del calor. Cuando se calienta un sólido se transfiere calor a los átomos los cuales vibran con más rapidez a medida que ganan energía. Cuando una sustancia se encuentra a su temperatura de fusión el calor que se suministra es absorbido por la sustancia durante su transformación y no produce variación de su temperatura, este calor adicional se conoce como calor de fusión. El término fusión se aplica también al proceso de calentar una mezcla de sólidos para obtener una disolución líquida simple.

En metalurgia, la fusión consiste en llevar mineral o chatarra a la temperatura en la cual cambia de estado sólido a líquido, estado en el que se presenta la formación de dos fases, una de menor densidad llamada escoria por lo general compuesta de óxidos de Si, Mg, Al, y Fe, y otra fase más pesada llamada arrabio o hierro de primera fusión este se caracteriza por tener elevados porcentajes de carbono, silicio, manganeso, fósforo y el metal de interés.

En algunos casos, para ayudar a la fusión se emplean elementos auxiliares llamados fundentes, que al combinarse con la materia terrosa forma una escoria fluida ayudando así al proceso de separación de la escoria y del arrabio. La operación de fusión puede constituir una primera etapa para el proceso posterior de afino. Por lo general se usan como reactores de fusión el Horno Eléctrico de Arco, y el Horno de Inducción.

3.4.1 Horno Eléctrico de Arco (HEA):

3.4.1.1 **Origen:** El primer arco eléctrico fue producido por, Sir *Humphrey Davy*, en el año 1800. En 1878 *William Von Siemens*, fue quien por primera vez fundiera acero en un Horno de Arco Eléctrico con dos electrodos puestos en posición horizontal. El desarrollo de estos hornos fue lento debido a la carencia de energía eléctrica y el costo elevado de la misma. En 1899 se construyó el primer Horno de Arco Eléctrico directo para la producción de acero con una capacidad máxima de 3 toneladas. Los primeros hornos construidos fueron de una sola fase lo que producía un arco directo alcanzando temperaturas muy elevadas lo que ocasionaba el deterioro inmediato de la pared refractaria del horno. Posteriormente se desarrollaron hornos trifásicos en los cuales el arco eléctrico generado era más fácil de manipular direccionándose hacia el metal evitando con ello el contacto directo con el refractario¹⁰.

3.4.1.2 **Fundamentos del Horno Eléctrico de Arco:** Es un reactor que utiliza la energía eléctrica y la transforma en calor. La energía eléctrica procede de una red de corriente alterna en alta tensión y llega al horno a través de un circuito eléctrico que consta básicamente de¹¹:

- ❖ Una línea de entrada en alta tensión.
- ❖ Un transformador principal que reduce la tensión de entrada a la requerida en el horno.
- ❖ Un circuito eléctrico a continuación del secundario del transformado que termina en los electrodos.

Por otra parte, el circuito eléctrico completo comprende resistencias, reactancias y condensadores que determinan los parámetros de funcionamiento de la instalación. Dichos parámetros son, entre otros:

- ❖ La tensión e intensidad de la corriente.
- ❖ Las potencias activas a la entrada y en el arco.
- ❖ Los factores de potencia en diversos puntos.

¹⁰ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

¹¹ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

Finalmente, los parámetros anteriores se llevan a diagramas de funcionamiento que permiten determinar las condiciones óptimas de funcionamiento las cuales pueden ser entre otras:

- ❖ Máxima producción, que procederá de la mayor potencia en el arco.
- ❖ Máximo rendimiento, es decir, mínimas pérdidas energéticas respecto a la potencia consumida lo que determina normalmente un punto de funcionamiento a potencia en el arco algo inferior a la máxima.
- ❖ Mínimo coste de funcionamiento, lo que implica no sólo el coste de la energía sino otros (consumo de electrodos y de refractario, carga, mano de obra, etc.).

Este tipo de hornos se puede utilizar para diversos propósitos desde fundir metales no ferrosos como: cobre, bronce y aluminio pasando por ferroaleaciones y aceros especiales hasta metales de alto punto de fusión como el tungsteno. La flexibilidad que posee permite agregarle ciertas propiedades que mejoran su rendimiento tales como:

- ❖ Energía química, como es el caso de los quemadores.
- ❖ Inyección de gases, como oxígeno para aumentar temperatura y helio para agitar y homogenizar.

Los aceros fabricados en los HEA se caracterizan por las siguientes propiedades:

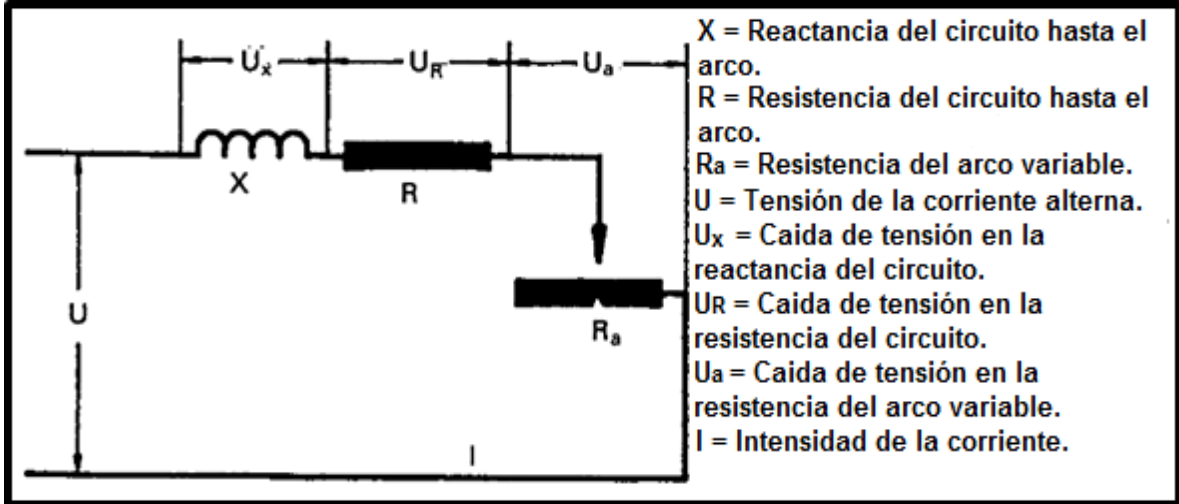
- ❖ Homogeneidad.
- ❖ Bajo contenido de inclusiones no metálicas.
- ❖ Menor porcentaje de gases.
- ❖ Alta pureza.
- ❖ Excelentes propiedades mecánicas.

3.4.1.3 Tipos:

➤ **Horno de Corriente Alterna:** Durante muchos años se ha operado con arcos cortos a baja tensión e intensidades elevadas tratando de sumergir el arco en la escoria y reducir así la erosión o desgaste de los refractarios¹². La introducción de paredes refrigeradas por agua, así como la técnica de la escoria espumosa, ha permitido utilizar altas potencias con arcos largos a tensiones altas e intensidades reducidas obteniendo menor consumo de electrodos, mayor factor de potencia y rendimiento eléctrico más alto.

¹² Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

Figura 6. Circuito básico del Horno Eléctrico de Corriente Alterna.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

La intensidad (I), la potencia (Pa) desarrollada en el arco y la potencia (P) consumida en el circuito serán respectivamente iguales a:

❖ Intensidad (I):

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + Ra)^2 + X^2}} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Donde (Z) corresponde a la impedancia eléctrica del circuito.

❖ Potencia del arco (Pa):

$$Pa = I^2 Ra = U^2 \frac{Ra}{(R + Ra)^2 + X^2} \quad \text{Ecuación 17.}$$

❖ Potencia (P):

$$P = I^2 (R + Ra) = U^2 \frac{R + Ra}{(R + Ra)^2 + X^2} \quad \text{Ecuación 18.}$$

✓ **Factor de potencia (FP):** Comúnmente, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo. El valor ideal del factor de potencia es 1, esto indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. El factor de potencia se define como el cociente de la relación de la potencia activa entre la potencia aparente; esto es:

$$FP = \frac{P}{S} \quad \text{Ecuación 19.}$$

Donde:

- P = Potencia efectiva o real, es la que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Unidades: W.
- $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ = Potencia aparente.

Siendo Q la potencia reactiva que es la encargada de generar el campo magnético que requieren para su funcionamiento los equipos inductivos como los motores y transformadores. Unidades: VAR. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad, significa un mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil.

✓ **Rendimiento eléctrico (η_e):** Se define el rendimiento eléctrico (η_e), como la relación entre la potencia desarrollada en el arco (P_a), y la potencia consumida.

$$\eta_e = \frac{P_a}{p} = \frac{Ra}{Ra+R} \quad \text{Ecuación 20.}$$

✓ **Expresiones para hornos de arco trifásicos.**

❖ Tensión (E):

$$E = U \sqrt{3} \quad \text{Ecuación 21.}$$

❖ Intensidad (I):

$$I = \frac{E}{\sqrt{3} \sqrt{(R+Ra)^2 + x^2}} \quad \text{Ecuación 22.}$$

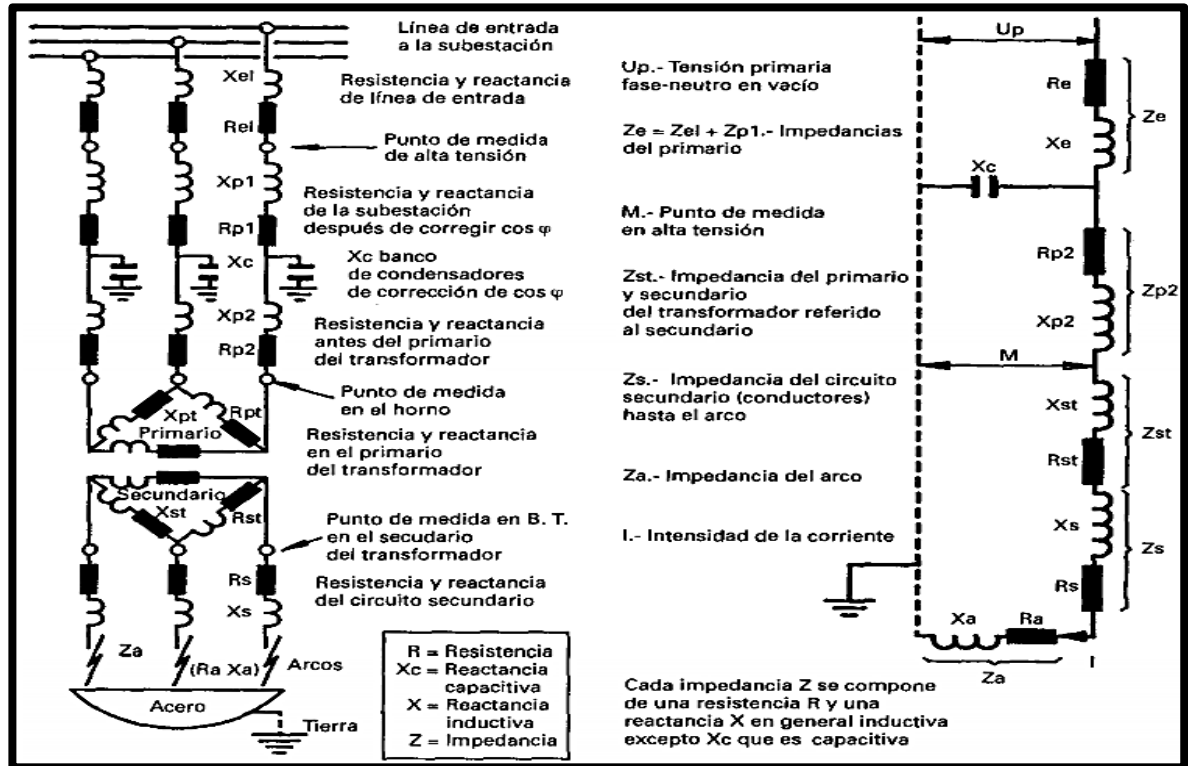
❖ Potencia del arco (P_a):

$$P_a = 3I^2 Ra = \frac{E^2 Ra}{(R+Ra)^2 + x^2} \quad \text{Ecuación 23.}$$

❖ Potencia (P):

$$P = 3I^2 (R + Ra) = \frac{E^2 (R + Ra)}{(R+Ra)^2 + x^2} \quad \text{Ecuación 24.}$$

Figura 7. Esquema eléctrico básico y Circuito eléctrico simplificado del Horno Eléctrico de Arco Trifásico.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

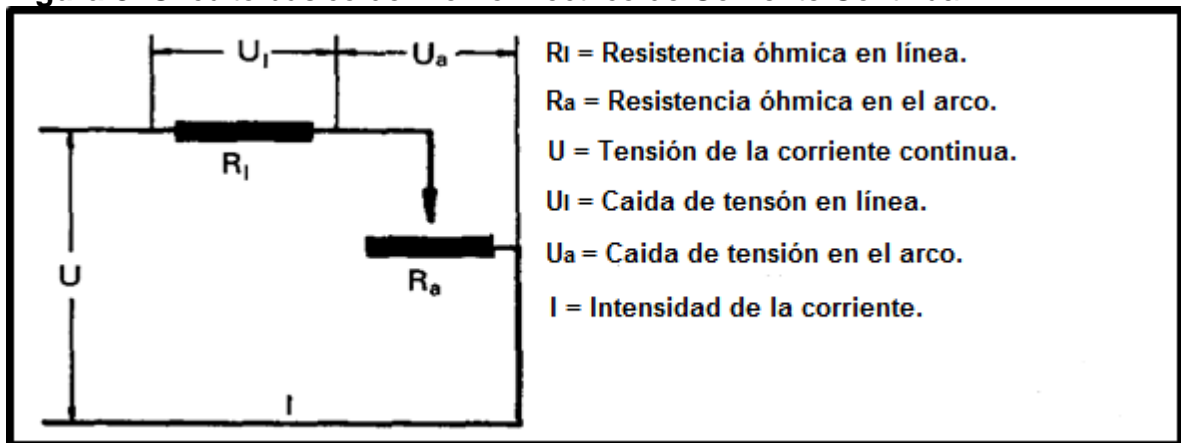
Donde:

- R_{e1} y X_{e1} : Resistencia y reactancia de entrada en alta tensión hasta el punto de medida.
- R_{p1} , X_{p1} : Resistencia y reactancia correspondientes a los cableados en la subestación del horno antes del banco de condensadores.
- X_c : Reactancia del banco de condensadores de corrección del factor de potencia.
- R_{p2} , X_{p2} : Resistencia y reactancia correspondientes a cableados desde el banco de condensadores hasta el transformador.
- R_{pt} , X_{pt} : Resistencia y reactancia correspondientes al primario del transformador.
- R_{st} , X_{st} : Resistencia y reactancia correspondientes al secundario del transformador.
- R_s , X_s : Resistencia y reactancia correspondientes al cableado desde el transformador hasta el arco entre electrodos y carga.
- Z_a : Impedancia propia del arco que depende fundamentalmente de la longitud e intensidad en el arco.

➤ **Horno de Corriente Continua:** En los últimos años se han instalado en todo el mundo un cierto número de Hornos de Arco de Corriente Continua de nueva fabricación y se han reformado también varios Hornos de Arco de Corriente Alterna para que operen en C.C por las ventajas que da el funcionamiento en C.C. Las principales diferencias entre estos dos tipos de hornos son¹³:

- En C.A. se disponen tres electrodos que entran por la tapa del horno cerrándose el circuito en la carga o baño de metal fundido. En C.C. se introduce un único electrodo (que hace de cátodo) por la tapa, el ánodo va en el fondo del horno unido eléctricamente al baño y se requieren cables eléctricos desde el ánodo hasta el rectificador.
- Al circular la corriente continua siempre en el mismo sentido se produce una cierta agitación del baño que resulta beneficiosa para homogenizar composición y temperatura y absorber la carga cuando se introduce continuamente.
- El electrodo único en C.C. está más separado de las paredes que los tres electrodos en C.A., por lo que la presencia de erosión del refractario es más reducida. En la presencia de erosión intervienen además de la distancia a las paredes otros factores como la longitud del arco y la tensión aplicada que son diferentes en C.A. y en C.C.

Figura 8. Circuito básico del Horno Eléctrico de Corriente Continua.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

Las ecuaciones que asocian los componentes del circuito corresponden a:

❖ Tensión (U):

$$U = U_l + U_a.$$

Ecuación 25.

¹³ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

❖ Intensidad (I):

$$I = \frac{U}{RI+Ra} = \frac{UI}{RI} = \frac{Ua}{Ra}$$

Ecuación 26.

❖ Potencia del arco (Pa):

$$Pa = \frac{Ua^2}{Ra} = \frac{U^2 Ra}{(RI+Ra)^2}$$

Ecuación 27.

❖ Potencia (P):

$$P = UI = \frac{U^2}{RI+Ra}$$

Ecuación 28..

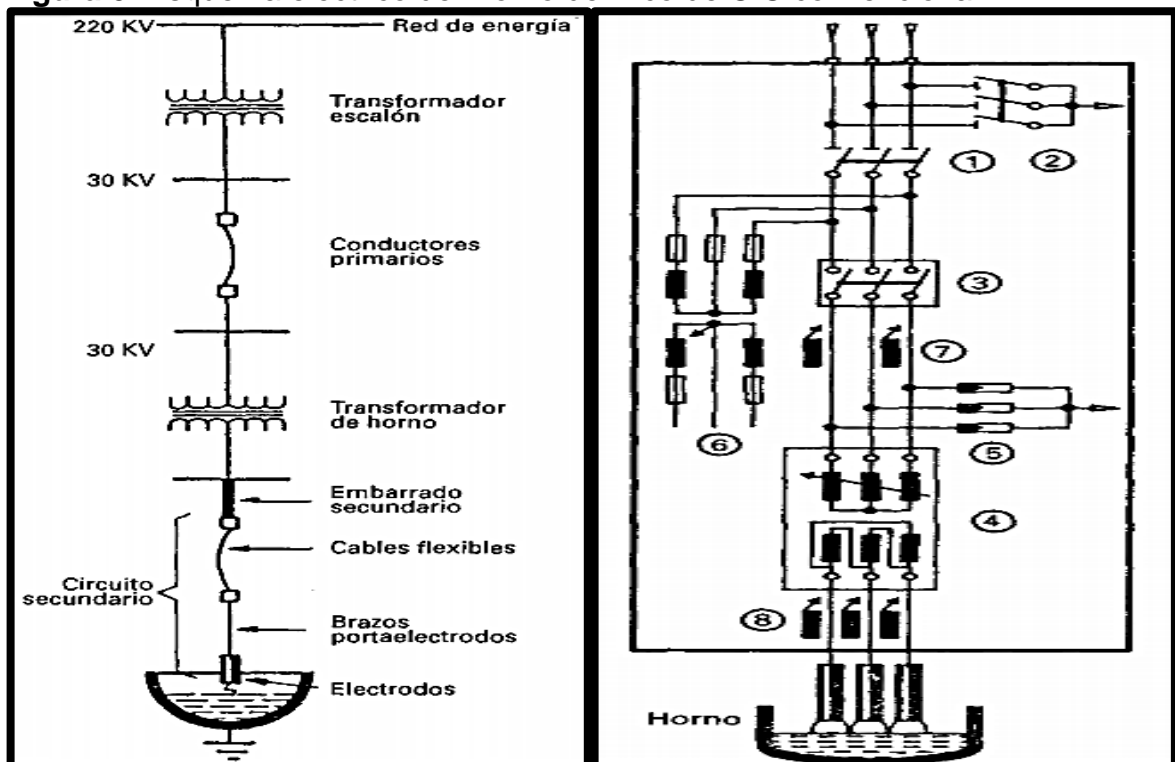
❖ Rendimiento eléctrico (η_e):

$$\eta_e = \frac{Pa}{p} = \frac{Ra}{RI+Ra}$$

Ecuación 29.

✓ **Equipo eléctrico:** En general, los hornos de arco se conectan a una línea eléctrica. Existen instalaciones conectadas directamente a una tensión, pero lo más frecuente es disponer de un transformador para pasar de la línea de alta tensión a la tensión de entrada a la subestación del horno.

Figura 9. Esquema eléctrico del Horno de Arco de C.C convencional.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

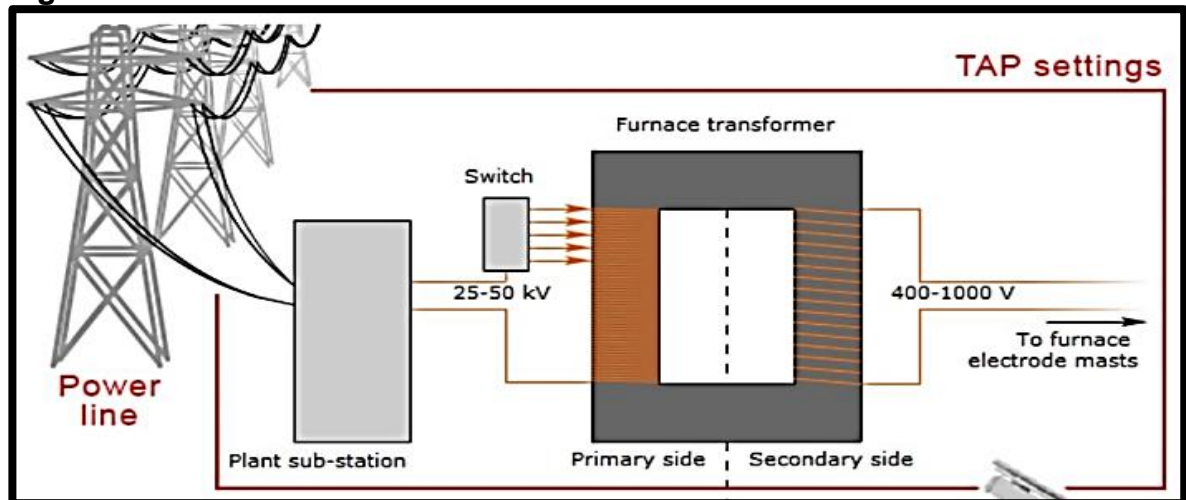
Donde:

- 1 = Seccionador para la instalación eléctrica del horno.
- 2 = Seccionador para la puesta a tierra de la línea de entrada.
- 3 = Interruptor general el cual permite un alto número de maniobras de desconexión del horno en marcha.
- 4 = Transformador del horno que reduce la tensión de entrada, a las tensiones requeridas para el funcionamiento del horno.
- 5 = Sistema de protección.
- 6 = Transformadores de medida de tensión.
- 7 = Transformadores de medida de intensidad.
- 8 = Transformadores reductores de medida de tensión e intensidad.

3.4.1.4 Partes del Horno Eléctrico de Arco (HEA):

➤ **Transformador:** El suministro de energía eléctrica de los primeros hornos se hizo con bajos voltajes y altos amperajes producidos por generadores movidos por motores a vapor. Posteriormente tras la complejidad de la operación se construyeron transformadores especiales con cambios de voltaje o taps. El transformador es el elemento fundamental del equipo eléctrico. Su construcción es muy robusta por estar sometido no solamente a altas tensiones e intensidades sino a grandes esfuerzos electrodinámicos en los devanados sobre todo en el secundario¹⁴.

Figura 10. Subestación transformadora de corriente eléctrica.



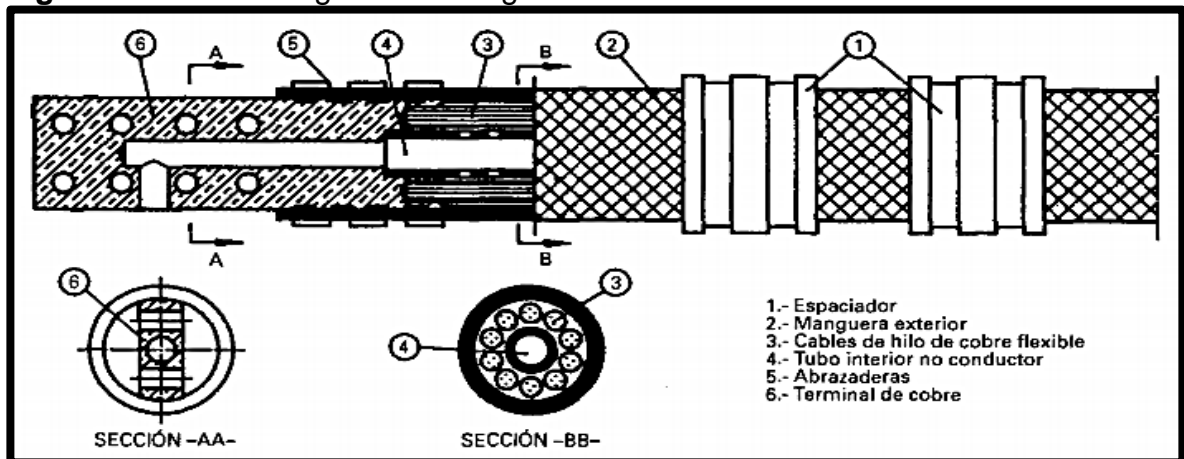
Fuente: Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

¹⁴ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

➤ **Conexión de cable flexible:** Anteriormente se construían los cables flexibles con refrigeración al aire, pero actualmente todos los hornos de arco modernos con potencias superiores a 10 MVA llevan cables refrigerados por agua, los cuales están formados por¹⁵:

- Un núcleo central para el paso del agua.
- Entre 6 a 8 cables flexibles de cobre separados entre sí y con un cierto arrollamiento en espiral sobre el núcleo central.
- Una funda exterior.
- Unos terminales de cobre que se atornillan a la barra conductora por un lado y a los extremos de los brazos porta electrodos por otro.

Figura 11. Cable refrigerado con agua.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

➤ **Brazos de electrodos:** El brazo porta electrodos comienzan por un lado en las mordazas de apriete de los electrodos, siguen en los tubos de cobre porta corriente soportados por la estructura de los brazos para terminar en la unión con los terminales de los cables refrigerados por agua¹⁶. Normalmente la estructura de los brazos es de acero y sección rectangular disponiéndose en el interior un circuito de refrigeración por agua. Sobre dicha estructura se montan los soportes de los tubos conductores de la corriente con los aislamientos adecuados para evitar que se induzcan corrientes por circuitos magnéticos cerrados.

¹⁵ Electric Furnace Steel Making. Iron and Steel Society.

¹⁶ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

Figura 12. Conjunto de brazos porta-electrodos y Mordaza



Fuente: Autor.

- **Mordazas:** Las primeras mordazas para Hornos Eléctricos de Arco, fueron hechas de cobre con cuñas que se apretaban a golpes para dar mayor presión y mejorar el contacto eléctrico. Hoy en día, son de cobre refrigeradas por agua a través de un serpentín interior y en uno de los lados se dispone una zapata de acero no magnético accionada por un mecanismo neumático para aflojamiento y unos muelles de apriete en posición de reposo. Esto permite, por una parte, conseguir un buen apriete entre la mordaza y el electrodo y por otra, el aflojamiento para deslizar el electrodo sobre la mordaza cuando es preciso alargar la columna de electrodos por desgaste¹⁷.
- **Electrodos:** Los primeros electrodos fueron fabricados con carbón amorfo en secciones poligonales, hoy en día se fabrican con grafito el cual mejora el rendimiento y duración de los electrodos. Los electrodos constituyen el último elemento conductor de la corriente antes del arco, sus características más importantes son¹⁸:

¹⁷ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

¹⁸ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

- Densidad, de acuerdo con el proceso de fabricación puede variar entre 1550 y 1750 kg/m³.
- Porosidad. De la misma forma varía entre 15 y 25 %.
- Resistencia a la compresión. Variable entre 15 y 35 N/mm².
- Resistencia a la flexión. Variable entre 6 y 25 N/mm².
- Resistividad eléctrica. Variable entre 4,5 y 12 μΩ.m.

El consumo de los electrodos es un factor importante que afecta directamente los costos del proceso, este consumo se debe a:

- Oxidación en la superficie.
- Desgaste por el arco en la punta.
- Roturas por fuerzas electromagnéticas.
- Fallos y grietas en los extremos roscados.
- Intensidad de la corriente eléctrica.
- Atmósfera oxidante en el interior del horno.
- Calidad y densidad de la chatarra de acero.
- Tiempo desde una colada hasta la siguiente.

➤ **Depuración de humos:** Las normas y reglamentos son cada vez más estrictos en cuanto a la cantidad de humos y polvo que pueden emitirse al medio ambiente, los cuales es preciso regular adecuadamente y depurarlos antes de que salgan por la chimenea. La recogida de humos puede realizarse en¹⁹:

- La cuba del horno a través del cuarto agujero en la tapa.
- La parte superior del horno durante la carga.
- La parte inferior desplazada del horno durante la colada por el orificio excéntrico en el fondo.

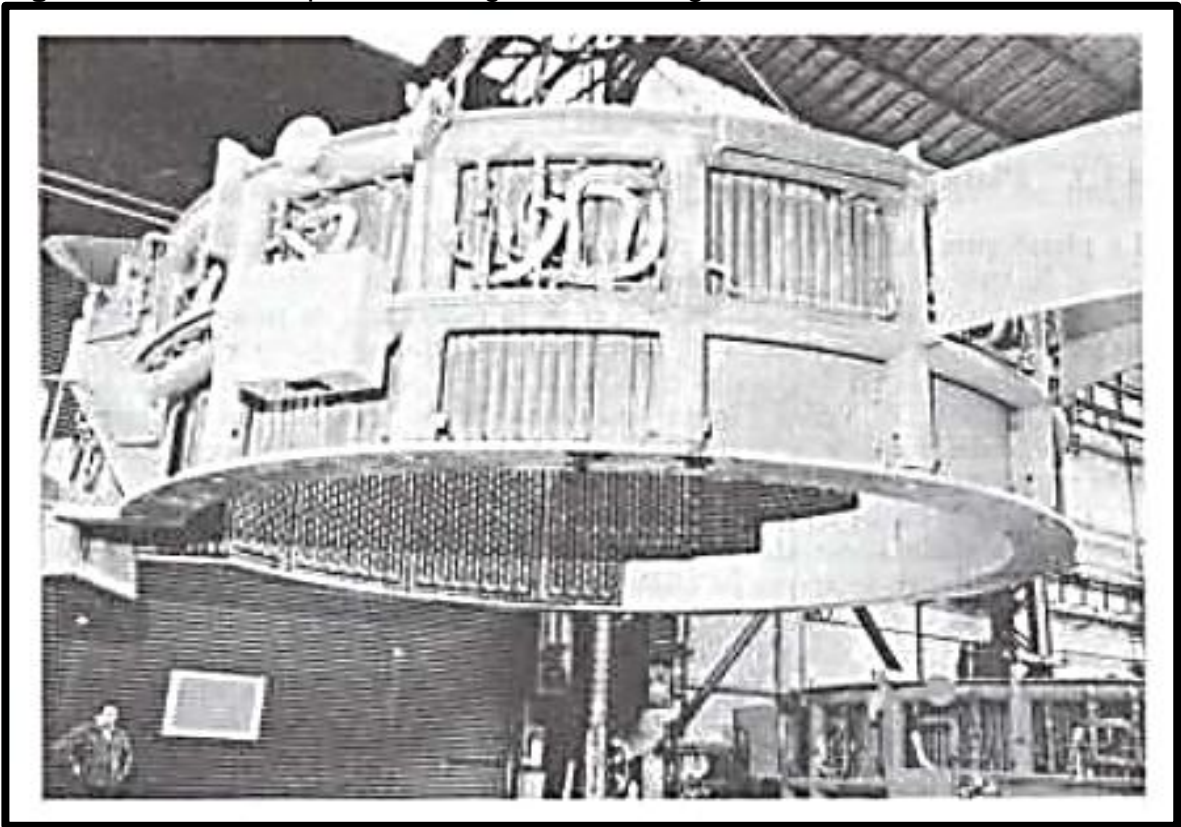
➤ **Cuba:** Generalmente es cilíndrica y recubierta de refractario su diámetro determina el peso de la colada. La puerta del horno, que permite operar el horno durante el proceso de fusión, está colocada en el lado correspondiente a la plataforma de operación del horno, la zona de colada del horno está colocada en sentido opuesto a la puerta del horno. La colada del horno se puede efectuar mediante el basculamiento con un sistema de piquera o un agujero colocado en la parte inferior del horno, la escoria sale por una puerta situada en el lado contrario a la piquera²⁰.

¹⁹ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

²⁰ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

➤ **Paneles refrigerados:** Los paneles son frecuentemente tubulares fuertemente refrigerados por agua que con una capa muy ligera de refractario permiten un funcionamiento de meses sin paradas para la reparación del revestimiento, estos se enclavan en el refractario especialmente detrás de los puntos calientes. Este sistema ha probado ser bueno si se usa agua “blanda”, desmineralizada a fin de prevenir depósitos internos en las tuberías. También la tapa del horno se refrigera por paneles tubulares de agua²¹.

Figura 13. Cuba con paneles refrigerados con agua.



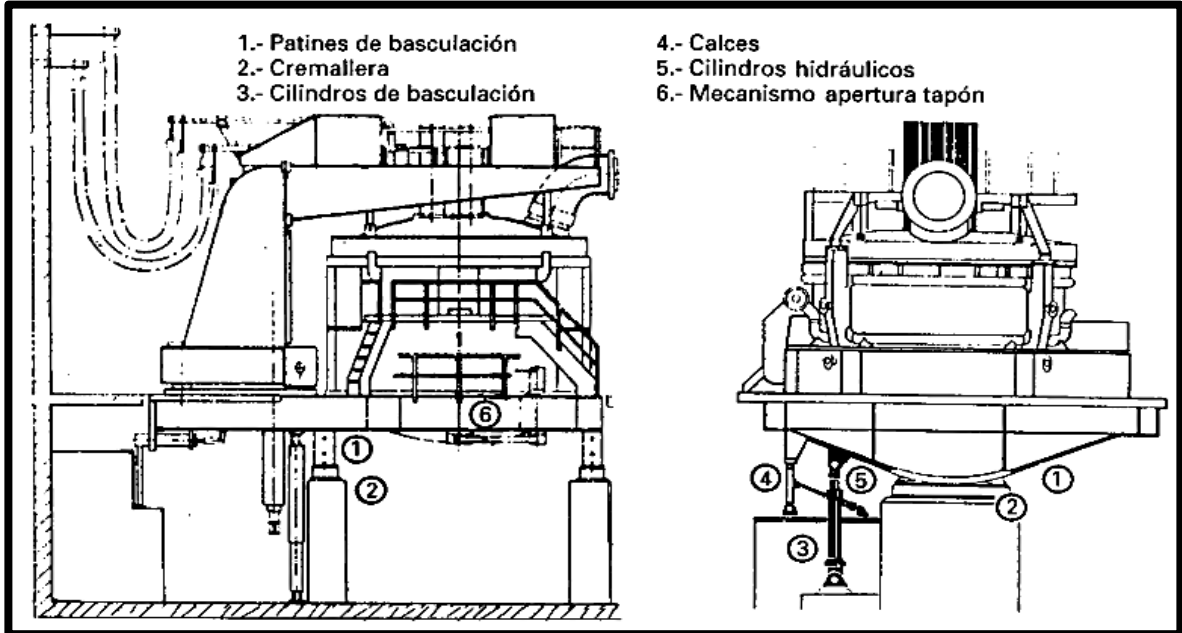
Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

➤ **Plataforma y estructura:** La plataforma del horno tiene por objeto soportar la cuba con la tapa y servir de base para la basculación del horno en las dos operaciones de colada y desescoriado. Lleva en su parte inferior unos patines de basculación que se apoyan por un lado en las cremalleras y por el otro, en los cilindros de basculación²².

²¹ Electric Furnace Steel Making. Iron and Steel Society.

²² Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

Figura 14. Plataforma y Estructura del HEA.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco

Durante la carga del horno con chatarra la cuba y la plataforma están sometidas a un gran esfuerzo mecánico por impacto; Por ello, la plataforma se apoya en cuatro puntos de gran rigidez: dos en la unión de los patines con las cremalleras y los otros dos en los calces o cuñas. Normalmente la basculación del conjunto de la parte mecánica del horno se realiza por medio de dos cilindros hidráulicos los cuales deben permitir la basculación en ambos sentidos. El objetivo fundamental de la estructura es, soportar los tres conjuntos de brazos portaelectrodos y albergar los mecanismos de accionamiento correspondientes que pueden ser, electromecánicos o por cilindros hidráulicos. En la parte superior de la estructura se disponen las vigas que sostienen la tapa rígidamente unidas por un lado y apoyadas en la cuba por el otro, estas se encuentran normalmente refrigeradas por agua en su parte inferior.

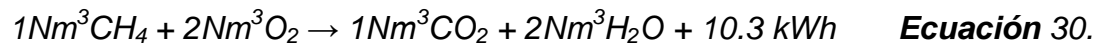
➤ **Refractarios:** La fabricación de acero en el Horno Eléctrico de Arco necesita diversos tipos de refractarios. La tapa o bóveda, se encuentra sometida a algunos problemas como, el polvo o humo de FeO, los cuales causan, erosión, cambios de atmosfera y temperatura, y deterioro por choque térmico. Por lo tanto, es necesario construirla en ladrillos con porcentajes de alúmina mayores al 70% (alta alúmina). En la cuba del horno donde el ladrillo debe resistir algunos problemas como: ataque de escorias y cambios de temperatura entre otras cosas, se emplean ladrillos refractarios básicos²³.

²³ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

Los más empleados son:

- Magnesita.
- Magnesita – Cromo.
- Magnesita – Grafito.
- Piezas electro-fundidas.
- Masa apisonables.
- Masas proyectables.

➤ **Quemadores:** El empleo de quemadores tiene como objetivo, aumentar temperatura y provocar la fusión de la chatarra que queda retenida en las zonas frías. Estos se colocan en las paredes laterales, aunque pueden ir en la tapa o en la puerta. La reacción de combustión considerando el gas natural como CH₄ es la siguiente²⁴:



➤ **Lanza de oxígeno:** Se ha venido empleando en la fase final de la fusión para descarburar el acero, producir escoria espumosa, generar energía, quemar el carbón fino y oxidar la chatarra²⁵.

3.4.2 Calentamiento por inducción: Con este se consiguen calentamientos rápidos en el aire, en vacío o en atmosferas controladas. La fuerza electromagnética es producida a cierta frecuencia utilizando una bobina conductora por lo general echa en cobre y refrigerada con agua. La fuerza electromagnética de densidad elevada adaptada al metal a calentarse induce en este un paso de corriente que lo calienta directamente²⁶.

En la bobina de calentamiento el material se coloca en un campo electromagnético alterno. La creación del campo necesario depende del tamaño, la forma y composición química de la pieza o material a fundir. La bobina que rodea a la pieza se conoce como bobina de trabajo, su función es similar a la del embobinado primario de un transformador convencional, la pieza o el material a fundir actúa como circuito secundario. Cuando la bobina primaria o de trabajo recibe la energía, esta induce una corriente en el secundario o pieza la cual se encarga de calentar y fundir el material. La magnitud de la corriente inducida depende de la amplitud y frecuencia de la corriente alterna que circula por la bobina de trabajo, las líneas de flujo magnético generadas en la carga por la bobina conductora de corriente son paralelas a su eje. La distribución del flujo depende de los siguientes factores:

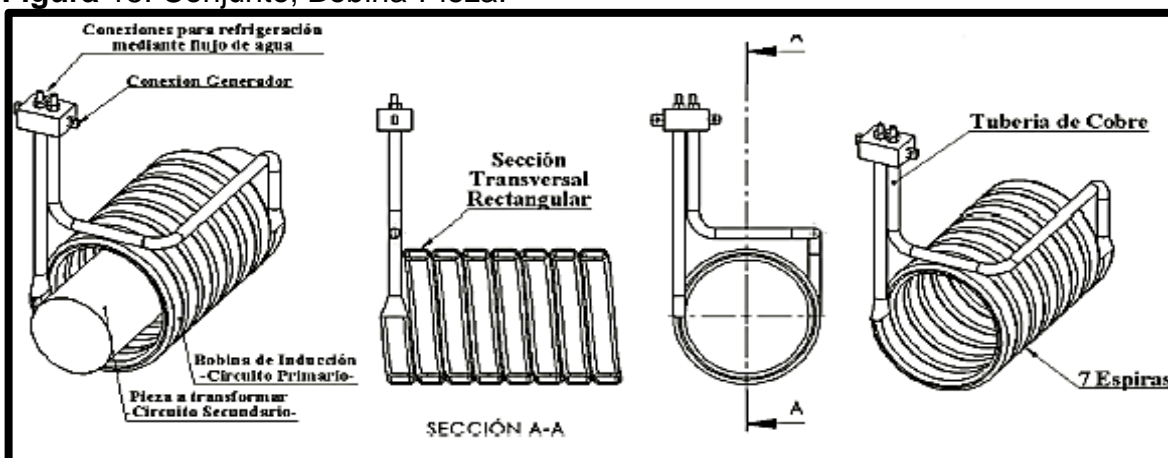
²⁴ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

²⁵ Electric Furnace Steel Making. Iron and Steel Society

²⁶ Disponible en: https://www.ecured.cu/Horno_de_induccion

- Las propiedades magnéticas y eléctricas del material.
- Las dimensiones de la sección transversal de la pieza.
- La frecuencia de la corriente alterna aplicada.

Figura 15. Conjunto, Bobina-Pieza.



Fuente: uct vol.17 no.66 Puerto Ordaz mar. 2013

3.4.3 Horno de Inducción:

3.4.3.1 **Origen:** El primer Horno de Inducción operó en 1887 y fue construido por *FERRANTI INTERNATIONAL PLC*, la cual fue una empresa de ingeniería y equipos eléctricos del Reino Unido que funcionó durante más de un siglo desde 1885 hasta que se declaró en quiebra en 1993. Este horno poseía un crisol toroidal que cumplía la función de secundario de un transformador con núcleo de hierro, bajo el crisol se encontraba enrollado el primario que consistía de una bobina de alambre de cobre²⁷.

3.4.3.2 Tipos:

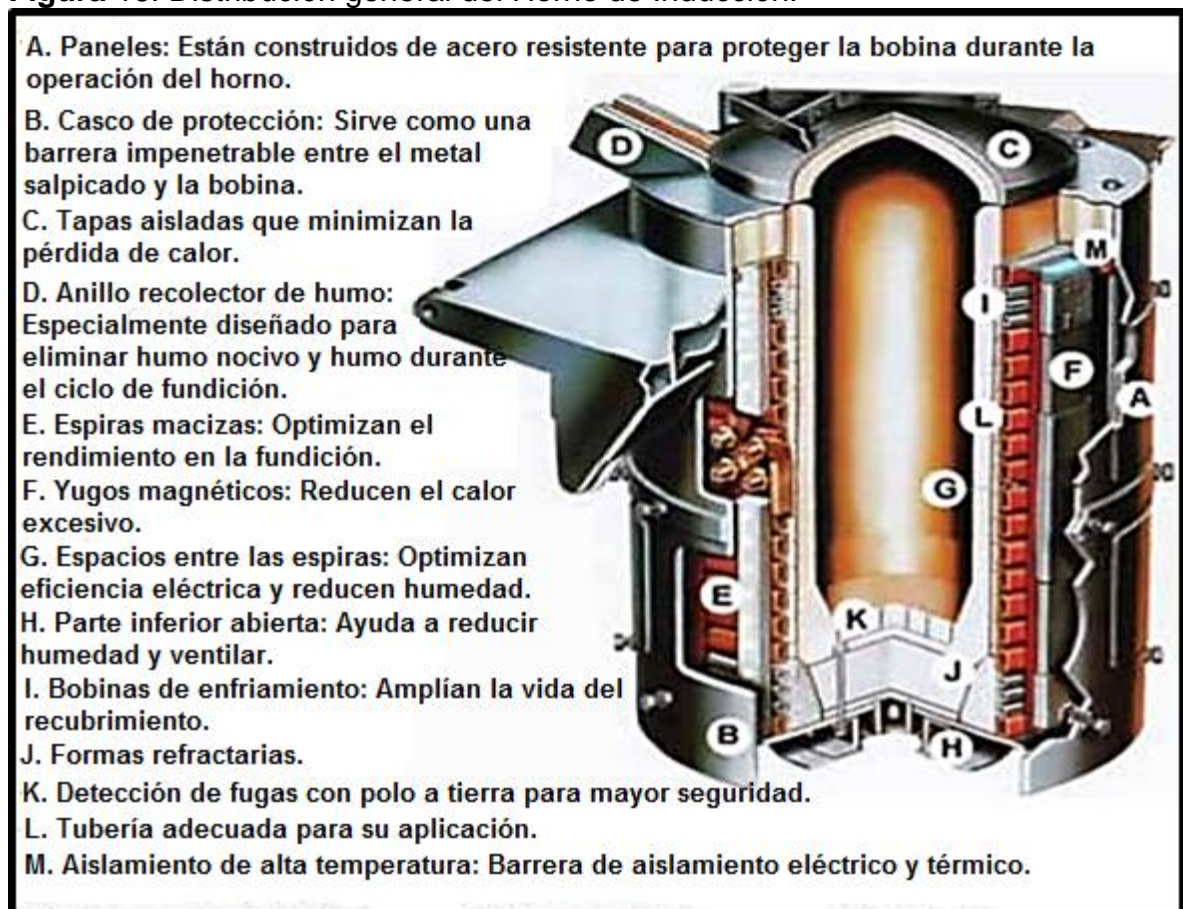
➤ **Horno de Inducción con núcleo (Baja frecuencia):** Este tipo de horno contiene una bobina primaria que rodea a un núcleo laminado, el secundario está constituido por el metal fundido que se encuentra dentro de un canal que rodea a la bobina primaria. En los Hornos de Inducción de baja frecuencia aproximadamente 60 Hz, el calor se produce por el efecto Joule de la corriente inducida por corriente alterna a través del metal a fundir. Por lo general estos hornos se usan para fundir bronce, aluminio, zinc y en algunos casos hierro.

²⁷ Disponible en: <https://es.slideshare.net/00Josef00/hornos-de-induccin>.

➤ **Horno de Inducción sin núcleo (Alta frecuencia):** En este tipo de hornos el primario es la bobina del horno, el secundario es el metal líquido o carga y el núcleo de este sistema transformador es el aire. Al aplicar una corriente de alta frecuencia al primario, esta induce una corriente en el secundario que calienta rápidamente el baño metálico y funde el material sólido en la carga, por lo general chatarra ferrosa y no ferrosa.

Este horno consta de un crisol introducido dentro de una bobina de cobre enfriada por agua, a través de la cual pasa la corriente que genera el campo magnético lo que calienta el crisol y funde el metal en su interior. En los hornos de Inducción de alta frecuencia, el calor lo producen las corrientes de Foucault llamadas también corrientes de Eddy usualmente consideradas como parásitas. Por lo general en estos hornos se fabrican aceros especiales, aceros inoxidable y aceros para herramientas.

Figura 16. Distribución general del Horno de Inducción.



Fuente: <https://es.slideshare.net>.

3.4.3.3 Ventajas generales del Horno de Inducción:

- No requiere coque ni electrodos.
- Se puede producir un amplio abanico de materiales.
- Control fácil y rápido de la temperatura del metal líquido.
- Ajuste fácil de la composición química.
- Velocidad de fusión variable con facilidad.
- Buena performance ambiental, sin necesidad de alta inversión en equipamiento.

3.5 AFINO:

Hace años atrás se producía el acero de acuerdo a los procesos tradicionales: Convertidor, Horno Eléctrico, Horno Siemens-Martin, etc. La cuchara servía únicamente como recipiente para el transporte del acero líquido, entre el horno y las lingoteras²⁸.

3.5.1 Horno Cuchara: Las elevadas exigencias de la pureza del acero, el desarrollo de sistemas muy exactos de análisis químicos, y la necesidad de disminuir los costos de producción, llevaron a la creación de la Metalúrgica Secundaria. En los procesos de Metalurgia Secundaria dentro de la cuchara metalúrgica y convertidores con atmosfera controlada se realizan las operaciones de²⁹:

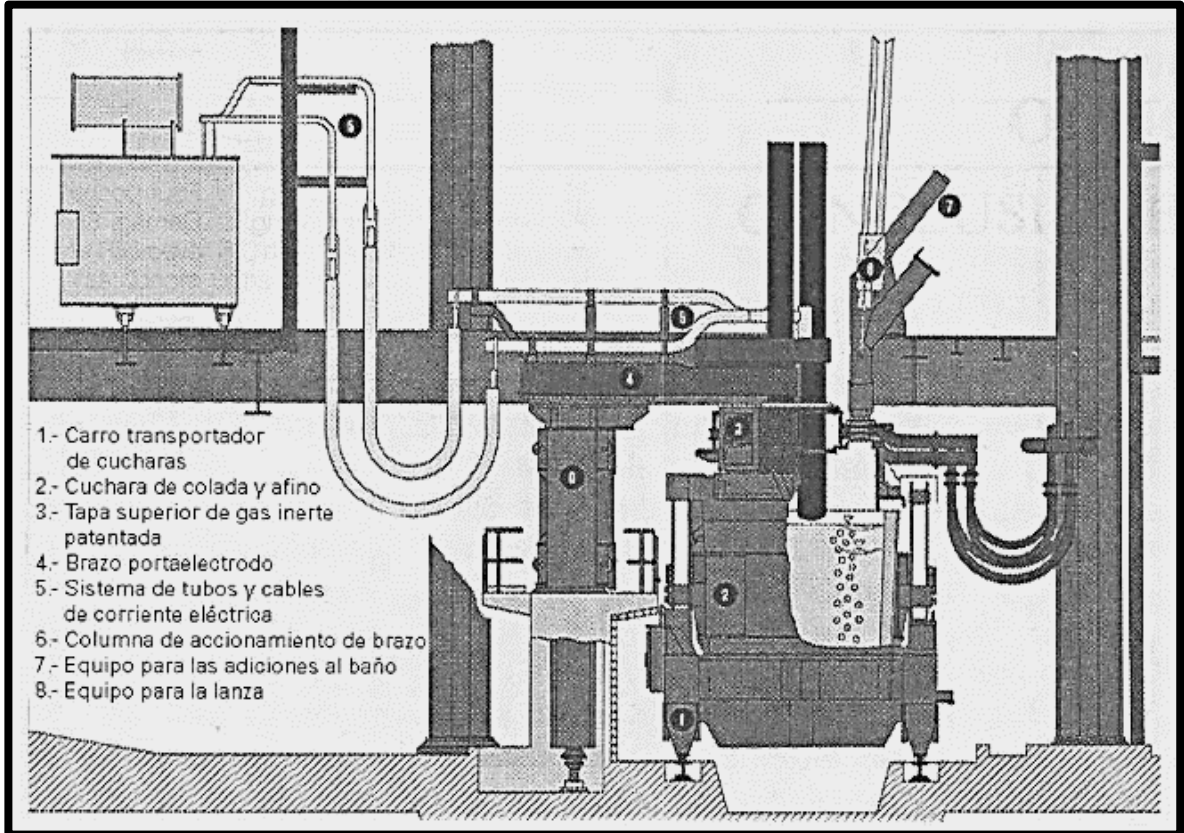
- Desoxidación
- Desgasificación.
- Desulfuración.
- Ferroaleaciones.

A pesar del desarrollo de nuevos hornos eléctricos como el Horno Eléctrico de Ultra Alta Potencia (UHP), el proceso en cuchara ha mostrado grandes ventajas económicas, ya que los hornos eléctricos únicamente funden el metal, el afino posterior se realiza en el Horno Cuchara.

²⁸ Acería Eléctrica. Badano A. Oscar. Tomo I.

²⁹ Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

Figura 17. Distribución general del Horno Cuchara.



Fuente: Hornos. Lección 3. Hornos de Arco.

3.5.1.1 **Ventajas del Horno Cuchara:**

- Aumento de producción al separar la fusión y el afino en dos equipos.
- Mayor rendimiento o mejor utilización de las ferroaleaciones.
- Mejor regularidad de los procesos al operar con la escoria adecuada.
- Mejor ajuste de la composición final con cierta independencia del acero en la cuchara.

Es muy importante que el acero en la cuchara llegue al equipo de afino prácticamente sin escoria lo que se realiza mucho mejor en hornos de arco provistos de colada excéntrica por el fondo que en hornos de piquera. Tiene también importancia la forma del conducto de colada siendo más favorable la vertical, que la colada por el fondo.

3.5.1.2 **Objetivos del Horno Cuchara:**

- Reducir el contenido de hidrogeno en el acero gracias al incremento de la reacción entre el baño metálico y la fase gaseosa.

- Producir aceros con bajos contenidos de carbono y mejorar el grado de desoxidación del acero por medio de la reacción del monóxido de carbono con el oxígeno a bajas presiones.
- Obtener pequeñas cantidades de azufre en el baño por medio del soplado con carbonato de calcio, cal, etc.
- Ajustar composición química requerida mediante la adición de aleante.
- Suministrar calor adicional al baño para compensar las pérdidas debidas a los tratamientos efectuados por medio de arcos eléctricos o bobinas de inducción.
- Mantener una distribución regular de la temperatura en todo el baño por intermedio de una agitación continua.
- Incrementar la potencia y el rendimiento de los dispositivos de fusión empleados solo para la etapa de fusión y no en la etapa de afino.

3.6 ESCORIA:

La escoria es una mezcla fundida formada por óxidos y silicatos en suspensión o solución, estas se forman durante la fusión de menas o durante la refinación de metales brutos y generalmente contienen elementos que no se reducen durante el proceso de reducción o elementos que se oxidan durante el proceso de refinación³⁰.

3.6.1 Escoria de Horno Eléctrico de Arco: El proceso de fabricación de acero, en horno eléctrico, se divide en dos fases:

- Metalurgia primaria o fusión: Se produce la fusión de las materias primas o chatarra, en el HEA.
- Metalurgia secundaria o afino: Se realiza el ajuste composicional del acero, en el Horno Cuchara.

3.6.1.1 Tipos de escoria del HEA:

➤ **Escorias negras:** Estas se forman durante la etapa de fusión en la que incluye una serie de fases como; la oxidación, destinada a eliminar impurezas de manganeso y silicio, la desfosforación y la formación de escoria espumosa en la que se acumulan todas las impurezas³¹.

✓ **Composición química:** Depende del tipo de materia prima, de las variables de control de operación, entre otras. Por lo general su composición química dada en porcentaje es:

³⁰ MORENO, HÉCTOR (2004). Método de muestreo para la caracterización de escorias de refino y separación de FeNi. Tesis.

³¹ Electric Arc Furnace Slag - technical sheet, December 2011

- CaO: Entre 22 - 60%.
- SiO₂: Entre 11 - 30%.
- FeO: Entre 0,5 - 4%.
- Fe₂O₃: Entre 34 - 36%.
- MgO: Entre 4 - 12%.
- Cr₂O₃: Entre 1 - 8%.
- TiO₂: Entre 0,6 - 2%.
- MnO₂: Entre 1 - 4%.
- Al₂O₃: Entre 2 - 8%.
- P₂O₅: Entre 0 - 0,02%.

Una vez evacuada la escoria del horno, el enfriamiento de esta se puede hacer de diferentes formas obteniendo así diferentes características como:

✓ *Escoria amorfa*: Se genera mediante el enfriamiento rápido con agua, por lo general su aspecto es poroso y de tamaño de grano pequeño.

✓ *Escoria amorfo-cristalina*: La escoria es vertida en grandes fosos su velocidad de enfriamiento es media, esta presenta una apariencia menos porosa que la anterior.

✓ *Escoria cristalina*: Se introduce dentro de un cono de fundición, donde el enfriamiento es muy lento, la escoria obtenida es dura, muy compacta y con pocos poros.

✓ **Aplicaciones:**

- En cementeras como, adición de hierro dado al contenido de, FeO y Fe₂O₃.

➤ **Escorias blancas**: Se forman durante la etapa de afino la cual incluye, la desoxidación, que permite eliminar los óxidos presentes en el baño metálico, la desulfuración, y la descarburación del acero. La escoria blanca permite la reducción de óxidos metálicos presentes en el baño durante la etapa de oxidación, simultáneamente se realiza la fase de desulfuración la cual se produce por la reacción de cal existente en la escoria³².

✓ **Composición química**: Las escorias blancas procedentes de la fase de afino se caracterizan por su contenido de metales pesados como: cromo, zinc, y plomo y por el reducido tamaño de sus partículas. Por lo general su composición química dada en porcentaje, es:

³² Electric Arc Furnace Slag - technical sheet, December 2011

- SiO₂: Entre 17,4 - 19,3%.
- Fe₂O₃: Entre 1,1 - 3,6%.
- FeO: Entre 0 - 0,95%.
- Al₂O₃: Entre 3,2 - 10,4%.
- CaO: Entre 45,3 - 62,1%.
- MgO: Entre 4,5 - 17,2%.
- MnO: Entre 0 - 1,2%.
- S: Entre 1,45 - 1,65%.
- C: Entre 0 - 0,03%.

3.6.2 Escoria de Alto Horno: Dentro de una fábrica de siderurgia integral, el Alto Horno es el reactor utilizado para la fusión del mineral; de éste se obtienen dos productos: arrabio y escoria, los cuales son separados por diferencia de densidades³³.

3.6.2.1 Composición química: Esta depende de los minerales, del coque utilizado como combustible y de los óxidos procedentes de los fundentes utilizados. Por lo general su composición química dada en porcentaje, es:

- SiO₂: Entre 27 – 40%.
- Al₂O₃: Entre 5 – 33%.
- CaO: Entre 30 – 50 %.
- MgO: Entre 1 – 21%.
- Fe₂O₃: Entre 0 – 1 %.
- Cr₂O₃: Entre 0,003 – 0,007%.
- TiO₂: Entre 0 – 3%.
- MnO: Entre 0 – 2%
- P₂O₅: Entre 0,02 – 0,09%.
- Cl: Entre 0,19 – 0,26%.
- S: Entre 0 – 3%.
- F: Entre 0,09 – 0,23%.

3.6.2.2 Tipos de escoria del Alto Horno: Una vez evacuada la escoria del horno, el enfriamiento de esta se puede hacer de diferentes formas obteniendo así diferentes características como³⁴:

➤ **Escoria cristalizada:** Se obtiene por el enfriamiento lento y controlado de la escoria.

³³ Blast Furnace Slag - technical sheet, December 2011

³⁴ Blast Furnace Slag - technical sheet, December 2011

✓ **Propiedades físicas:** La escoria cristalizada, posee características muy similares a las rocas ígneas volcánicas entre las que se pueden destacar:

✓ *Textura:* Rugosa. Esto le proporciona un alto rozamiento interno y una elevada capacidad de soporte.

✓ *Color:* Gris oscuro.

✓ *Forma:* En su mayoría cubica.

✓ *Densidad aparente:* 2,36 Kg/dm³.

✓ *Porosidad:* 20,6%. Esta favorece el rápido secado de la escoria y mejora su reactividad química.

✓ **Propiedades químicas:**

✓ *Capacidad de autofraguado:* Esta propiedad la adquiere gracias a la pequeña cantidad de escoria que no cristaliza y queda en estado amorfo.

✓ *Inestabilidad volumétrica:* Debido al silicato de calcio y al óxido de hierro.

✓ **Propiedades mecánicas:** Esta escoria es adecuada para la estabilización de suelos húmedos y blandos usados en la construcción de carreteras.

✓ *Resistencia mecánica:* Varía directamente en función de la porosidad.

✓ *Angulo de rozamiento interno:* 40 – 45°.

✓ *Dureza:* En escala Mohs: 5 – 6.

✓ **Aplicaciones:**

- Aglomerado asfáltico.
- Materia prima para la fabricación de cemento.
- Agricultura, como fertilizante mineral de suelos.

➤ **Escoria granulada:** Esta se produce por un enfriamiento brusco con agua fría a lo que se conoce como granulación. Debido a la rapidez del enfriamiento los átomos no tienen tiempo de orientarse al estado cristalino quedando así la escoria totalmente vítrea o amorfa³⁵.

✓ **Propiedades:** Estas escorias son muy semejantes a las arenas con un tamaño de grano que oscila entre 0,5 – 1,5 mm.

✓ *Angulo de rozamiento interno:* 55 – 65°.

³⁵ Blast Furnace Slag - technical sheet, December 2011

- ✓ *Humedad relativa:* 4 – 25%.
- ✓ *Densidad aparente:* Entre 5 – 15 kg /cm³: Esta propiedad es inversamente proporcional con la actividad química, de modo que escorias con mayor actividad presenta menor densidad y escorias con mayor densidad presenta una actividad química baja.

✓ **Aplicaciones:**

- Estabilización de suelos húmedos para construcción de vías.
- Adición en la fabricación de cementos.

➤ **Escoria peletizada:** Se obtiene dejando caer la escoria fundida sobre un cilindro rotatorio regado con agua el cual proyecta la escoria hacia arriba formando el pellet al caer³⁶.

✓ **Propiedades:**

- ✓ *Forma:* Ovalada.
- ✓ *Textura:* Lisa.
- ✓ *Tamaño de grano:* 1 – 9mm.

✓ **Aplicaciones:**

- Hormigón de albañilería.
- Hormigón ligero.
- Capa base en carreteras.

➤ **Escoria expandida:** Esta se elabora añadiendo pequeñas cantidades de agua a la escoria en estado líquido, el vapor que se genera produce una espuma, la cual una vez se enfría, es triturada obteniendo así una escoria ligera³⁷.

✓ **Propiedades:**

- ✓ *Forma:* Angulares, con tendencia cubica.
- ✓ *Textura:* Rugosa y lisa.
- ✓ *Densidad aparente:* Entre 8 – 10 Kg/cm³.

✓ **Aplicaciones:**

- Aglomerado mineral.
- Fertilizante mineral de suelos.

³⁶ Blast Furnace Slag - technical sheet, December 2011

³⁷ Blast Furnace Slag - technical sheet, December 2011

Figura 18. Escoria del proceso de obtención de Ferroníquel.



Fuente: Autor.

3.6.3 Propiedades generales de las escorias:

3.6.3.1 **Viscosidad:** La viscosidad de la escoria formada durante la fusión de lateritas de níquel es muy importante en la producción de ferroníquel, esta depende de la relación SiO_2/MgO , del porcentaje de Al_2O_3 y del porcentaje de FeO , encontradas como Piroxenos y Cristobalita. En general, un incremento en la sílice y del óxido de hierro, aumenta la viscosidad y a la vez un incremento de MgO reduce los valores de viscosidad. En ciertas escorias la viscosidad de las mezclas puede ser considerablemente menor que la viscosidad de cualquiera de los componentes que las constituye³⁸. Las escorias fluidas resultantes permiten un mejor contacto escoria-metal y también una descarga más fácil de la escoria fundida. La viscosidad de los fluidos es afectada por la temperatura, la presión, y, en el caso de mezclas, por la composición³⁹.

³⁸ SZEKELY, Julian. Fluid Flow Phenomena in metals processing. 1988

³⁹ SZEKELY, Julian. THEMELIS, Nickolas J. Rate Phenomena in Process Metallurgy. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1971.

3.6.3.2 **Tensión superficial:** Es una propiedad bastante importante ya que influye sobre la penetración de escoria en el refractario y en las emulsiones escoria-metal-gas. La tensión superficial de un líquido está influenciada por el carácter de los iones superficiales. La tensión superficial de una escoria depende de la basicidad⁴⁰. La tensión superficial de las escorias líquidas es del orden de 0,3 a 0,5 J/m² y, en general, disminuye al aumentar el contenido de SiO₂. Se obtiene una baja tensión superficial mediante la adición de óxidos de metales alcalinos, ácido bórico, sulfuro de calcio y ácido fosfórico en tanto que la cal, el óxido de hierro y la alúmina aumentan la tensión superficial⁴¹.

3.6.3.3 **Densidad:** Es una propiedad muy importante de la escoria, ya que, al tener una densidad menor con respecto al metal líquido permite que flote sobre este y al mismo tiempo lo proteja del efecto de la atmósfera exterior del horno.

3.6.3.4 **Basicidad:** Un ácido es un cuerpo capaz de suministrar uno o varios protones H⁺ en soluciones acuosas, mientras una base tiene la capacidad de captar éste protón. En las escorias donde la mayor parte de los constituyentes son óxidos, un ácido es aquel que puede absorber uno o varios aniones O⁻ para formar un ion complejo, mientras una base es una fuente de iones O⁻.



Ecuación 31.

Una escoria neutra por lo tanto es aquella que contiene una cantidad suficiente de iones O⁻, como para que cada tetraedro del óxido ácido esté en forma independiente del resto⁴².

3.6.3.5 **Conductividad eléctrica:** Es la medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material. Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles y esto permite su movimiento, esta también depende de otros factores físicos del propio material y de la temperatura.

La *Comisión Electrotécnica Internacional*, definió como patrón de la conductividad eléctrica, un hilo de cobre de 1 metro de longitud y un gramo de peso que da una resistencia de 0,15388 Ω a 20 °C. Al anterior patrón se le asignó una conductividad eléctrica de 100% IACS. (*International Annealed Cooper Standard, Estándar Internacional de Cobre no Aleado*).

⁴⁰ BRONSON, Arthur. ST. PIERRE, George. Electric Furnace Slags. Electric furnace steelmaking. 1985

⁴¹ THE UNITED STATES STEEL. The Making, Shaping and Treating of steel

⁴² Basicidad-Capítulo IV, Parámetros analizados.

A toda aleación de cobre con una conductividad mayor que 100% IACS se le denomina de alta conductividad⁴³. La conductividad es la inversa de la resistividad (ρ), su unidad es el S/m o $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$; por tanto⁴⁴:

$$K = \frac{1}{\rho} \quad \text{Ecuación 32.}$$

Usualmente, la magnitud de la conductividad (K), es la proporcionalidad entre el campo eléctrico (\mathcal{E}) y la densidad de corriente de conducción (J):

$$J = K \cdot \mathcal{E} \quad \text{Ecuación 33.}$$

➤ **Ley de Ohm:** Cuando se mantiene una diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor se produce por él una circulación de corriente eléctrica que es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia de tal conductor. Por tanto⁴⁵:

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{Ecuación 34.}$$

Dónde:

- I = Intensidad de la corriente medida en Amperios.
- E = Diferencia de potencial en Voltios.
- R = Resistencia en Ohmios.

La ley de ohm en el campo metalúrgico está directamente relacionada con los procesos de: Metalurgia extractiva, corrosión e integridad y soldadura.

➤ **Conductividad eléctrica en escorias metalúrgicas:** Entre las propiedades físicas de la escoria encontramos la conductividad eléctrica que desempeña un papel destacado en el proceso metalúrgico, la cual está dada por la función de composición y temperatura, función que depende del propio compuesto u óxido. La conductividad eléctrica de la escoria proviene de iones de óxidos ácidos tales como: SiO_2 , P_2O_5 , entre otros, que se pueden movilizar bajo el campo eléctrico.

Cuando los óxidos se encuentran a altas temperaturas es difícil que formen iones movilizarles por lo que la conductividad de estos se hace muy pequeña. En el caso de los óxidos básicos, estos pueden romper la estructura de red de los óxidos ácidos dado por liberación de iones de oxígeno, por lo tanto, en un cierto rango la conductividad de la escoria se incrementa con el aumento del contenido de CaO , MgO , MnO , entre otros⁴⁶.

⁴³ Disponible en: https://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=10059

⁴⁴ Disponible en: <http://www.reitec.es/Pdf/agua01.pdf>

⁴⁵ Disponible en: PDF]Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica - OCW-UV

⁴⁶ Q. JIAO and N. J. THEMELIS. Correlations of Electrical Conductivity to Slag Composition and Temperature

La conductividad eléctrica es indirectamente proporcional al grado de viscosidad de la escoria; escorias con una alta viscosidad presentan una conductividad eléctrica muy baja dado que la escoria no se encuentra totalmente fundida, por ende, existe una ionización parcial mas no completa de los óxidos metálicos presentes, es decir, no hay un flujo continuo de electricidad en la escoria porque los cationes no se pueden mover libremente sobre esta.

Generalmente un grado alto de viscosidad está relacionado con el incremento en la concentración de óxidos como el SiO_2 y Al_2O_3 , a su vez a mayor concentración de óxidos como el FeO y el CaO el grado de viscosidad disminuirá proporcionalmente y la escoria será mucho más fluida facilitando la ionización de los óxidos metálicos y el incremento de la conductividad eléctrica de la escoria.

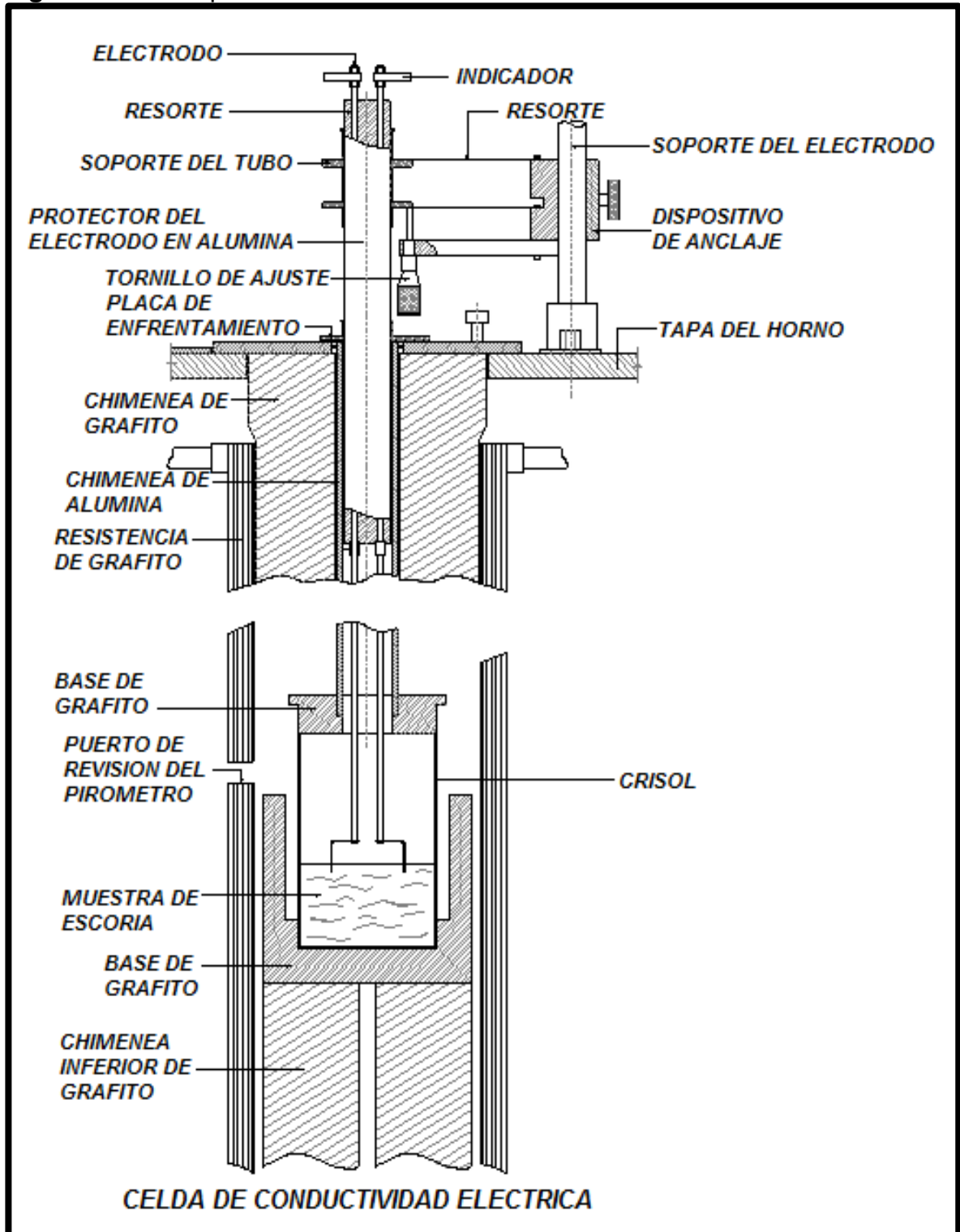
Figura 19. Conductividad Eléctrica de óxidos comunes medida a su Temperatura de Liquidus.

Oxide	T °C	K, 1/ohm-cm
SiO_2	1710	10^{-5}
Al_2O_3	2050	15
CaO	2580	40
FeO	1370	122
MgO	2800	35

Fuente: Metallurgical Transactions, Volumen 19b.

➤ **Medición de la conductividad eléctrica:** Para la medición de la resistencia en escorias se usa una celda de conductividad eléctrica.

Figura 20. Celda para medir Conductividad Eléctrica.



Fuente: BARATI, Mansoor y COLEY, Kenneth S. Feb 2006.

El equipo cuenta con dos electrodos de grafito montados en un tubo protector de alúmina. El mecanismo de medida es un alambre de molibdeno ($\varnothing = 1 \text{ mm}$), el cual es ensamblado en la punta de los electrodos de 4 mm, haciendo puente entre el material y los electrodos⁴⁷. La celda externamente tiene resistencias de grafito que calientan un crisol interno fabricado en molibdeno. La constante de la celda se determina con una solución (0.01 – 1.0) M de KCl.

La conductividad eléctrica y la resistividad eléctrica de la escoria son muy importantes para el funcionamiento óptimo del horno. Se han realizado mediciones de conductividad eléctrica de las escorias, que pueden ser convertidas a resistencia del baño en el horno mediante la siguiente expresión:

$$R_s = P_s - K \quad \text{Ecuación 35.}$$

Donde:

- R_s = Resistencia de la escoria.
- P_s = Resistividad específica.
- K = Constante de la celda = (*Urquart*=0,0036), (*Halved-Nilsen* = 0,0039) y (*Persson* = 0,0045)

Esta ecuación de forma genérica, es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales:

$$\text{Log } X \cdot \frac{a}{T \cdot b} \quad \text{Ecuación 36.}$$

Donde:

- X = La conductividad eléctrica en S/cm.
- T = temperatura en °K.
- a y b = Parámetros que dependen de la composición.

El procedimiento de medición que se describe a continuación, emplea el método Wenner, aceptado universalmente y desarrollado por el Dr. **Frank Wenner**, miembro de la agencia de estándares de EE.UU., en 1915. (*F. Wenner, A Method of Measuring Earth Resistivity; Bull, National Bureau of Standards, Bull 12(4) 258, p. 478-496; 1915/16.*)⁴⁸.

⁴⁷ BARATI, Mansoor y COLEY, Kenneth S. Feb 2006. Electrical and Electronic Conductivity of CaO-SiO₂-FeO_x Slags at Various Oxygen Potentials: Part II. Mechanism and a Model of Electronic Conduction. En: Metallurgical and Materials Transactions. Tom 37B, No. 1; p. 51 – 61.

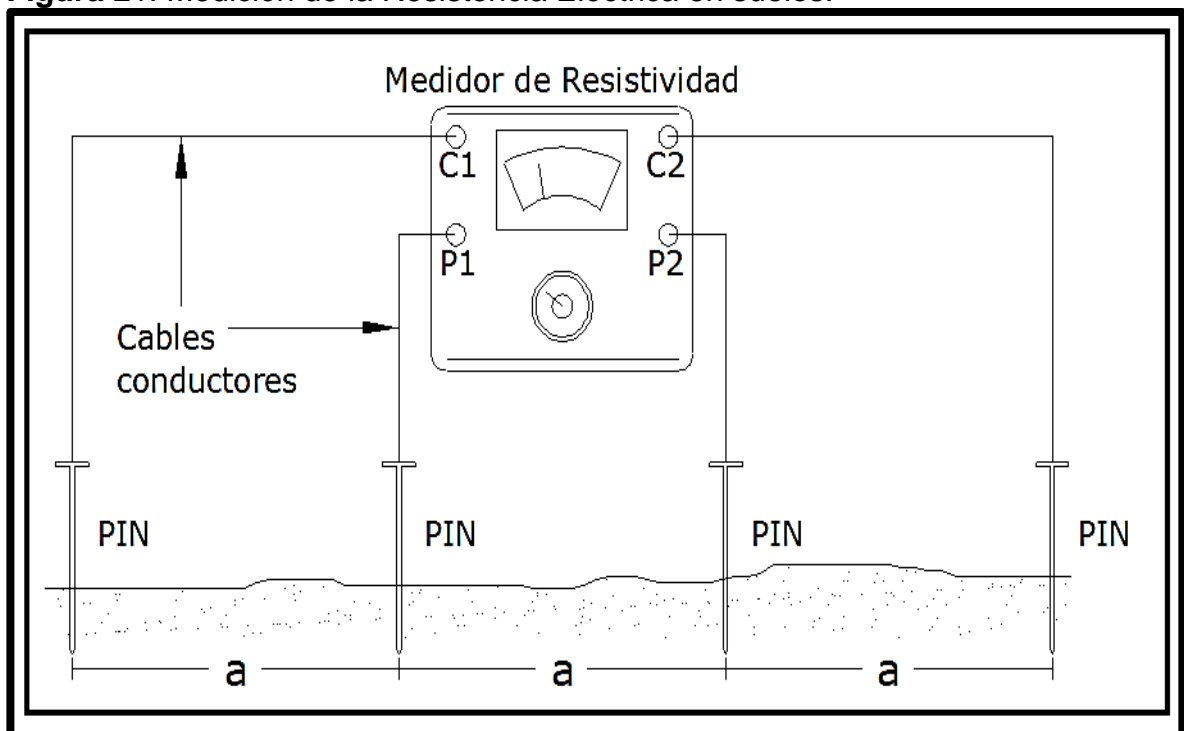
⁴⁸ Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/286835242/Resistividad-Del-Terreno-Metodo-Wenner>.

Para las mediciones de resistividad de suelo se utiliza lo estipulado en las normativas ASTM G57, más comúnmente conocido en la industria de la corrosión como el “Método de 4 Pines de Wenner”⁴⁹.

Este procedimiento consta de cuatro pines clavados en el suelo en línea recta separados a una misma distancia entre ellos, esta distancia es igual a la profundidad a la cual se desea conocer la resistividad.

La medición de la resistividad se basa en la caída de voltaje entre el par de pines ubicados en la parte central con la corriente que fluye entre los pines de los extremos. La resistencia en ohmios es leída en el dial multiplicado por el rango donde se encuentra posicionado el switch.

Figura 21. Medición de la Resistencia Eléctrica en suelos.



Fuente: William Luis Suque Cercado. “Diseño del Sistema de Protección Catódica por Ánodos Profundos para un Bosque de Tanques de Almacenamiento de Combustible”.

⁴⁹ ASTM- Designation: G57 - 06 (Reapproved 2012), Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method

La resistencia del suelo está dada por la lectura del instrumento acorde a la siguiente fórmula⁵⁰:

$$\rho = 2\pi.a. R. \quad \text{Ecuación 37.}$$

Donde:

- a = Distancia entre pines (Centímetros).
- R = Resistencia dada por el instrumento (Ohmios).
- $\pi = 3.1416$.
- ρ = Resistividad del suelo (Ohmios/Centímetro).

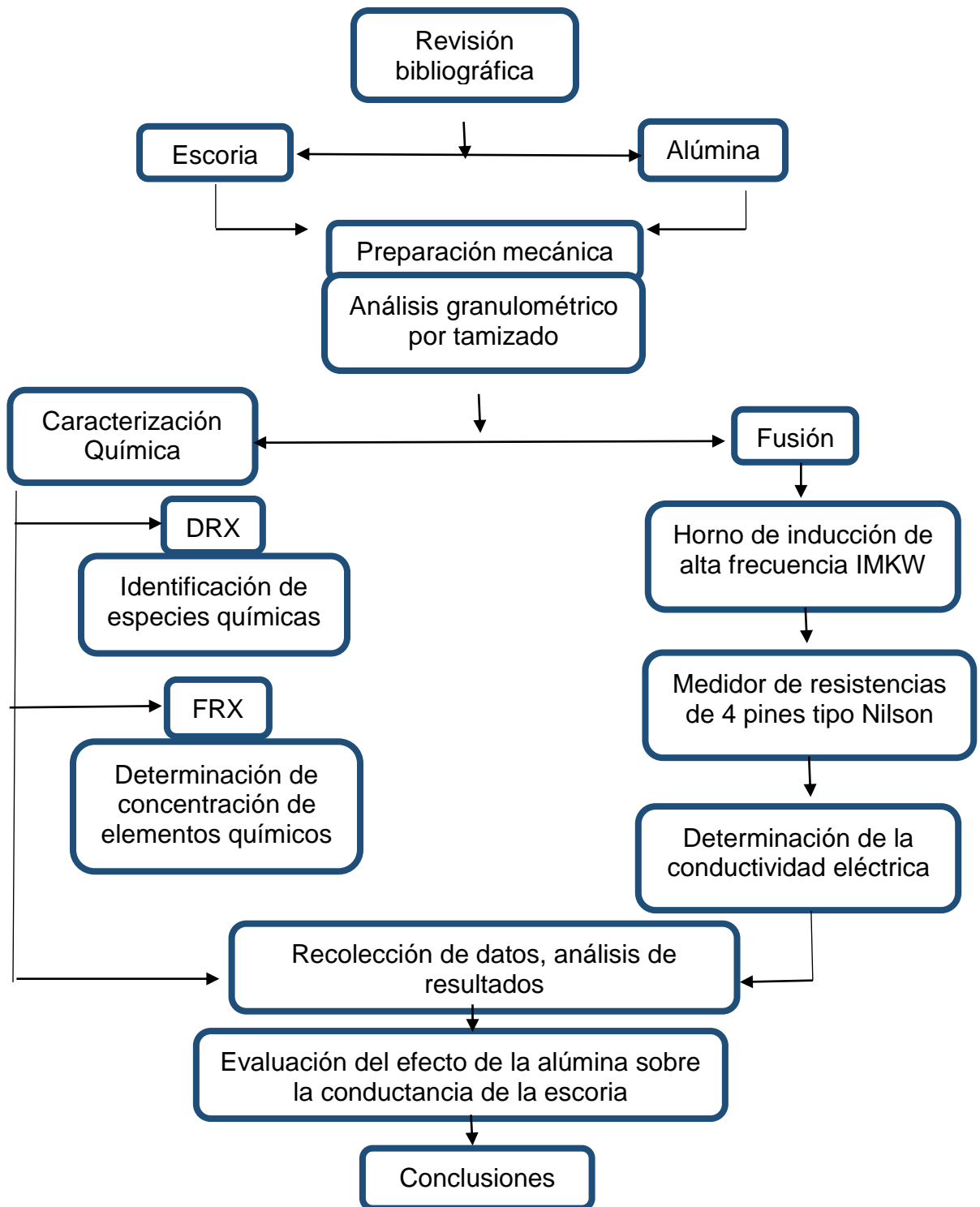
Figura 22. Medidor de Resistividad de cuatro pines tipo Nilsson.



Fuente: Autor.

⁵⁰ Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/286835242/Resistividad-Del-Terreno-Metodo-Wenner>.

4. METODOLOGÍA.



5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Durante el desarrollo de esta investigación se hicieron consultas bibliográficas en libros y tesis sobre; el proceso de producción de ferróníquel, la caracterización de escorias, las propiedades físico-químicas de escorias de ferróníquel y temas relacionados a la investigación. Se utilizó también la base de datos ScieceDirect, donde se tomaron datos del proceso, información relevante de libros, artículos, manuales, normas y bases de datos.

5.2 ESCORIA.

La escoria seleccionada para este trabajo fue una escoria del proceso de obtención de ferróníquel proveniente de la planta de producción, *CERRO MATOSO S.A.*

5.3 ALÚMINA.

Se utilizó alúmina pura proporcionada por el laboratorio de siderurgia de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la cual se usa como abrasivo en los ensayos de metalografía.

Figura 23. Escoria de Ferróníquel y Alúmina pura.



Fuente: Autor.

5.4 PREPARACIÓN MECÁNICA.

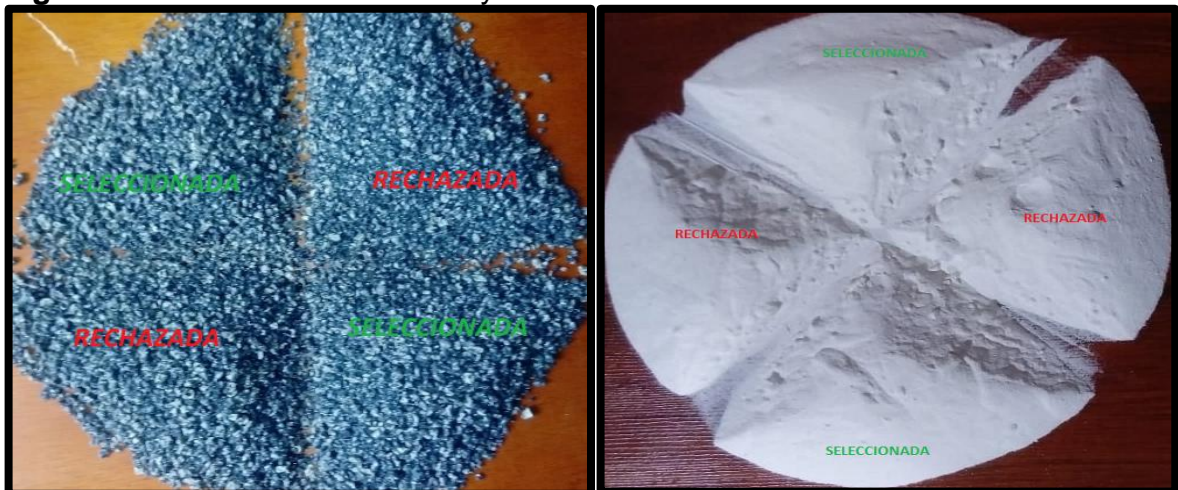
5.4.1 Trituración: Se hace necesaria para reducir el tamaño de las muestras obtenidas por las siguientes razones:

- Liberar especies minerales desde una matriz formada por minerales de interés y ganga.
- Promover reacciones químicas y físicas a través de la exposición de una mayor área superficial.
- Producir una muestra de mineral con características de tamaño deseable para su posterior procesamiento y manejo.

Dada la fragilidad de la escoria su preparación mecánica se hizo manualmente con la ayuda de un mortero. El material se llevó a un tamaño de grano promedio de 3 mm. La muestra de alúmina pura suministrada se encuentra ya pulverizada por lo que su trituración no fue necesaria.

5.4.2 Cuarteo: Este se hizo de forma manual, se colocó la muestra sobre una plancha de madera la cual tenía una superficie plana, dura y limpia, evitando así una posible contaminación de la muestra. Posteriormente se mezcló todo el material para homogenizarlo haciendo con éste una pila cónica la cual se aplano con ayuda de una tabla limpia. Posteriormente la pila fue dividida en cuatro partes iguales dando una forma similar a una cruz de las cuales se descartaron y seleccionaron dos diagonalmente opuestas. Este procedimiento fue el mismo para la muestra de escoria y la muestra de alúmina.

Figura 24. Cuarteo de la Escoria y Cuarteo de la Alúmina.



Fuente: Autor.

La preparación mecánica de las muestras fue desarrollada en el laboratorio de preparación mecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Una vez terminada la preparación mecánica se obtuvieron unas muestras específicas de trabajo para el desarrollo del proyecto equivalentes a:

- ✓ Escoria = 3,43 Kg. = 3430 gramos.
- ✓ Alúmina = 1,46 Kg. = 1460 gramos.

5.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO.

Las propiedades físicas y químicas de los sólidos varían en función de su distribución granulométrica. Por esta razón, si la distribución granulométrica se mantiene igual se puede garantizar un comportamiento constante de la muestra. El análisis se hizo bajo norma, ASTM C136-06⁵¹.

Tabla 1. Características de los tamices A.F.S. y de los tamices Fischer.

SERIE A.F.S.			SERIE FISCHER (DIN)	
Número del cedazo	Apertura de malla mm	Factor α	Número del cedazo	Apertura de malla mm
6	3,36	3	—	—
12	1,68	5	4	1,50
20	0,84	10	6	1
30	0,59	20	10	0,6
40	0,42	30	—	—
50	0,297	40	20	0,30
70	0,210	50	30	0,20
100	0,149	70	—	—
140	0,105	100	60	0,10
200	0,074	140	—	—
270	0,053	200	100	0,06
fondo	—	300	fondo	—

Fuente: Libro, Tecnología de la fundición capello, pág. 43.

Los tamices utilizados para el análisis granulométrico fueron los siguientes:

Tabla 2. Clasificación de los tamices usados para la muestra de Alúmina.

TAMIZ ASTM.	Abertura del Tamiz (mm).	Clases de Arena.
Nº 100	0,149	Arena Fina
Nº 200	0,074	

Fuente: Autor.

⁵¹ ASTM-Designación C 136- 01, Método de Ensayo Normalizado para determinar el Análisis Granulométrico de los Áridos Finos y Gruesos

Tabla 3. Clasificación de los tamices usados para la muestra de Escoria.

Tamiz ASTM.	Abertura del Tamiz (mm).	Clases de Arena.
Nº 4	5	Arena Gruesa
Nº 10	2	Arena Media
Nº 30	0,59	
Nº 50	0,297	
Nº 100	0,149	Arena Fina
Nº 200	0,074	

Fuente: Autor.

Figura 25. Tamices y Tamizador automático.



Fuente: Autor.

Figura 26. Peso retenido en cada tamiz para la muestra de Escoria y Alúmina respectivamente.



Fuente: Autor.

Los equipos necesarios para el desarrollo experimental del análisis granulométrico, fueron suministrados por el laboratorio de preparación mecánica, perteneciente a la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

De acuerdo a los valores de los pesos retenidos en cada tamiz, se registran los siguientes datos:

✓ **Porcentaje retenido (%R):**

$$\%R = \frac{PR}{MT} \times 100\% \quad \text{Ecuación 38.}$$

Donde:

- PR = Peso retenido en cada Tamiz. (g)
- MT = Peso total de la muestra. (g)

✓ **Porcentaje retenido acumulado (%RA):** Suma acumulativa de los porcentajes retenidos en cada tamiz.

✓ **Porcentaje pasante acumulado: (%PA):**

$$\%PA = 100 - \%RA \quad \text{Ecuación 39.}$$

✓ **Índice de grosor o de finura (i):** Numero convencional que manifiesta el tamaño de las clases de granos que predominan en una muestra. Este está dado por:

$$i = \frac{P_1 \times \alpha_1 + P_2 \times \alpha_2 + P_3 \times \alpha_3 + P_n \times \alpha_n \dots}{P} \quad \text{Ecuación 40.}$$

Donde:

- P_n = Porcentaje contenido en cada tamiz.
- α = Factor.
- P = Porcentaje total.

✓ **Curva granulométrica:** Las curvas granulométricas se usan para comparar diferentes suelos, además dos parámetros básicos se determinan con estas curvas, que son:

➤ **Coeficiente de uniformidad (Cu):** Medida de granulación del suelo.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Ecuación 41.}$$

➤ **Coefficiente de curvatura (Cc):** Medida complementaria para medir la uniformidad de la curva.

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad \text{Ecuación 42.}$$

Donde:

- D_{10} = Tamaño del diámetro donde pasa el 10% del material.
- D_{30} = Tamaño del diámetro donde pasa el 30% del material.
- D_{60} = Tamaño del diámetro donde pasa el 60% de material.

5.6 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.

5.6.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX): Cuando una muestra es irradiada con rayos X, puede ocurrir que la radiación sea dispersada sin pérdida de energía, con pérdida de energía o bien puede crearse una vacancia en una capa atómica⁵². En este último caso, el estado atómico excitado decae al llenarse la vacancia por un electrón de una capa más externa y se libera una cantidad de energía de dos maneras que son:

- Como un fotón de rayos X, cuya probabilidad de ocurrencia se representa mediante la producción de fluorescencia.
- Transfiriéndose a otro electrón de una capa más externa, el cual es expulsado del átomo quedando el mismo con dos vacancias.

La Fluorescencia de Rayos X, se dedica al estudio del primer proceso identificando y caracterizando las líneas fluorescentes. En la década del 50 se presentaron expresiones teóricas para calcular la intensidad fluorescente emitida por un elemento presente en una muestra extensa considerando un haz de rayos X monocromático y las líneas de emisión estudiadas fueron las líneas K. Se presentaron complicaciones debidas a efectos de reforzamiento que se producen en muestras multi-componentes, en las cuales la radiación fluorescente emitida por un elemento puede tener la energía suficiente para excitar a otro de los elementos presentes. Posteriormente, en la década del 60 se realizaron estudios considerando un haz de excitación policromático y niveles de emisión diferentes al K. El análisis por Fluorescencia de Rayos X para excitación con radiación monocromática y policromática, debe tener en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- Los haces incidentes y emergentes son paralelos, uniformes y de sección transversal infinita, es decir, el haz tiene una sección mucho mayor que el espesor de penetración de la radiación en la muestra.

⁵² http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm

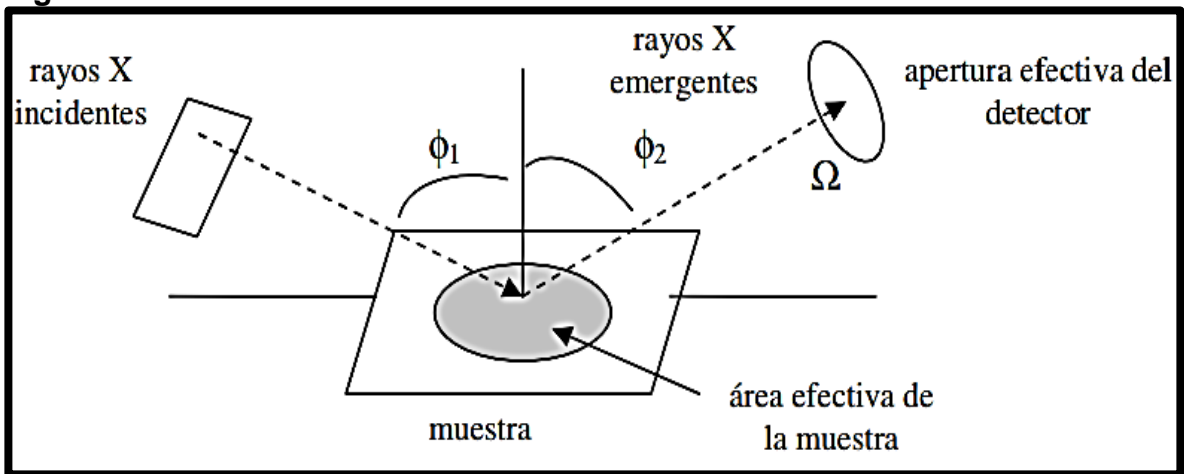
- La superficie de la muestra es pulida, extensa, homogénea y de espesor infinito.
- Siendo $\mu_i(\lambda)$, el coeficiente de absorción de un elemento en particular (i) para una longitud de onda (λ), para una muestra multi-componente el coeficiente de absorción total será:

$$\mu_M(\lambda) = \sum_i \mu_i(\lambda) C_i \quad \text{Ecuación 43.}$$

Donde:

- C_i = Es la fracción en peso del elemento i.

Figura 27. Geometría de excitación en FRX.



Fuente: Análisis por FRX: Implementación de Guías de Haces en FRX

En la figura 27, se muestra la geometría de la excitación y detección en el análisis por Fluorescencia de Rayos X donde:

- Ω = Es el ángulo sólido efectivo subtendido por el detector.
- ϕ_1 = Es el ángulo formado por el haz de radiación incidente y la dirección normal al plano de la muestra.
- ϕ_2 = Es el ángulo formado por haz de radiación emergente y la dirección normal al plano de la muestra.
- λ = Es la longitud de onda de la radiación monocromática incidente.
- i_l = Es la línea l, excitada del elemento i.
- λ_{\min} = Es la menor longitud de onda presente en el haz policromático incidente.
- λ_{\max} = Es la mayor longitud de onda presente en el haz policromático incidente.

- $\mu_i/\rho(\lambda)$ = Es el coeficiente de absorción total del elemento i, para una longitud de onda λ .
- C_i = Es la concentración del elemento i, en la muestra.
- $\mu_M/\rho(\lambda) = \sum_i \mu_i/\rho(\lambda)C_i$ = Es el coeficiente de absorción total para la muestra multicomponente para la longitud de onda λ .
- $\tau_i(\lambda)$ = Es el coeficiente de absorción fotoeléctrico del elemento i, para la longitud de onda λ ; es decir, probabilidad de que los fotones incidentes produzcan vacancias.
- ω_{ii} = es el coeficiente de producción de fluorescencia de la línea i, del elemento i; es decir, la probabilidad de emisión de fotones fluorescentes.
- K_{ii} = Es la proporción de fotones absorbidos únicamente en la capa considerada.
- Γ_{ii} = Es la fracción de intensidad que corresponde sólo a la línea considerada en la capa, ya que la emisión característica de cada capa está formada por varias sub líneas.

5.6.1.1 **Aplicaciones:** La FRX, tiene como objetivo principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas y líquidas.

Figura 28. Equipo de Fluorescencia de Rayos X.



Fuente: INCITEMA "Servicios de Investigación en Materiales" EQUIPOS

5.6.2 Difracción de Rayos X (DRX): Está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación⁵³.

⁵³ http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.ht

Los rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiados sobre la muestra a analizar los rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. El método analítico de, *Debye-Scherrer*, consiste en irradiar con rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles. Para ello es aplicable la Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta. \quad \text{Ecuación 44.}$$

Donde:

- d = Es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción.

Figura 29. Difractómetro de Rayos X.



Fuente: INCITEMA "Servicios de Investigación en Materiales" EQUIPOS.

5.6.2.1 Aplicaciones:

La DRX, es un método de alta tecnología no destructivo para el análisis de una amplia gama de materiales, incluso fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores. La aplicación fundamental de la Difracción de Rayos X es, la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina. Otras aplicaciones son el análisis cuantitativo de compuestos cristalinos, la determinación de tamaños de cristales, la determinación del coeficiente de dilatación térmica, así como cálculos sobre la simetría del cristal y en especial la asignación de distancias a determinadas familias de planos y la obtención de los parámetros de la red.

Estos ensayos fueron realizados por el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA, ubicado dentro de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC.

5.7 FUSIÓN:

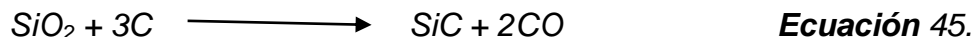
Tabla 4. Mezclas para fusión.

MEZCLA	ALÚMINA	ESCORIA	GRAMOS TOTALES
Nº 1	0 % - 0 g	100 % - 300 g	300 g
Nº 2	5 % - 15 g	95 % - 285 g	300 g
Nº 3	10 % - 30 g	90 % - 270 g	300 g
Nº 4	20 % - 60 g	80 % - 240 g	300 g
Nº 5	30 % - 90 g	70 % - 210 g	300 g
Nº 6	40 % - 120 g	60 % - 180 g	300 g
Nº 7	50 % - 150 g	50 % - 150 g	300 g
Total.	465 g	1635 g	2100 g

Fuente: Autor.

Para la respectiva fusión de cada mezcla se usaron crisoles de Carburo de Silicio Nº 4 los cuales previamente fueron recubiertos en su interior con, Concrax 1700, el cual, actúa como material refractario evitando el contacto directo de la escoria fundida con el crisol.

5.7.1 Carburo de Silicio, SiC: Fue descubierto en 1893 por el francés, *Henri Moissani*, mientras examinaba muestras de rocas del cráter de un meteorito ubicado en el Cañón del Diablo (Arizona, Estados Unidos). El proceso industrial comúnmente utilizado para la producción de Carburo de Silicio, utiliza el método Acheson, basado en la siguiente reacción química:



5.7.1.1 Características del Carburo de Silicio: El Carburo de Silicio posee una extrema dureza, sólo superada por el diamante y unos pocos compuestos sintéticos, también es altamente resistente al calor, el Carburo de Silicio es un material óptimo para aplicaciones abrasivas y refractarias dada las siguientes propiedades⁵⁴.

⁵⁴ Disponible en: <http://www.navarrosic.com/empresa/carburo>

➤ **Propiedades físicas:**

- ✓ *Color:* Negro, gris oscuro, verde.
- ✓ *Dureza:* 2500 – 2800 Mpa.
- ✓ *Densidad:* 3,21 g/cm³.

➤ **Propiedades mecánicas:**

- ✓ *Resistencia a la compresión:* 1725 – 2500 Mpa.
- ✓ *Resistencia a la tracción:* 310 Mpa.
- ✓ *Módulo de elasticidad de Young:* 420 – 450 Mpa.

➤ **Propiedades térmicas:**

- ✓ *Resistencia al choque térmico:* 350 – 500°C.
- ✓ *Conductividad térmica:* 41 – 90 W/m.°K.
- ✓ *Expansión térmica:* 4,7 – 5X10⁻⁶/°K.

➤ **Propiedades eléctricas:**

- ✓ *Constante dieléctrica:* 10,2 MHz.
- ✓ *Resistividad eléctrica:* 10⁸W/cm.

Figura 30. Crisoles de Carburo de Silicio y Refractario Concrax 1700.



Fuente: Autor.

Las características tales como, la expansión térmica, la alta relación fuerza-peso, alta conductividad térmica, dureza, resistencia a la abrasión y a la corrosión, y lo más importante, el mantenimiento de la resistencia elástica a temperaturas de

hasta 1650 °C, lo convierten en un material óptimo para el desarrollo de esta investigación.

5.7.2 Concrax 1700:

5.7.2.1 **Descripción:** Es un concreto refractario denso de alta alúmina, posee una alta refractariedad y conserva sus propiedades mecánicas a altas temperaturas motivo por el cual se usa para el revestimiento de calderas, hornos de fusión, etc.⁵⁵

5.7.2.2 Composición química:

- Al_2O_3 : 86%.
- SiO_2 : 4%.
- Fe_2O_3 : 1,6%.
- TiO_2 : 3,1%.
- CaO : 4,7%.
- MgO : 0,3%.
- Alcalinos: 0,3%.

5.7.2.3 Propiedades:

- ✓ *Temperatura equivalente:* 1820°C
- ✓ *Temperatura máxima de trabajo:* 1650°C.
- ✓ *Tamaño de grano:* 5mm.
- ✓ *Densidad volumétrica a 1600°C:* 2,85 – 2,95 g/cm³.
- ✓ *Módulo de ruptura a 1600°C:* 50 – 60 Mpa.

⁵⁵ Disponible en: <http://www.gamma.com.co/wp-content/uploads/2018/05/CONCRAX-1700.pdf>

Figura 31. Crisol de SiC recubierto con Concrax 1700.



Fuente: Autor.

5.7.2.4 Preparación de la mezcla: Se recomienda usar 1 litro de agua por cada 10 Kg de material seco. Se depositan los kilogramos necesarios de trabajo dentro de una bandeja y se agregan los litros de agua correspondientes, se revuelve la mezcla hasta obtener una masa homogénea durante un periodo de 15 minutos. Una vez la mezcla se encuentra en estado moldeable se coloca en los bordes y fondo del crisol de Carburo de Silicio. La capa de Concrax 1700 dentro del crisol se hace de un grosor máximo de 3mm en los bordes y 6mm en el fondo.

5.7.3 Curva de calentamiento: Es la representación de cuanto calor se necesita para que varíe la temperatura de un cuerpo manteniendo su masa constante. Este ensayo térmico se aplicó para el crisol de SiC con recubrimiento cerámico de Concrax 1700, con el fin de observar el comportamiento del Concrax 1700 a altas temperaturas. Para este ensayo se utilizó un horno tipo mufla multipropósito. Su sistema de calentamiento está basado en resistencias tipo espiral ubicadas en ranuras especialmente diseñadas para permitir una radiación adecuada de calor hacia la cámara interna alcanzando una temperatura máxima promedio de 1600°C.

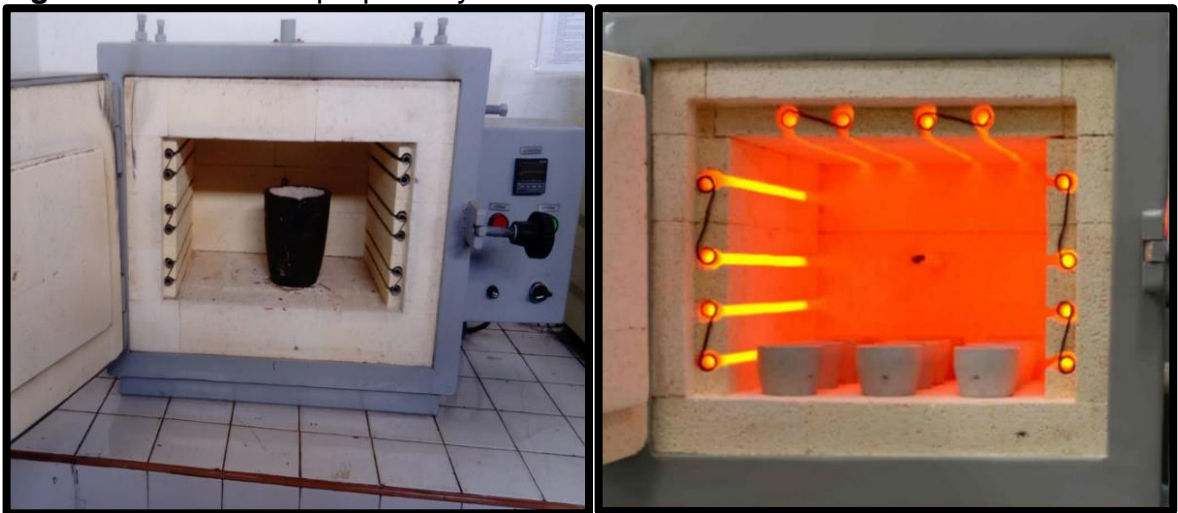
Estas muflas se usan para varias aplicaciones como:

- Fundición de vidrio.
- Eliminación de cera.
- Esmalte al fuego.
- Fundición de metales.
- Tratamientos térmicos.

El ensayo se realizó de la siguiente manera:

- Temperatura inicial de 17.8°C (T ambiente).
- Se elevó a una temperatura de 550°C, en el transcurso de 5 horas.
- Se mantuvo la temperatura de 550°C, durante 30 minutos.
- Se elevó a una temperatura de 1150°C, en el transcurso de 5 horas.
- Se mantuvo la temperatura de 1150°C, durante 30 minutos.
- Se elevó a una temperatura máxima de 1500°C, en el transcurso de 5 horas.
- Se mantuvo la temperatura de 1500 °C, durante 30 minutos.
- Se llevó a temperatura inicial 17.8°C, en el transcurso de 19 horas.

Figura 32. Mufla multipropósito y su sistema de calentamiento.



Fuente: Autor.

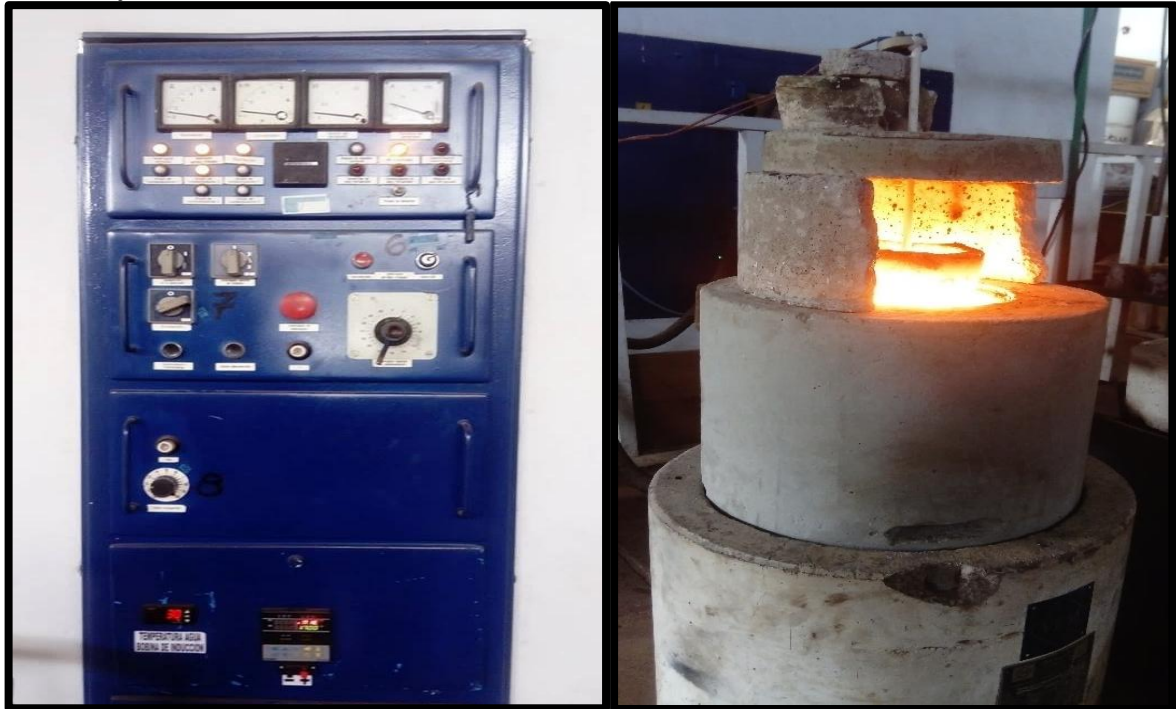
Una vez realizado el ensayo de calentamiento, el crisol recubierto con Concrax 1700 es introducido dentro de la bobina de inducción del Horno de Inducción de alta frecuencia para la respectiva fusión de las mezclas de escoria y alúmina.

5.7.4 Horno de Inducción: En esta investigación, se usó el Horno de Inducción de alta frecuencia IMKW, ubicado en el laboratorio de siderurgia dentro de las instalaciones de los laboratorios de Metalurgia, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Es un equipo a nivel de laboratorio que permite realizar fusiones de diferentes tipos de metales, aleaciones y escorias, facilitando varios procesos en la parte siderúrgica. Este horno cuenta con un rango de potencia que va de 0 hasta los 30 Kw, este rango se controla a través de un sistema de palanca Tap to Tap el cual permite regular el flujo de corriente eléctrica que circula por la bobina a medida que se desarrolla el proceso de fusión del material ubicado dentro de la bobina.

El sistema de refrigeración consiste de un ducto que rodea la bobina, este transporta un flujo de agua que se mantiene constante durante todo el proceso permitiendo una refrigeración adecuada de la bobina y a su vez transporta el flujo de corriente de alta frecuencia la cual es proporcionada por un generador especial, esta excita en el metal corrientes parásitas que lo calientan hasta su total fusión. La bobina está recubierta de Concrax 1800 de alta refractariedad. En este horno se procesan materias primas de gran calidad y debido a la velocidad del proceso el metal no se oxida mucho.

Figura 33. Panel de control del Horno de Inducción de Alta Frecuencia y Bobina de trabajo



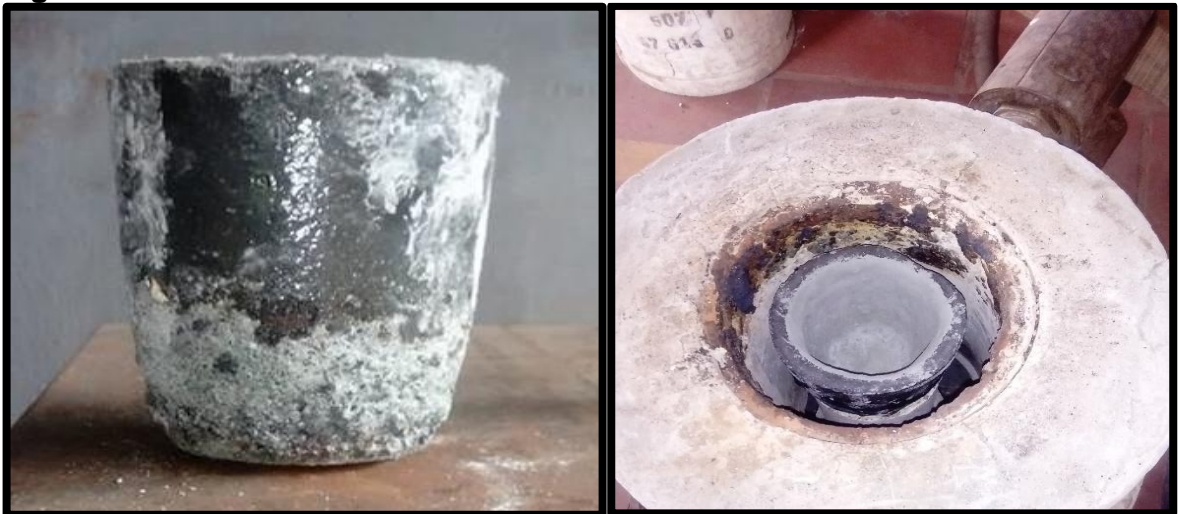
Fuente: Autor.

5.8 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA:

La conductividad eléctrica de cada mezcla fundida fue determinada bajo la norma: ASTM G57 (06) Re aprobada en el 2012 (Método de prueba estándar para Medida de campo de la resistividad del suelo utilizando el Método Wenner de cuatro pines)⁵⁶. En esta tesis se usó el medidor de resistencia de 4 pines tipo Nilsson, proporcionado por el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA. Para las pruebas de medición de conductividad eléctrica de la escoria fundida se hicieron necesarios los siguientes instrumentos.

5.8.1 Crisol Carburo de Silicio N°4: El Carburo de Silicio posee una extrema dureza y alta resistencia al calor, estas propiedades hacen del Carburo de Silicio un material óptimo para el desarrollo de estas pruebas puesto que será sometido a altas temperaturas. Para la respectiva fusión cada crisol de carburo de silicio N°4, es previamente recubierto en su interior con Concrax 1700 el cual actúa como material refractario evitando el contacto directo de la escoria fundida con el crisol.

Figura 34. Crisol de SiC N°4.



Fuente: Autor.

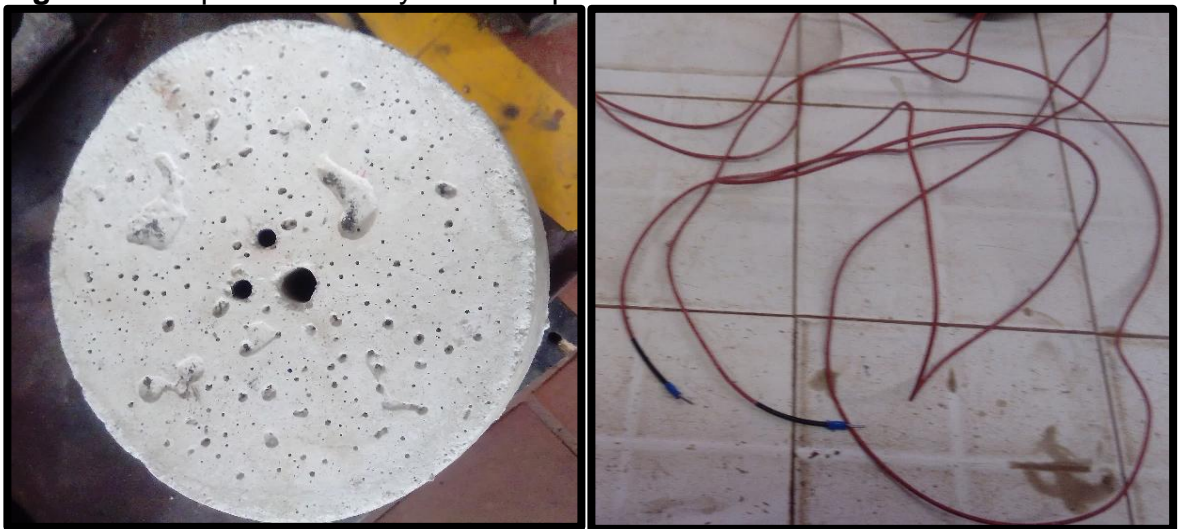
- ✓ Dimensiones del crisol:
- Altura: 16 cm.
- Diametro inferior: 5 cm.

⁵⁶ ASTM- Designation: G57 - 06 (Reapproved 2012), Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method

- Diámetro superior: 12 cm.
- Diámetro interno inferior: 3,5 cm.
- Diámetro interno superior: 10 cm.

5.8.2 Cables conductores: Los cables usados fueron de tipo: CT-J-20 FVM. 2m de largo. Son flexibles, en su interior poseen hilos de cobre los cuales se encuentran recubiertos por una capa de hilos de níquel lo cual los hace altamente resistentes a la temperatura.

Figura 35. Tapa refractaria y Cable niquelado.



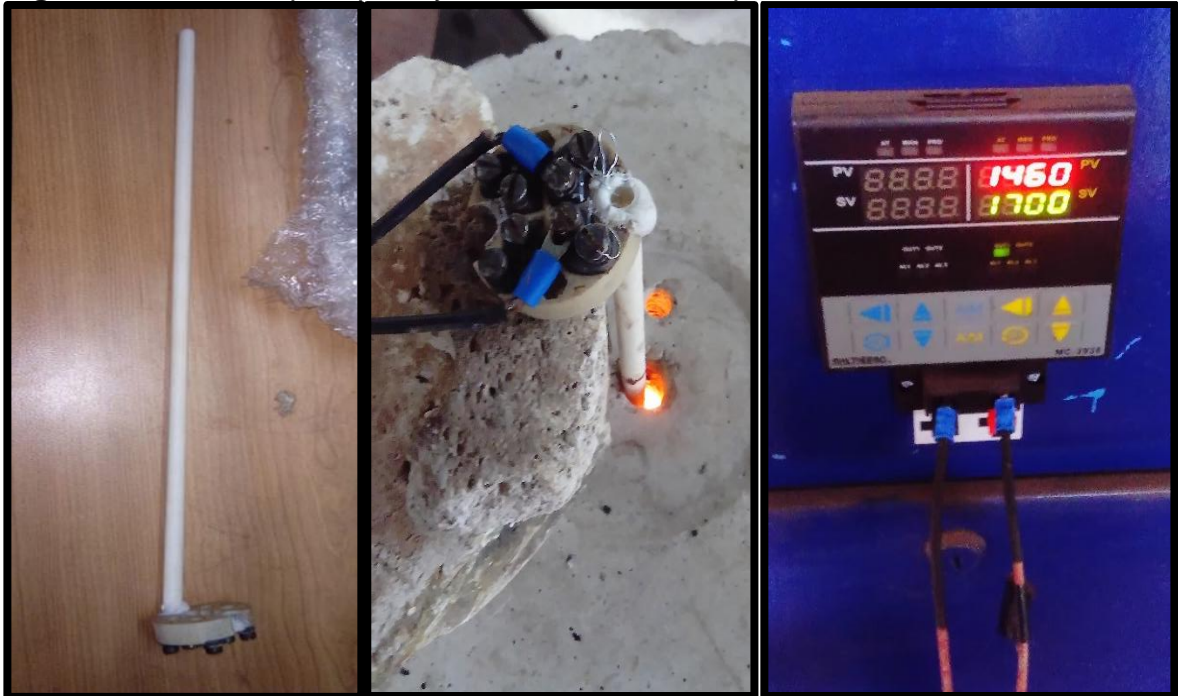
Fuente: Autor.

5.8.3 Tapa refractaria: Estas se hicieron con Concrax 1700 distribuido por la empresa, *Refractarios Magnesita Colombia S.A.S.* Su función es permitir la inmersión de los electrodos y la termocupla tipo R a la escoria fundida, así como aislarla de la acción de la atmosfera del ambiente y proteger el crisol de la posible reacción entre este y la escoria. En el centro se perforaron 3 agujeros en forma de delta para el ingreso de los electrodos de grafito y la termocupla respectivamente.

- ✓ Dimensiones de la tapa:
 - Diámetro: 23 cm.
 - Altura: 4 cm.
 - Distancia entre agujeros: 1,5 cm
 - Diámetro agujero de los electrodos: 8,5 mm.
 - Diámetro agujero de la termocupla: 1 cm.

5.8.4 Termocupla tipo R: Conformada por un termopozo de alúmina pura de 35 cm de largo y 7 mm de diámetro, el cual aísla del baño líquido un termopar de alúmina, Platino-Rodio, conectada mediante un cable niquelado a un controlador de temperatura marca, MaxThermo-MC2838PID, el cual se encuentra instalado en el panel de control principal del Horno de Inducción. Con ella se realizó un control de temperatura de Liquidus correspondiente a cada fusión.

Figura 36. Termocupla tipo R y Controlador de temperatura MaxThermo.



Fuente: Autor.

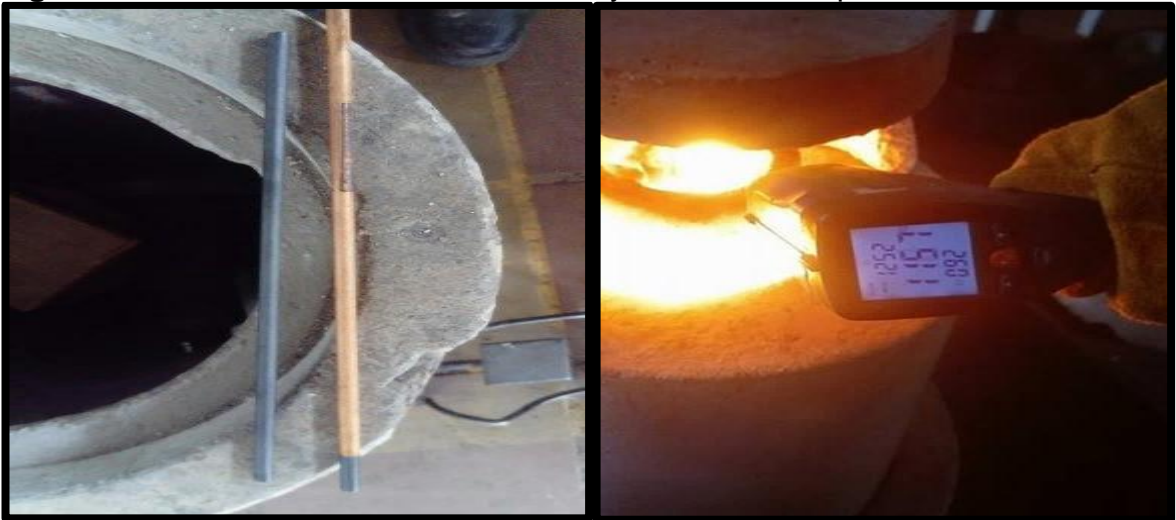
5.8.5 Pistola de temperatura: Termómetro infrarrojo de alta temperatura serie DT-8869H. Proporciona lecturas rápidas, fáciles y precisas para la mayoría de las mediciones de temperatura de superficie, con punteros láser dobles los cuales deben coincidir en un solo punto para obtener lectura correcta.

5.8.6 Electrodo de grafito: Se usaron electrodos de grafito tipo ARC-AIR Ref. RC1010 de 30 cm de largo y un diámetro correspondiente de 8mm. estos poseen un recubrimiento de cobre de 0,2 mm de espesor el cual fue retirado mecánicamente. Gracias a Las excelentes propiedades del grafito lo hicieron óptimo para este trabajo, entre las que encontramos:

- Temperatura de fusión muy alta 3.725 °C.
- Densidad de 2,06 g/cm³.

- Buen conductor del calor.
- Semiconductor eléctrico.
- No reacciona químicamente con la mayoría de los ácidos, bases y agentes corrosivos.

Figura 37. Electrodo de Grafito ARC-AIR y Pistola de temperatura DT-8869H.



Fuente: Autor.

5.8.7 Fases del montaje para medir la conductividad eléctrica de la escoria fundida: Para medir la conductividad eléctrica de la escoria, se usó el método Wenner de cuatro pines representado en la norma ASTM G57 (06)⁵⁷. El desarrollo de este método para esta investigación consiste en:

5.8.7.1 Fase 1: Preparación de las mezclas Escoria – Alúmina: Se tomaron 300 gramos por cada mezcla de escoria con su porcentaje de alúmina correspondiente.

⁵⁷ ASTM- Designation: G57 - 06 (Reapproved 2012), Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method

5.8.7.2 **Fase 2: Marcha del horno y calentamiento del crisol:** Se inicia a operar el horno a una potencia de 5 KW, se introduce el crisol de SiC sin carga dentro de la bobina del horno. La potencia del horno se va aumentando progresivamente hasta obtener una potencia máxima de trabajo que oscila entre los 27 a 29 KW y una inducción de voltaje de 0.69 KV, a estas condiciones el crisol se encuentra a una temperatura que oscila entre los 1000 a 1100°C. Se agrega la mezcla de escoria y alúmina precalentada.

Figura 38. Mezcla de Escoria de Ferroníquel Y Alúmina para fusión y Calentamiento del crisol SiC en la bobina de trabajo del Horno de Inducción.



Fuente: Autor.

5.8.7.3 **Fase 3: Fusión de la mezcla e inmersión de electrodos:** Una vez se inicia la fusión se hace seguimiento de temperatura con la termocupla tipo R. La temperatura de fusión registrada para cada muestra oscila entre los 1350 – 1600°C. El tiempo de fusión determinado estuvo en un rango de 30 a 120 minutos.

Figura 39. Termocupla tipo R e Inmersión de Electrodos de Grafito.



Fuente: Autor.

5.8.7.4 Fase 4. Calibración del equipo medidor de resistencia tipo Nilsson: Antes de iniciar cada medida es necesaria la calibración del equipo y del montaje de los electrodos puesto que, su manipulación, los cambios de temperatura, entre otros factores deterioran poco a poco sus funciones.

Dado lo anterior los ensayos y las medidas comienzan a perder confianza y credibilidad. La calibración del equipo y del montaje de electrodos se realiza de la siguiente manera: Se toma una resistencia convencional de 1000Ω , se coloca en la punta de cada electrodo cerrando así el circuito del sistema. Una vez puesta la resistencia en los electrodos los cuales están conectados al equipo por medio de cable niquelado, se toma la medida de resistencia registrada por el equipo, dicho valor debe ser equivalente al valor de la resistencia convencional (1000Ω) colocada en la punta de los electrodos. La calibración del equipo medidor de resistencia tipo Nilsson y del montaje de electrodos, nos proporciona la seguridad de que los valores registrados serán verídicos y correctos.

Figura 40. Calibración del equipo medidor de Resistencia tipo Nilsson



Fuente: Autor.

5.8.7.5 **Fase 5. Medición de la resistencia eléctrica:** Una vez la muestra se encuentra en estado líquido se retira lentamente la termocupla para evitar fractura por choque térmico y se sumergen los electrodos de grafito dentro del baño líquido a una profundidad determinada de 2,6 cm de inmersión y una distancia de separación equivalente a 1,5 cm para cada prueba. Cada electrodo se encuentra conectado mediante cable conductor de cobre hacia los terminales del medidor de resistencia de 4 pines tipo Nilsson y con ello se completa el circuito.

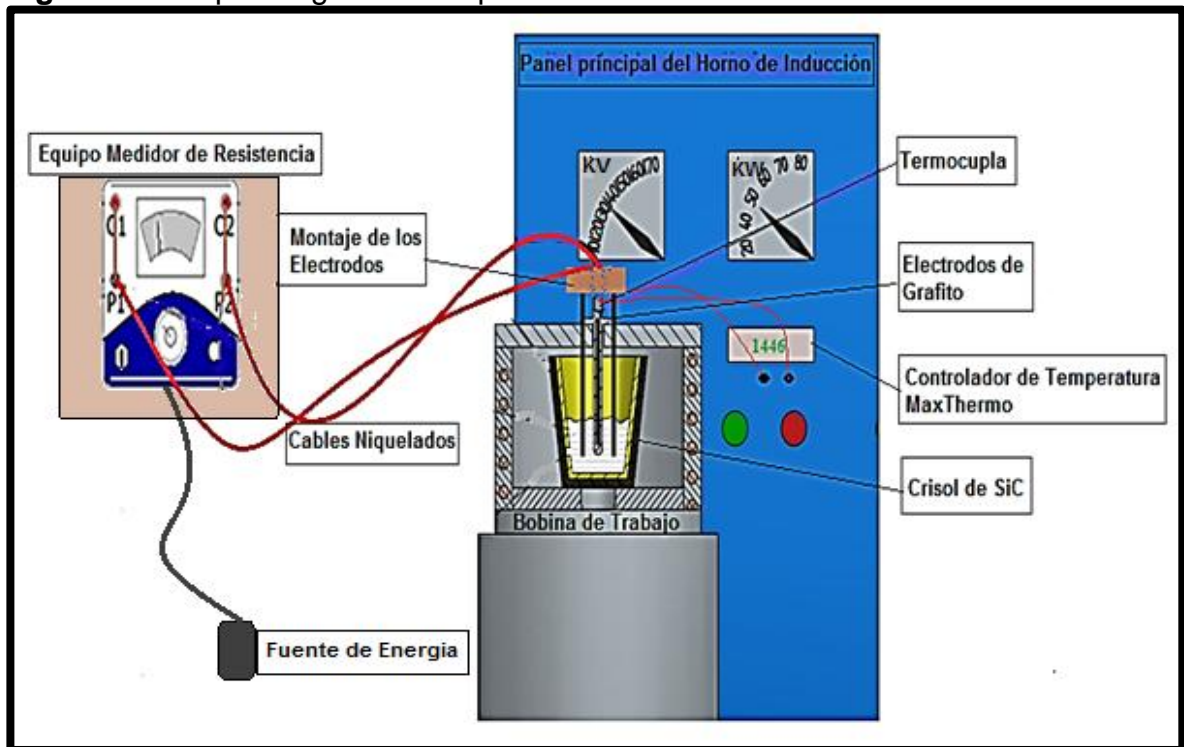
Figura 41. Medición de la Resistencia y Montaje de los Electrodo de Grafito.



Fuente: Autor.

Para reducir la posibilidad de contacto o resistencia del cable en la conexión sobre la superficie, esta conexión debe hacerse individualmente hacia el pin establecido en la superficie, es decir un electrodo para el terminal C1 y P1, y el otro electrodo para el terminal C2 y P2. El medidor envía una leve descarga eléctrica la cual es transmitida por uno de los electrodos hacia la escoria fundida, al momento de entrar en contacto la carga eléctrica con la escoria fundida esta se distribuye por el baño liquido llegando al otro electrodo, el medidor registra la resistencia eléctrica de la escoria. El registro de temperatura al momento de tomar las medidas de resistencia se hizo con ayuda de la pistola de temperatura serie DT-8869H.

Figura 42. Esquema general del proceso.



Fuente: Autor.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:

6.1.1 Análisis granulométrico de la escoria de Ferroníquel: Como se puede observar en la tabla N°5, el porcentaje retenido con mayor valor corresponde al tamiz número 10. Ahora observando la tabla N°2 de clasificación de los tamices podemos concluir que, en la muestra de escoria de ferroníquel utilizada en este proyecto predomina una granulometría media.

Tabla 5. Datos obtenidos por el Análisis Granulométrico de la Escoria.

No. Tamiz	Diámetro del Tamiz mm.	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
4	5	372.3	10.86	10.86	89,14
10	2	1383.6	40.37	51.23	48,77
30	0,59	1298.9	37.9	89.13	10,87
50	0,297	209.6	6.13	95.26	4,74
100	0,149	94	2.74	98	2
200	0,074	44.4	1.3	99.3	0,7
Fondo		24.1	0.7	100	0
Masa total		3426.9	100%		

Fuente: Autor.

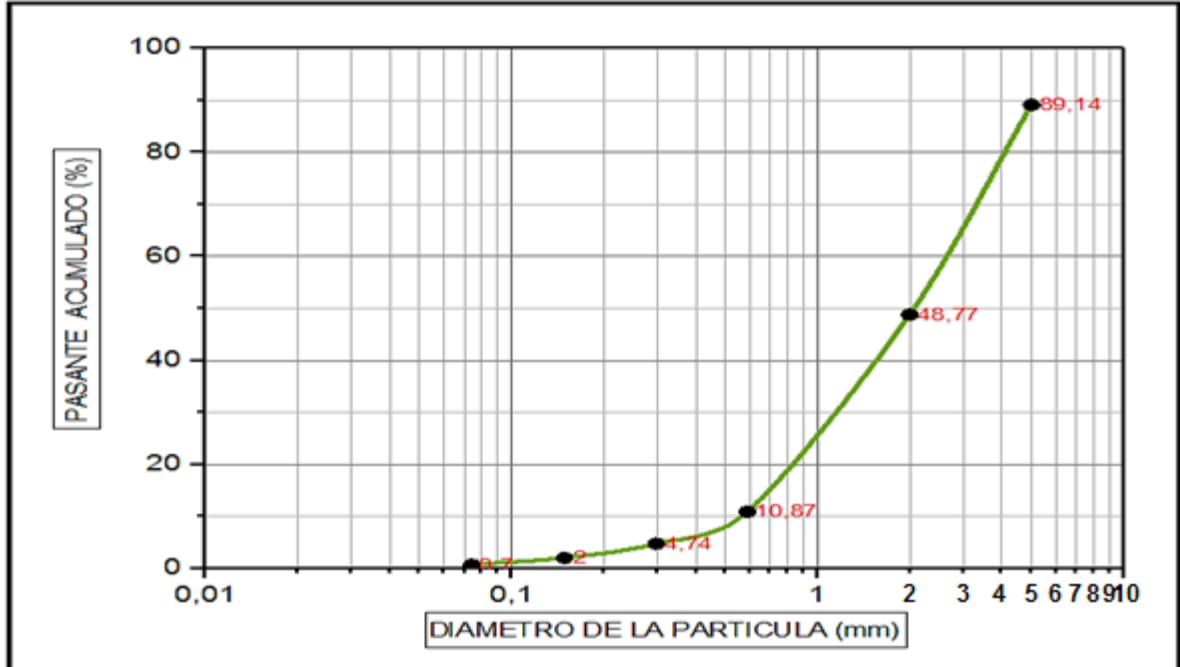
6.1.1.1 **Índice de grosor o de finura (i):** Reemplazando los datos en la ecuación 40 y el factor (α) de la tabla 1, obtenemos que:

$$i = 18,21.$$

Este número representa aproximadamente el número de mallas por pulgada lineal de sedazo a través del cual pasaría toda la muestra si los granos fueran del mismo tamaño. Esta es proporcional a la superficie total de los granos por medida de peso de la muestra. Usando la curva granulométrica aproximadamente se determina que:

- $D_{10} = 0,6\text{mm.}$
- $D_{30} = 1,03\text{mm.}$
- $D_{60} = 2,7\text{mm.}$

Gráfica 1. Curva Granulométrica de la Escoria.



Fuente: Autor.

- ✓ **Coefficiente de uniformidad en la muestra de escoria (Ecuación 41):**

$$Cu = \frac{2,7mm}{0,5mm} = 5,4$$

- ✓ **Coefficiente de curvatura en la muestra de escoria (Ecuación 42):**

$$Cc = \frac{(1,3mm)^2}{2,7mm \times 0,5mm} = 1,25$$

Se observa que el coeficiente de uniformidad de la muestra de escoria de ferróniquel es alto, lo que indica una granulometría relativamente homogénea.

6.1.2 Análisis granulométrico de la Alúmina pura: Como se puede observar en la tabla N°6, el porcentaje retenido con mayor valor corresponde al tamiz número 200. Ahora observando la tabla N°3, de clasificación de los tamices, podemos concluir que, en la muestra de alúmina utilizada en este proyecto predomina una granulometría fina.

Tabla 6. Datos obtenidos por el Análisis Granulométrico de la Alúmina.

No. Tamiz	Diámetro del Tamiz mm.	Peso Retenido g	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
100	0,149	527,6	36,22	36,22	63,78
200	0,074	664,5	45,62	81,84	18,16
fondo		264,6	18,16	100	0
Masa Total		1456,7	100%		

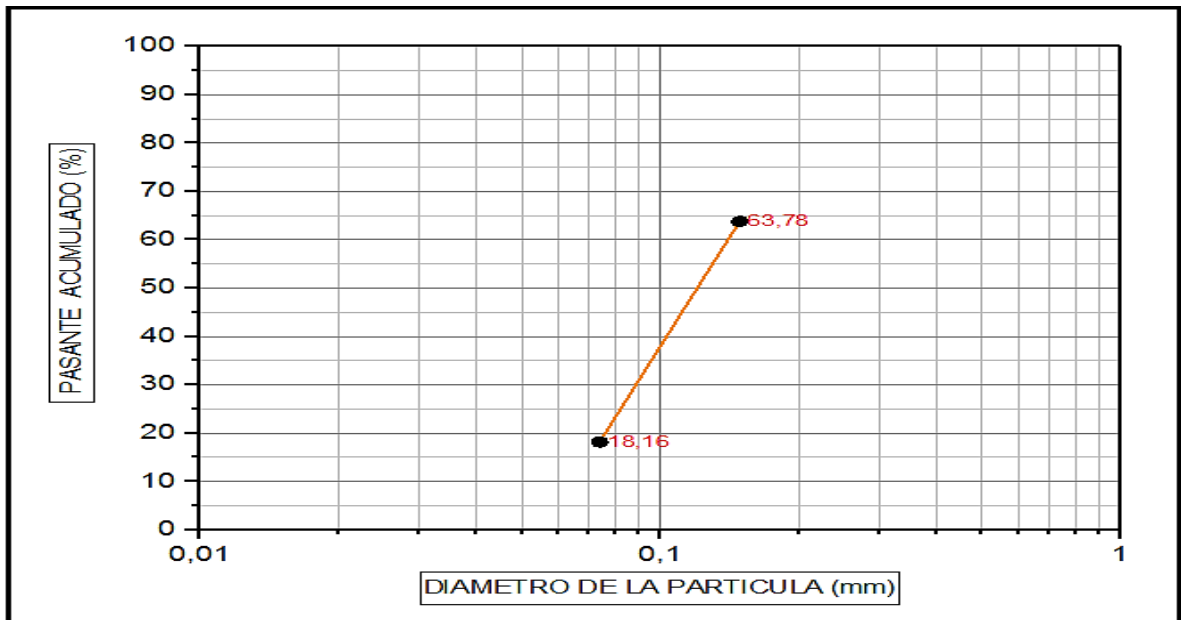
Fuente: Autor.

6.1.2.1 **Índice de grosor o de finura (i):** Reemplazando los datos en la ecuación 40 y el factor (α) de la tabla 1, obtenemos que:

$$i = 143,7$$

Este número representa aproximadamente, el número de mallas por pulgada lineal de sedazo a través del cual pasaría toda la muestra si los granos fueran del mismo tamaño. Esta es proporcional a la superficie total de los granos por medida de peso de la muestra.

Gráfica 2. Curva Granulométrica de la Alúmina.



Fuente: Autor.

Se puede observar que la muestra de alúmina no tiene coeficiente de uniformidad. Dado que el tamaño de grano es muy fino y se encuentra previamente homogenizado.

6.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA:

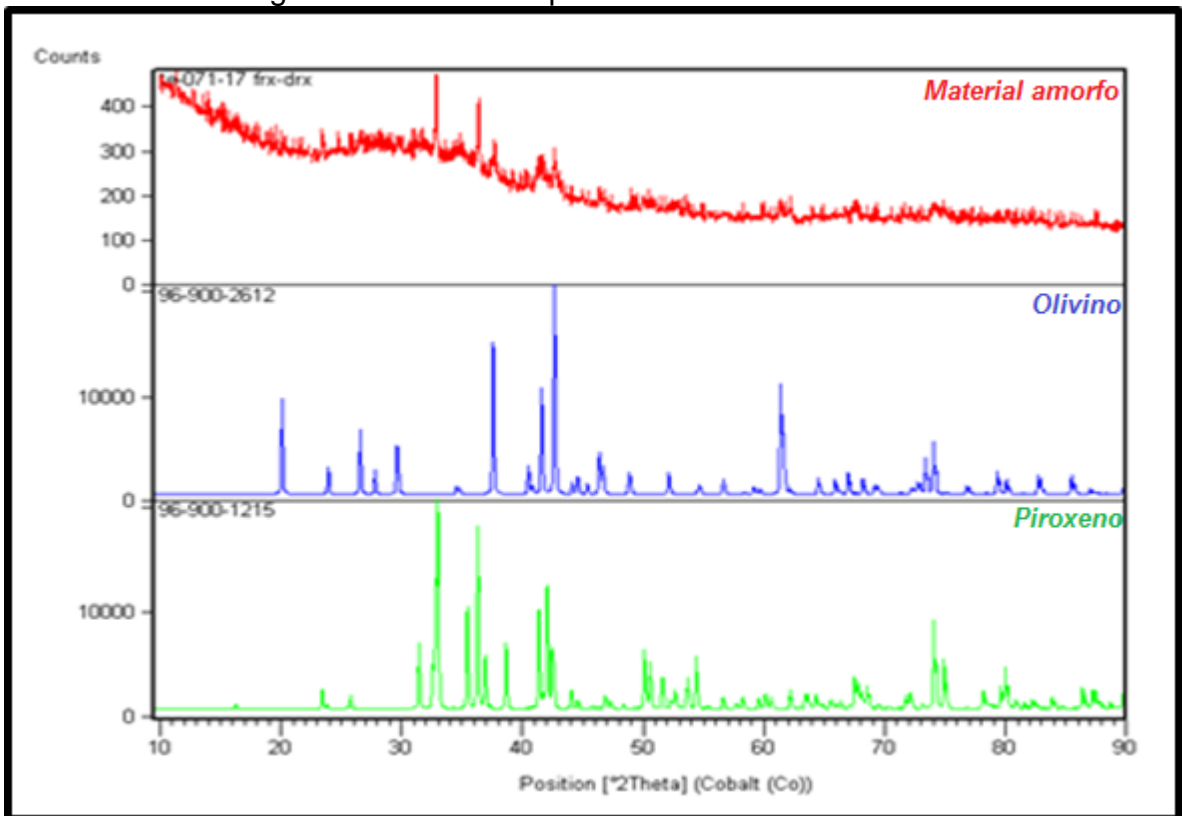
6.2.1 Análisis Difracción de Rayos X escoria de ferroníquel:

Tabla 7. Fases presentes en la Escoria DRX.

No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Color	Quality	Subfiles	Crystal System
1	<input type="checkbox"/>	96-900-2612	Olivine	Si _{4.00} O _{16.00} Ni _{4.00} Mg _{4.00}	16	0.267	Blue	=	User I...	Orthorhombic
2	<input type="checkbox"/>	96-900-1215	Pyroxene	Mg _{14.64} Fe _{1.36} Si _{16.00} O _{48.00}	16	0.683	Lime	=	User I...	Orthorhombic

Fuente: Autor.

Gráfica 3. Difractograma de las fases presentes en la Escoria.

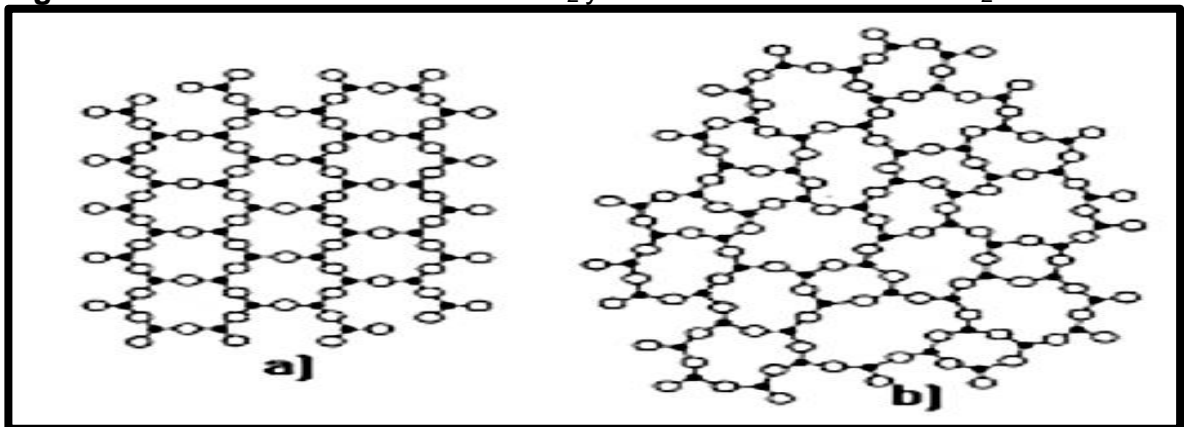


Fuente: Autor.

6.2.1.1 **Material amorfo:** En la gráfica 3 en el espectro de color rojo, se puede observar una curva difusa y poco pronunciada lo que indica la ausencia de planos cristalográficos. En un cristal cada átomo forma enlaces de equilibrio con sus átomos vecinos lo cual se manifiesta como un orden de largo alcance.

Por el contrario, en un sólido amorfo no hay orden de largo alcance, no obstante, normalmente sí hay un cierto orden de corto alcance; es decir, algunos átomos vecinos de un átomo cualquiera están en las posiciones que corresponderían a un cristal, lo que explica el por qué se logran observar 2 picos algo pronunciados en el espectro, pero al no ser perfecto el orden de corto alcance consecuentemente no presenta orden de largo alcance. Los materiales amorfos tienen una estructura interna en términos del grado de ordenamiento atómico similar a la de un líquido. Sin embargo, por tratarse de un sólido la viscosidad es muy alta y la movilidad atómica casi nula. Se puede deducir que el enfriamiento de la muestra de escoria se hizo de forma rápida o brusca por lo cual, los cristales no tuvieron el tiempo suficiente de formación y ordenamiento periódico creando así redes amorfas en el material. Otra consecuencia de la formación amorfa puede estar ligada a una baja pureza del material.

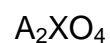
Figura 43. Estructura Cristalina del SiO₂ y Estructura Amorfa del SiO₂.



Fuente: Martin Reyes. Estructura de sólidos. Pdf.

En la figura 43 se puede observar el mismo compuesto pero con diferente estructura cristalina, siendo el SiO₂ cristalino en forma de cuarzo y amorfo en forma de vidrio.

6.2.1.2 **Olivino (Si₄O₁₆Ni₄Mg₄):** En la gráfica 3 en el espectro de color azul, se pueden observar picos bien pronunciados lo cual indica que se trata de un material cristalino presente en la muestra en este caso un olivino de níquel conocido como liebenbergita. Los minerales del grupo del olivino pertenecen a la clase de los silicatos en la que dentro de esta se encuentran clasificados como nesosilicatos, son ortosilicatos que cristalizan en el sistema ortorrómbico y tienen la siguiente fórmula general:



Ecuación 46.

Donde:

- A_2 = Puede ser Fe, Mg, Mn y Ni.
- Na^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} y Li^+ .

➤ **Propiedades físicas:**

- ✓ *Color:* La más común verde oliva.
- ✓ *Color de la raya:* Blanca.
- ✓ *Brillo:* Vítreo transparente o traslúcido.
- ✓ *Dureza:* 6,5 - 7 (duro), no se raya con punta de acero.
- ✓ *Densidad:* Semipesado ($4g/cm^3$)

Es uno de los primeros minerales que se forman al cristalizar un magma su composición química normalmente transita entre dos términos:

✓ **La forsterita (Mg_2SiO_4)** = Es una variedad rica en magnesio, aparecen en rocas ultra básicas, básicas y en lamproitas (peridotitas, gabros, basaltos, fortunitas, jumillitas, veritas, etc.).

✓ **La fayalita (Fe_2SiO_4)** = Esta variedad es rica en hierro, es más común en rocas carbonatadas metamórficas.

Pero hay muchas más variedades de minerales dentro del grupo de los olivinos tales como:

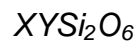
- Calcioolivino: Ca_2SiO_4 .
- Glaucocroíta: $CaMn_2SiO_4$
- Kirschsteinita: $CaFe_2SiO_4$
- Laihunita: $Fe^{2+}Fe^{3+}2(SiO_4)_{28}$
- Liebenbergita: $(Ni, Mg)_2SiO_4$
- Monticellita: $CaMgSiO_4$
- Knebelita: $(Fe, Mn) SiO_4$
- Tefroíta: $(Mn^{2+})_2SiO_4$

Figura 44. Xenolito de Peridotita tipo Iherzolita con cristales de Olivino incluidos.



Fuente: Colección del Área de Geología de la Universidad de Murcia. F. Guillén Mondéjar.

6.2.1.3 **Piroxeno ($Mg_{14,64}Fe_{1,36}Si_{16}O_{48}$):** En la gráfica 3 en el espectro de color verde, se pueden observar picos bien pronunciados lo cual indica que se trata de un material cristalino presente en la muestra en este caso un ortopiroxeno. Los minerales del grupo del piroxeno pertenecen a la clase de los silicatos en la que dentro de esta se encuentran clasificados como inosilicatos, son ortosilicatos que cristalizan en el sistema ortorrómbico o monoclinicos y tienen la siguiente fórmula general:



Ecuación 47.

Donde:

- X = Representa, Na^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} y Li^+ .
- Y = Representa, Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} y Ti^{4+} .

➤ **Propiedades físicas:**

- ✓ **Color:** Negro.
- ✓ **Color de la raya:** Blanca, verde o marrón claro.
- ✓ **Brillo:** Vidrioso o metálico.
- ✓ **Dureza:** 5 – 6,5 en la escala de dureza de Mohs.

Los minerales del piroxeno son comunes en meteoritos y las rocas ígneas extrusivas llamadas basalto. Existen diferentes tipos de piroxeno incluyendo a la augita, wolastonita, diopsida, enstatita e hiperstena. Todos estos tipos contienen Si_2O_6 , pero algunos contienen sodio(Na), mientras que otros contienen hierro (Fe), magnesio(Mg), o una combinación de estos tres elementos. Pero hay muchas más variedades de minerales dentro del grupo de los piroxenos tales como:

➤ **Piroxenos monoclinicos (clinopiroxenos):**

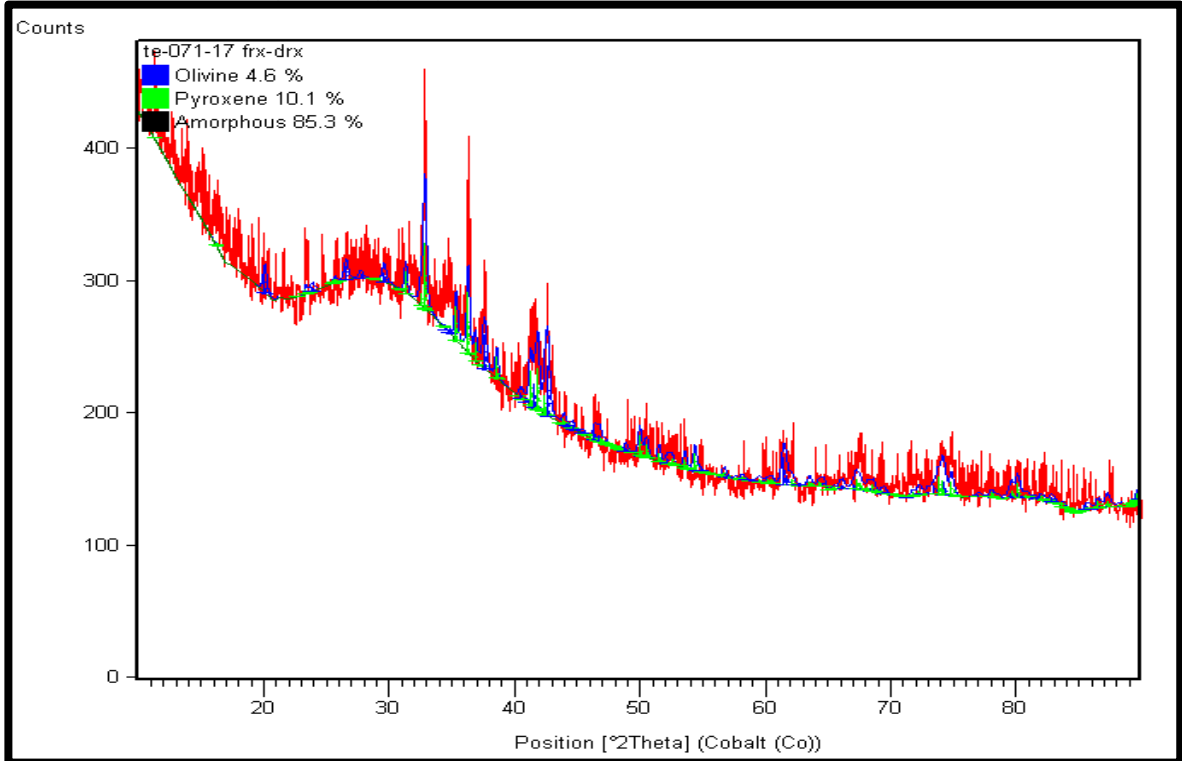
- Egirina = $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Augita = $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$.
- Clinoenstatita = MgSiO_3 .
- Clinoferrosilita = $\text{Fe}^{2+}\text{SiO}_3$.
- Diópsido = $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$.
- Esseneita = $\text{CaFe}^{3+}\text{AlSiO}_6$.
- Grossmanita = $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$.
- Hedenbergita = $\text{CaFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Jadeíta = $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$.
- Jervisita = $\text{NaScSi}_2\text{O}_6$.
- Johannsenita = $\text{CaMn}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Kosmoclora = $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$.
- Kushiroita = $\text{CaAl}(\text{AlSiO}_6)$.
- Namansilita = $\text{NaMn}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Natalyita = $\text{NaV}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Petedunnita = $\text{CaZnSi}_2\text{O}_6$.
- Pigeonita = $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca}) \text{SiO}_3$.
- Espodumena = $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$.

➤ **Piroxenos rómbicos (ortopiroxenos):**

- Donpeacorita = $\text{Mn}^{2+}\text{Mg}(\text{SiO}_3)_2$.
- Enstatita = MgSiO_3 .
- Ferrosilita = $(\text{Fe}^{2+})_2(\text{SiO}_3)_2$.
- Hiperstena = $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Broncita = $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$.

Se puede concluir que, dada las altas temperaturas a cuáles se encuentra la escoria sus compuestos pasan a un estado magmático formándose así prácticamente rocas ígneas ricas en hierro y en magnesio, lo explica la aparición de olivinos y piroxenos en la muestra de escoria. La primera fase en cristalizar es el piroxeno, ya que este se forma a temperaturas que oscilan entre los 1000 a 1300 °C. Posteriormente se da la formación de la fase del olivino en contacto con el SiO_2 .

Gráfica 4. Difractograma general de la muestra de Escoria.



Fuente: Autor

Tabla 8. Fases presentes en la Escoria.

Fases Mayores	Fases Intermedias	Fases Menores
<i>Amorfo</i> 85,3%	<i>Piroxeno.</i> $Mg_{14,64}Fe_{1,36}Si_{16}O_{48}$ 10,1%.	<i>Olivino.</i> $Si_4O_{16}Ni_4Mg_4$ 4,6%.

Fuente: Autor.

Se puede observar claramente en la gráfica 4, que en la muestra de escoria prevalece el material amorfo dada la forma de los picos en el espectro ya que se observan pequeños picos achatados lo que implican poca difracción dado por el material vítreo lo que corrobora el método de enfriamiento rápido al cual fue sometida. Aunque el 15% aproximadamente pertenece a material cristalino conformado por olivinos de níquel y ortopiroxenos de hierro y magnesio que alcanzaron a formar pequeñas redes cristalinas las cuales corresponden a los pocos picos pronunciados en el espectro.

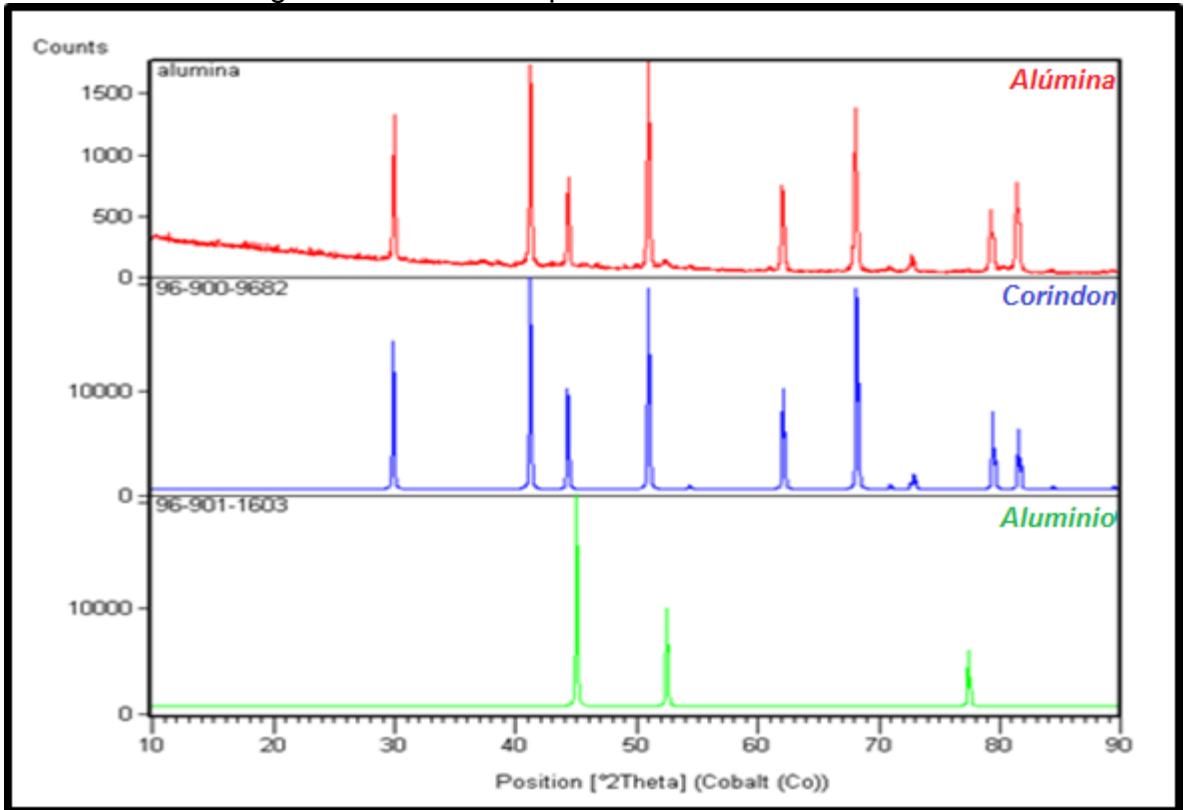
6.2.2 Análisis Difracción de Rayos X muestra de alúmina:

Tabla 9. Frases presentes en la Alúmina DRX.

No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Color	Quality	Subfiles	Crystal System
1	<input type="checkbox"/>	96-900-9682	Corundum	Al ₂ O ₃	78	0.600	Blue	=	User I...	Hexagonal
2	<input type="checkbox"/>	96-901-1603	Aluminum	Al	15	0.010	Gray	=	User I...	Cubic

Fuente: Autor.

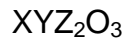
Gráfica 5. Difractograma de las fases presentes en la Alúmina.



Fuente: Autor.

6.2.2.1 **Alúmina (Al₂O₃):** En la gráfica 5 en el espectro de color rojo, se puede apreciar claramente los picos correspondientes al material cristalino de la muestra siendo está totalmente cristalina sin rastros de material amorfo.

6.2.2.2 **Corindón (Al₁₂O₁₈):** Se observa un espectro detallado con picos muy pronunciados lo que indica un material 100% cristalino en este caso corindón. Los minerales del grupo del corindón pertenecen al grupo IV (óxidos) según la clasificación de Strunz y forman parte de las hematites. Se encuentra en la naturaleza bajo la forma de cristales, cristaliza en el sistema trigonal formando cristales hexagonales prismáticos, tabulares, bipiramidales o toneliformes y tienen la siguiente fórmula general:



Ecuación 48 .

Donde:

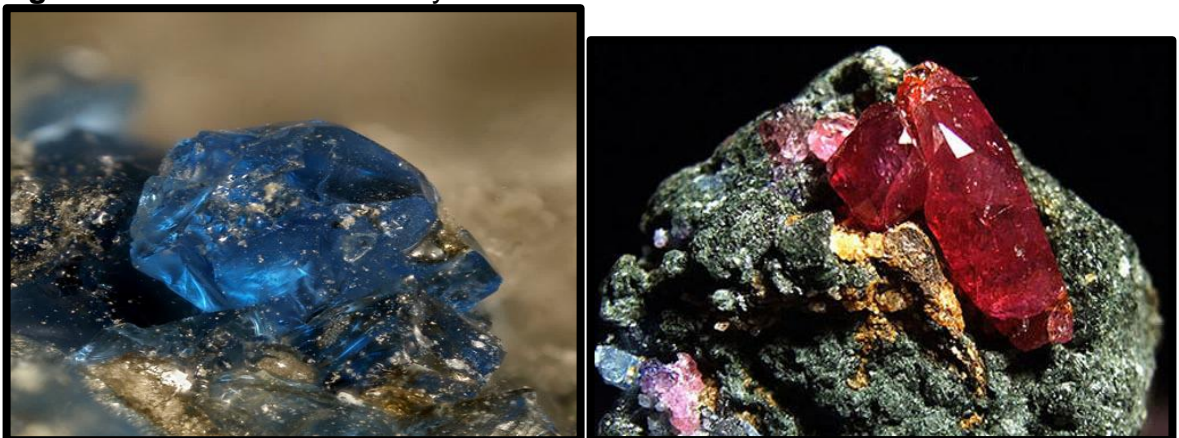
- X = Representa, Al³⁺ (Alúmina).
- Y = Representa, Cr³⁺ (Rubí).
- Z = Representa, Fe²⁺, Ti⁴⁺ (Zafiro).

➤ **Propiedades físicas:**

- ✓ *Color* = Muy variado desde el rojo oscuro del Rubí hasta azul del Zafiro.
- ✓ *Brillo* = De adamantino a vítreo.
- ✓ *Dureza* = 9 en la escala de dureza de Mohs.
- ✓ *Densidad* = 3.98 a 4.10 g/cm³

El corindón es un mineral relativamente escaso que aparece en rocas aluminosas generalmente de tipo metamórfico tales como, mármoles, esquistos, micáceos y gneises. En ocasiones también puede estar relacionado con rocas ígneas ácidas o intermedias tales como, granitos o sienitas. Los ejemplares con valor gemológico son mucho más raros especialmente el rubí, pues requiere para su formación la presencia de cromo.

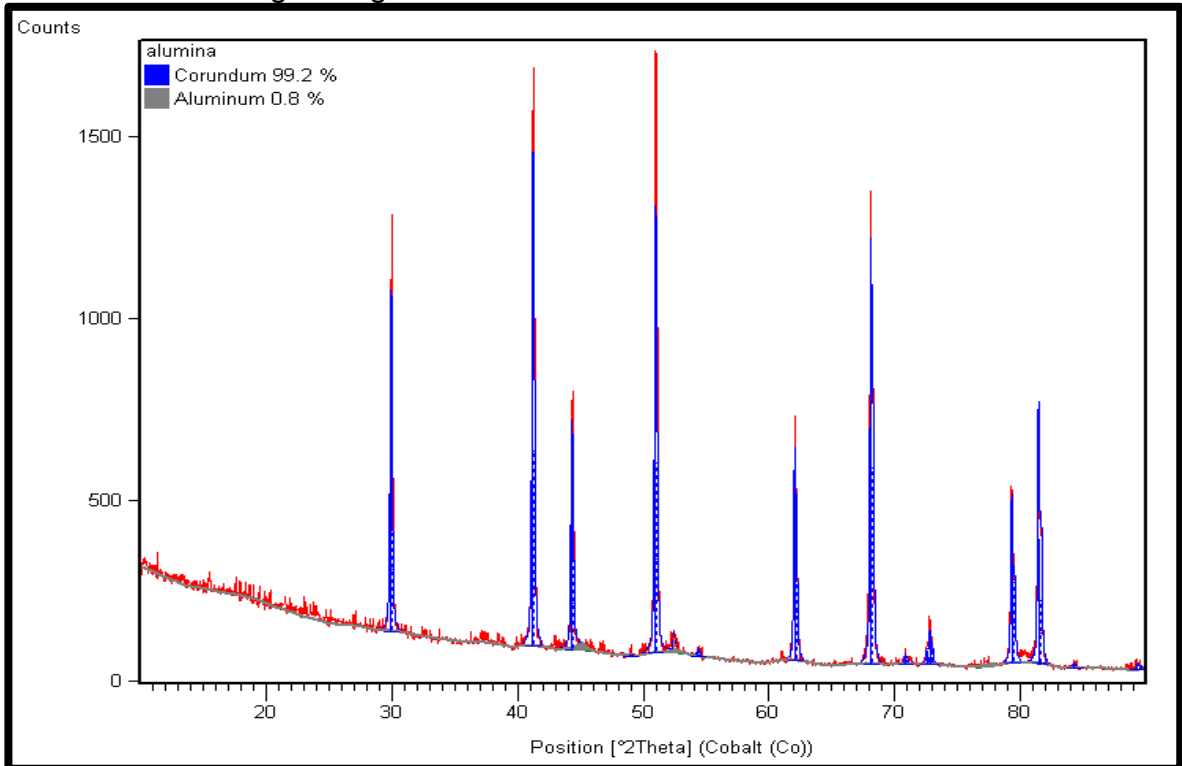
Figura 45. Variedades azules y rosas del Corindón.



Fuente: Geofrik Corindón.

6.2.2.3 **Aluminio (Al₄)**: En la gráfica 5, se puede observar el espectro verde correspondiente al aluminio en este se pueden apreciar claramente los picos de difracción dado que este es un material cristalino.

Gráfica 6. Difractograma general de la muestra de Alúmina.



Fuente: Autor

Tabla 10. Fases presentes en la Alúmina.

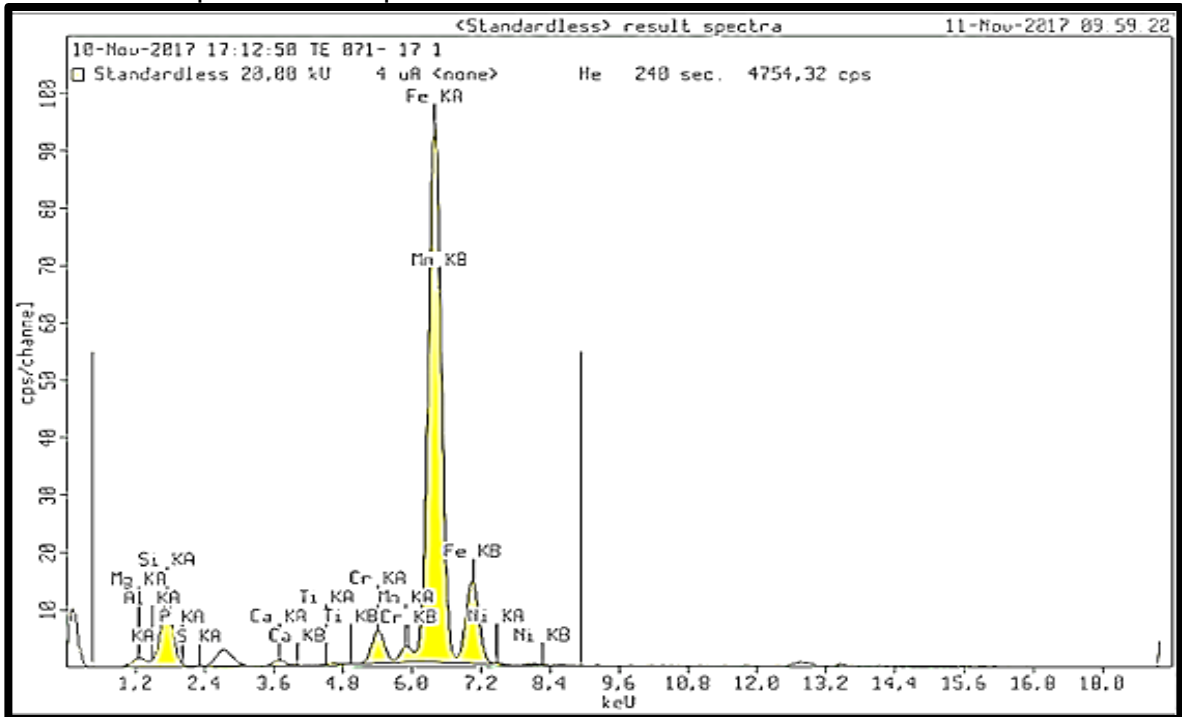
Fases Mayores	Fases Menores
Corindon Al ₁₂ O ₁₈ 99,2%	Aluminio. Al ₄ 0,8%.

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta que la alúmina utilizada en este proyecto es pura, se observa claramente en la gráfica 6, un espectro homogéneo de cada fase en todos sus picos. La mayor fase presente corresponde a alúmina con tan solo un pequeño porcentaje casi despreciable de aluminio, el cual no interviene o afecta las propiedades mecánicas del material.

6.2.3 Análisis Fluorescencia de Rayos X, de la muestra de escoria de ferróníquel:

Gráfica 7. Espectro correspondiente al análisis de la Escoria.



Fuente: Autor.

En el espectro dado por la escoria de ferróníquel (gráfica 7), se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los siguientes elementos: Mg, Al, Si, P, S, Ca, Ti, Cr, Mn, Ni y Fe; el área bajo los picos representa el número de fotones fluorescentes que llegaron al detector. Podremos encontrar óxidos básicos también conocidos como óxidos metálicos ya que son aquellos que combinan el oxígeno con un metal, dado que el oxígeno es muy electronegativo y los metales son electropositivos se establece un enlace iónico entre ellos. Y óxidos ácidos también llamados óxidos no metálicos o anhídridos los cuales se forman entre un no metal con el oxígeno, dado que la diferencia de electronegatividad entre estos elementos es baja se establece un enlace covalente entre ellos.

Tabla 11. Composición elemental de la Escoria FRX.

Compound	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Conc	11,4	2,27	21	0,013	0,18	2,3	0,03	1	0,5	21	0,11
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Fuente: Autor.

Tabla 12. Composición química de la muestra de Escoria FRX.

Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO
Conc	19	4,3	45	0,03	0,18	3,22	0,04	1,46	0,6	27	0,14
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Fuente: Autor.

Tabla 13. Compuestos encontrados en la muestra de Escoria.

ÓXIDOS ÁCIDOS	FORMULA QUÍMICA
Compuesto que resulta de la combinación de un elemento no metálico con el oxígeno.	
Óxido de Silicio (<i>Sílice</i>).	$Si + O_2 \longrightarrow SiO_2$
Pentóxido de fósforo.	$4P + 5O_2 \longrightarrow 2P_2O_5$
Sulfuro de calcio.	$2CaO + S_2 \longrightarrow 2CaS + O_2$
ÓXIDOS BÁSICOS	FORMULA QUÍMICA
Compuesto que resulta de la combinación de un elemento metálico con el oxígeno.	
Óxido de Magnesio (<i>Magnesia</i>).	$2Mg + O_2 \longrightarrow 2MgO$
Óxido de Calcio (<i>Cal</i>).	$2Ca + O_2 \longrightarrow 2CaO$
Óxido de Titanio.	$Ti + O_2 \longrightarrow TiO_2$
Óxido de Cromo 3 (<i>Cromita</i>).	$4Cr + 3O_2 \longrightarrow 2Cr_2O_3$
Óxido de Manganeso (<i>Pirolusita</i>).	$2Mn + O_2 \longrightarrow 2MnO$
Óxido ferroso (<i>Wustita</i>).	$2Fe + O_2 \longrightarrow 2FeO$
Óxido de Níquel (<i>Bunsenita</i>).	$2Ni + O_2 \longrightarrow NiO$
ÓXIDOS ANFÓTEROS	FORMULA QUÍMICA
En la presencia de un ácido se comportan como óxidos básicos y en la presencia de una base, como óxidos ácidos.	
Óxido de Aluminio (<i>Alúmina</i>).	$4Al + 3O_2 \longrightarrow 2Al_2O_3$

Fuente: Autor.

El SiO₂ se da, por la oxidación del acero este actúa como un ácido aumentando como tal la acidez del baño, para neutralizar esta acidez es necesario agregar CaO, la cual constituye el volumen de óxidos básicos; su presencia juega un papel crucial en la interacción de reacciones promoviendo la actividad de conexión entre compuestos. Dada la oxidación del fósforo en el baño metálico, se presenta como óxido en la escoria, al igual que el uso de cal como desulfurante ocasiona la formación de sulfuros de calcio, los cuales directamente pasan a formar parte de la escoria. También se encuentra presente en la composición de la escoria, NiO, lo que indica que una cantidad de Ni no se redujo en el proceso lo que constituye pérdidas en producción. El muy alto contenido de óxidos de hierro indica el potencial de esta escoria para desarrollar fases magnéticas en el procesamiento apropiado. Aunque se aprecia que se pierde una cantidad considerable de hierro, por lo que es recomendado recuperarlo una vez la escoria solidifica mediante métodos de separación magnética. Otro óxido básico que podemos encontrar en la escoria es MgO, su origen está ligado al adicionamiento de cal dolomítica (CaCO₃.MgCO₃), como desulfurante. La adición de aluminio para desoxidar causa la formación de alúmina (Al₂O₃). La formación del óxido de cromo, es dada por el cromo que se encuentra en la composición inicial del mineral laterítico de níquel por consiguiente en la fase de reducción el cromo siendo muy a fin con el oxígeno reacciono formando óxido de cromo que paso a la escoria. Se puede apreciar que los óxidos en mayor proporción corresponden al SiO₂, MgO y FeO.

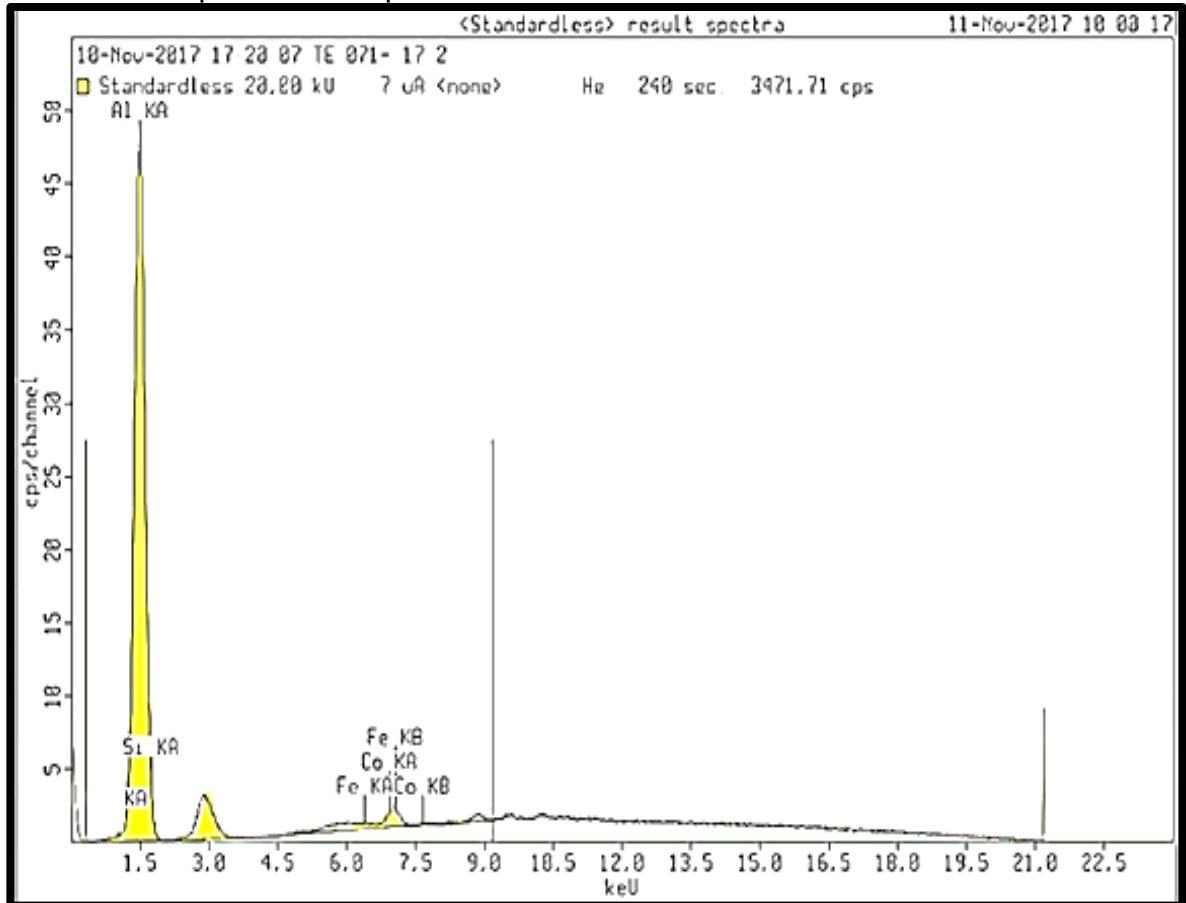
Tabla 14. Composición química promedio (%) de las Escorias generadas por las principales plantas productoras de Ferroníquel en el mundo.

Plantas productoras de Ferroníquel	País	Compuestos Óxidos (%)						
		NiO	CoO	FeO	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃
Pacific Metals Co., Ltd	Japón	0,07	0,02	11,6	32,6	49,6	X	1,6
Nippon Yakin Co., Ltd	Japón	0,22	X	7,17	25,6	25,6	5,4	1,23
Hyuga Smelting Co., Ltd	Japón	0,07	0,002	10,9	31,1	50,9	0,52	X
Aneka Tambang Tbk	Indonesia	0,07	0,01	4,5	32,7	56,7	7,51	2,05
ERAMET	Nueva Caledonia	0,14	0,02	5,74	31,4	55,8	X	0,9
LARCO GMMSA	Grecia	0,15	0,02	32,7	3,1	36,8	X	7,9
Minera Loma de Níquel, C.A	Venezuela	0,11	0,02	11,8	36,6	45,3	0,55	2,1
Cerro Matoso S.A	Colombia	0,25	0,02	14,7	20	55,5	X	2,3
Moa	Cuba	0,14	0,015	7,6	35,03	44,28	2,85	3,7
Falconbridge Dominicana S. A	República Dominicana	0,14	0,01	13,9	29,3	43,4	X	2,6

Fuente: Autor.

6.2.4 Análisis Fluorescencia de Rayos X, de la muestra de alúmina:

Gráfica 8. Espectro correspondiente al análisis de la Alúmina.



Fuente: Autor.

En el espectro dado por la alúmina (gráfica 8), se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los siguientes elementos: Co, Al, Si y Fe; el área bajo los picos representa el número de fotones fluorescentes que llegaron al detector. Se puede observar un pico muy grande correspondiente al aluminio lo que indica claramente que predomina este elemento en toda la muestra.

Tabla 15. Composición elemental y química de la muestra de Alúmina FRX.

Compound	Co	Al	Si	Fe
Conc	0,07	52,46	0,3	0,05
Unit	%	%	%	%

Compound	CoO	Al ₂ O ₃	Si ₂ O	FeO
Conc	0,13	99,1	0,7	0,064
Unit	%	%	%	%

Fuente: Autor.

Tabla 16. Compuestos encontrados en la muestra de Alúmina.

ÓXIDOS ÁCIDOS Compuesto que resulta de la combinación de un elemento No metálico con el oxígeno.	FORMULA QUÍMICA
Óxido de Silicio (<i>Sílice</i>).	$\text{Si} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2$
ÓXIDOS BÁSICO Compuesto que resulta de la combinación de un elemento metálico con el oxígeno.	FORMULA QUÍMICA
Óxido ferroso (<i>Wustita</i>).	$2\text{Fe} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{FeO}$
Óxido de Cobalto.	$2\text{Co} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CoO}$
ÓXIDOS ANFÓTEROS En la presencia de un ácido se comportan como óxidos básicos y en la presencia de una base, como óxidos ácidos	FORMULA QUÍMICA
Óxido de Aluminio (<i>Alúmina</i>).	$4\text{Al} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$

Fuente Autor.

Teniendo en cuenta que la muestra de alúmina es pura, se logra observar en la tabla 15, un claro predominio de Al_2O_3 , se ven pequeñas cantidades de otros óxidos los cuales son impurezas en la muestra las cuales no influyen en las propiedades mecánicas de la alúmina, dado su bajo contenido. La composición química de la escoria obtenida después de la fusión de cada mezcla con su respectivo porcentaje en peso de alúmina se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Composición química de la Escoria obtenida después de la fusión de cada mezcla con su respectivo porcentaje agregado en peso de Alúmina.

Mezcla 2 : 5% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	18,05	9,04	42,79	0,03	0,17	3,06	0,04	1,39	0,57	25,68	0,13	0,01
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mezcla 3 : 10% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	17,1	13,78	40,57	0,03	0,16	2,9	0,04	1,31	0,54	24,36	0,13	0,01
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mezcla 4 : 20% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	15,2	23,26	36,14	0,02	0,14	2,58	0,03	1,17	0,48	21,73	0,11	0,03
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mezcla 5 : 30% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	13,3	32,74	31,71	0,02	0,13	2,25	0,03	1,02	0,42	19,09	0,1	0,04
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mezcla 6 : 40% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	11,40	42,22	27,28	0,02	0,11	1,93	0,02	0,88	0,36	16,46	0,08	0,05
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mezcla 7 : 50% Al ₂ O ₃	Compound	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CoO
	Conc	9,5	51,7	22,85	0,02	0,09	1,61	0,02	0,73	0,3	13,82	0,07	0,07
	Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Fuente: Autor.

En la tabla 17, se puede observar un aumento progresivo de Al₂O₃ en la composición química de cada escoria, iniciando con 9,04% (mezcla 1) y finalizando en 51,7% (mezcla 6), esto dado por la adición de alúmina en cada mezcla. Claramente se ve el predominio de la alúmina sobre los demás óxidos después de la mezcla 4, lo que indica un cambio radical de las propiedades de tal escoria. La aparición de CoO en la composición química de cada escoria es causa de la misma adición de alúmina ya que esta registró la presencia de este óxido en su composición química (tabla 15).

Al aumentar el porcentaje en peso de alúmina para cada mezcla se disminuye por ende el contenido de escoria en la misma (Tabla 4), motivo por el cual se puede apreciar la disminución progresiva de los demás óxidos dentro de la composición química de la escoria en cada mezcla.

6.3 FUSIÓN:

6.3.1 Curva de calentamiento Concrax 1700: En la figura 46, se puede observar que al iniciar el calentamiento el material refractario posee un color gris oscuro dado el alto contenido de humedad la cual es causa de la misma preparación de la mezcla refractaria de Concrax 1700. Al momento de finalizar el calentamiento se observa el cambio de color del refractario adquiriendo este un color blanco, lo que indica la pérdida de humedad tanto física como molecular dada las altas temperaturas a las que fue sometido. No se observa ninguna clase de daño o erosión en el refractario lo que indica su óptimo desempeño a temperaturas elevadas.

Figura 46. Inicio del Calentamiento y Fin del Calentamiento.

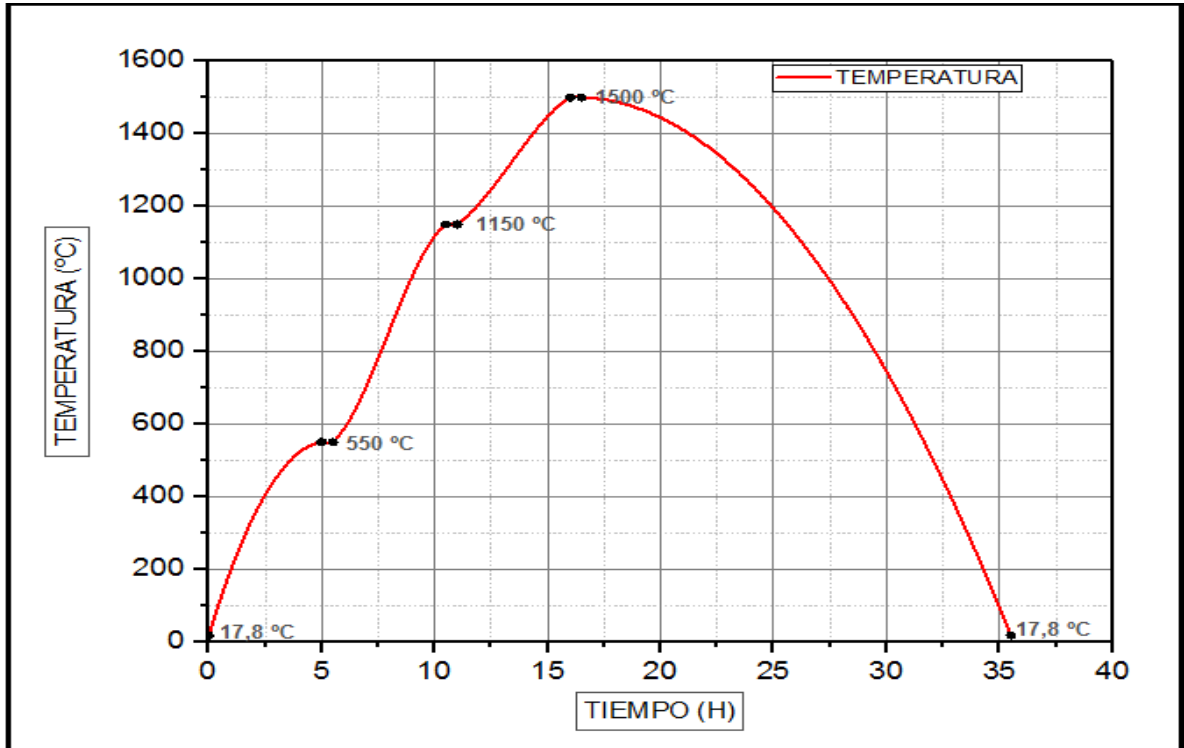


Fuente: Autor.

Una vez finalizada la operación se obtuvo la siguiente curva de calentamiento la cual nos indica la temperatura máxima a la cual fue sometido el material contra su respectivo tiempo de permanencia.

Cuando el material llega a la primera fase de calentamiento (550°C), éste pierde toda la humedad física adquirida en el momento de su preparación y permanece a esa temperatura durante 30 minutos. Posteriormente alcanza una temperatura elevada de 1150°C donde ya el material se encuentra totalmente libre de humedad, luego alcanza la temperatura máxima del ensayo 1500°C , temperatura a la cual será sometido en las pruebas de fusión. el objetivo principal es observar si el material sufre daños como, grietas, erosiones y desprendimiento. Dada las propiedades del material se observa que éste soporta temperaturas superiores a los 1500°C sin sufrir cambios en sus propiedades mecánica y físicas, por lo cual se hace óptimo para el desarrollo de la investigación.

Gráfica 9. Curva de Calentamiento del material refractario Concrax 1700.



Fuente: Autor.

6.3.2 Temperatura de Liquidus: Según Smith (Smith, 2006), los metales puros funden a un determinado valor de temperatura, en tanto que los metales impuros o aleaciones, lo hacen en un intervalo de temperatura que se inicia con un valor de temperatura denominado “temperatura de Solidus” (T_{Sol}) y termina en un valor de temperatura denominado “temperatura de Liquidus” (T_{Liq}). Por encima de la temperatura de Liquidus, la aleación estará completamente líquida, por debajo de la temperatura de Solidus, la aleación estará completamente sólida y en el intervalo definido por estas dos temperaturas habrá una mezcla de sólido y líquido. Otra definición señala que la T_{Liq} es la máxima temperatura a la que los cristales en contacto con el líquido fundido son termodinámicamente estables.

Para el control y la medición de la temperatura de Liquidus se usó una termocupla tipo R, conectada a un controlador de temperatura MaxThermo MC-2938.

Para determinar la temperatura de Liquidus en cada muestra de escoria se registró la temperatura en intervalos de 20 segundos, desde el momento en que se adiciona la escoria al crisol precalentado hasta la temperatura de Liquidus de la misma.

Tabla 18. Datos registrados de la Temperatura de Liquidus en la fusión de cada mezcla de Escoria con su respectivo porcentaje de Alúmina en peso.

MEZCLA	ALÚMINA	ESCORIA	TEMPERATURA DE LIQUIDUS °C.	TIEMPO DE FUSIÓN H.
Nº 1 (300g)	0 % - 0 g	100 % - 300 g	1445 °C	0,7 Horas
Nº 2 (300g)	5 % - 15 g	95 % - 285 g	1407 °C	0,58 Horas
Nº 3 (300g)	10 % - 30 g	90 % - 270 g	1375 °C	0,47 Horas
Nº 4 (300g)	20 % - 60 g	80 % - 240 g	1398 °C	0,62 Horas
Nº 5 (300g)	30 % - 90 g	70 % - 210 g	1474 °C	1 Horas
Nº 6 (300g)	40 % - 120 g	60 % - 180 g	1550 °C	1,35 Horas
Nº 7 (300g)	50 % - 150 g	50 % - 150 g	1613 °C	1,8 Horas

Fuente: Autor.

Con base en la composición química de cada mezcla de escoria presentada en la tabla 17, se determinó la Temperatura de Liquidus correspondiente a cada mezcla haciendo uso del software SlagAn3.

Tabla 19. Comparación de los datos de Temperatura de Liquidus calculados experimentalmente, frente a los datos medidos por el Software SlagAn3.

MEZCLA	% DE ALÚMINA	TEMPERATURA DE LIQUIDUS	
		Datos Experimentales	Datos software SlagAn3
Nº 1	0 %	1445 °C	Liquidus Temp. °C 1495
Nº 2	5 %	1407 °C	Liquidus Temp. °C 1449
Nº 3	10 %	1375 °C	Liquidus Temp. °C 1410
Nº 4	20 %	1398 °C	Liquidus Temp. °C 1451
Nº 5	30 %	1474 °C	Liquidus Temp. °C 1556
Nº 6	40 %	1550 °C	Liquidus Temp. °C 1619
Nº 7	50 %	1613 °C	Liquidus Temp. °C 1640

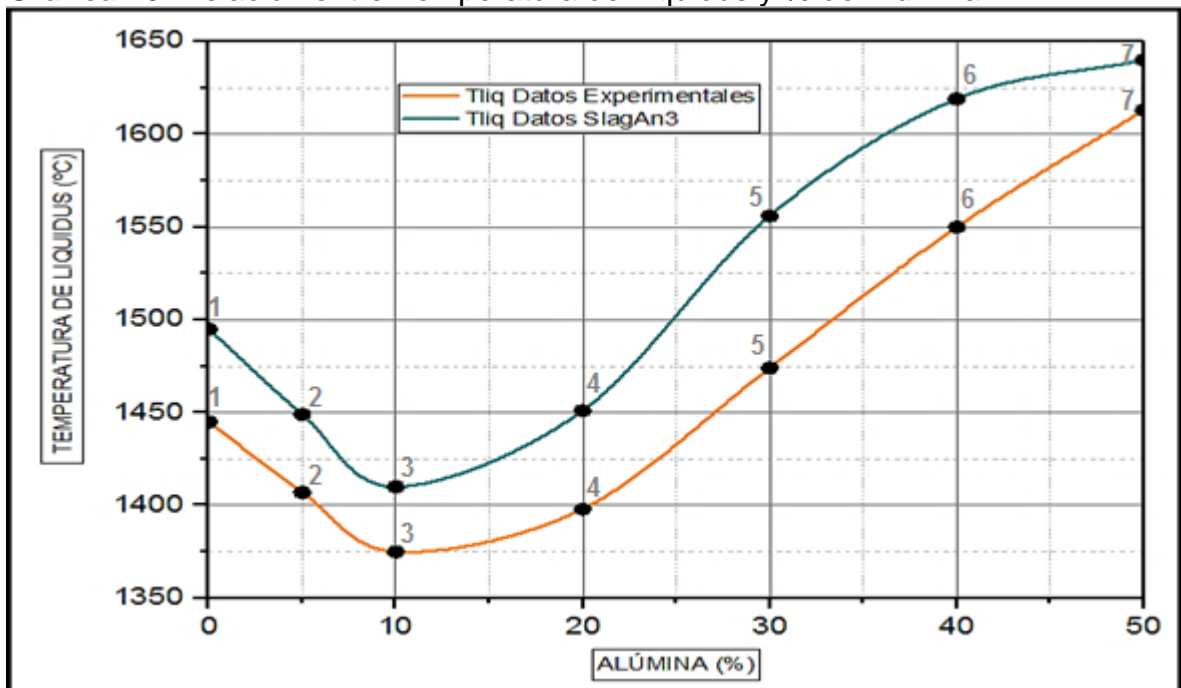
Fuente: Autor.

En la tabla 19 se pueden apreciar claramente los datos de Temperatura de Liquidus de cada mezcla de escoria con su respectivo porcentaje en peso de alúmina calculados experimentalmente mediante el uso de la termocupla tipo R y los datos estimados con el software SlagAn3.

Se aprecia una diferencia de temperaturas, siendo más bajas las temperaturas registradas experimentalmente en comparación con las dadas por el software SlagAn3; esto dado a que el software ofrece una simulación directa de la

temperatura basada en la composición química de la escoria, cabe aclarar que en este software no se pueden incluir elementos traza e impurezas, que normalmente se encuentran dentro de la composición química de la escoria, así mismo omite factores externos de presión, temperatura entre otros, los cuales influyen directamente en un proceso real. Dicho lo anterior, se explica el por qué se da una diferencia entre la temperatura registrada experimentalmente y la registrada por el SlagAn3.

Gráfica 10. Relación entre Temperatura de Liquidus y % de Alúmina.



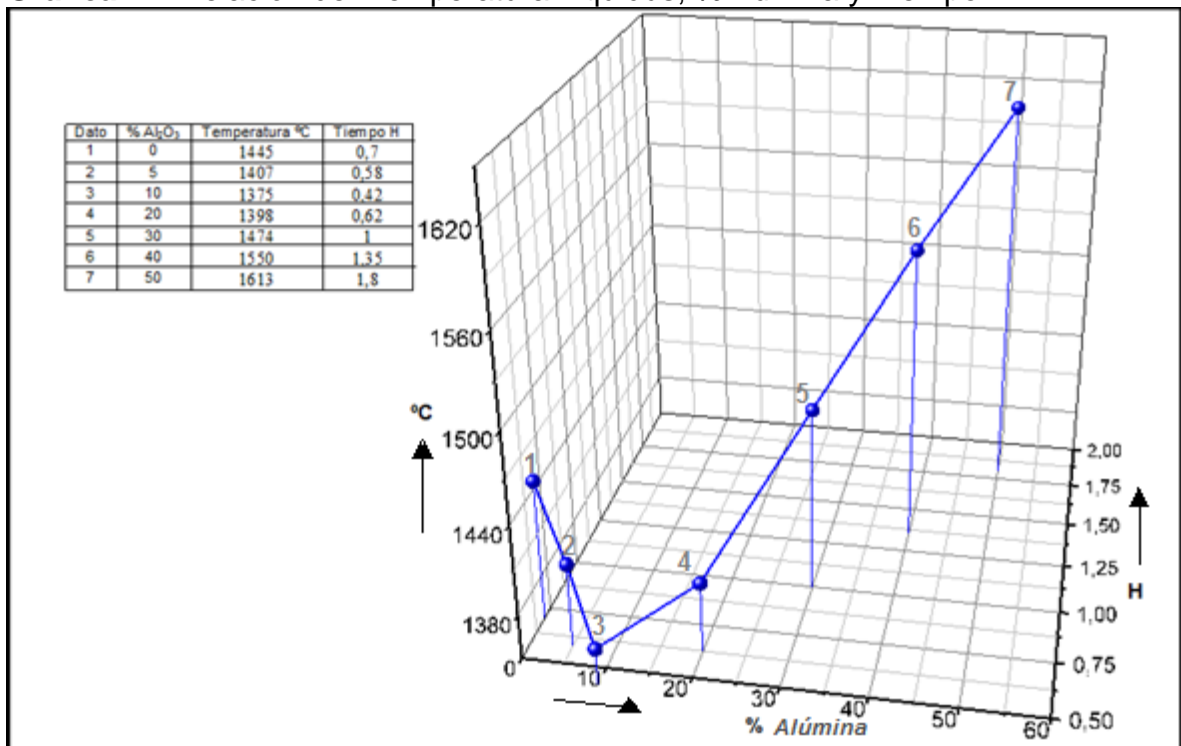
Fuente: Autor.

En la gráfica 10 se puede apreciar el comportamiento de la T_{Liq} medida por el software SlagAn3 y la calculada experimentalmente usando la termocupla tipo R conectada al medidor de temperatura MaxThermo; cabe aclarar que ambas líneas no son iguales dado que en el método experimental se mide la temperatura en condiciones reales de trabajo en la cual influyen parámetros tales como; presión, temperatura ambiente, rata de calentamiento entre otros, los cuales el simulador SlagAn3 no tiene en cuenta. Dada la misma tendencia de las curvas se puede concluir que los datos registrados experimentalmente son verídicos y garantizan un análisis preciso de los resultados. Desde el 0% de alúmina que pertenece a la muestra inicial de escoria (mezcla 1), la cual dada su composición química (tabla 12) contiene 4,3% de Al_2O_3 y corresponde a una escoria silicatada dado que predominan los silicatos de SiO_2 y MgO , hasta el 10% de alúmina adicionada que equivale a un 13,78% de Al_2O_3 (tabla 17) en la composición final de la escoria, se

ve una disminución notable en la T_{Liq} comportamiento propio que se puede esperar de una escoria del proceso de producción de ferroníquel. Por lo tanto, en el proceso de fusión de mineral laterítico de níquel en Horno Eléctrico de Arco para la producción ferroníquel, el aumento de alúmina dentro de la composición química de la escoria conlleva a una disminución notoria de la Temperatura de Liquidus.

A medida que se sigue incrementando el contenido de alúmina pasamos de tener una escoria típica del proceso de producción de ferroníquel a una escoria con contenidos inusuales de alúmina lo cual nos permite observar el comportamiento de la temperatura más allá de los porcentajes de alúmina tradicionales logrando con ello un amplio análisis del efecto de la alúmina sobre la T_{Liq} . Desde el 20% de alúmina (mezcla 3) con 23,26% Al_2O_3 en su composición química (tabla 17) hasta el 50% (mezcla 7) con 51,7 % de Al_2O_3 en su composición química final, se observa un aumento drástico de la T_{Liq} , por lo tanto, se asume teóricamente la formación parcial de una matriz de alúmina que inicia a predominar sobre los silicatos de la escoria, otorgando a esta una temperatura elevada de fusión propiedad neta de la misma alúmina dado que el punto de fusión de esta es 2072 °C. Por ende, las escorias con porcentajes muy elevados de alúmina (>14% aproximadamente) conllevarían a mayores gastos en el proceso de producción dado que aumentan el consumo de energía e incrementan el tiempo de fusión.

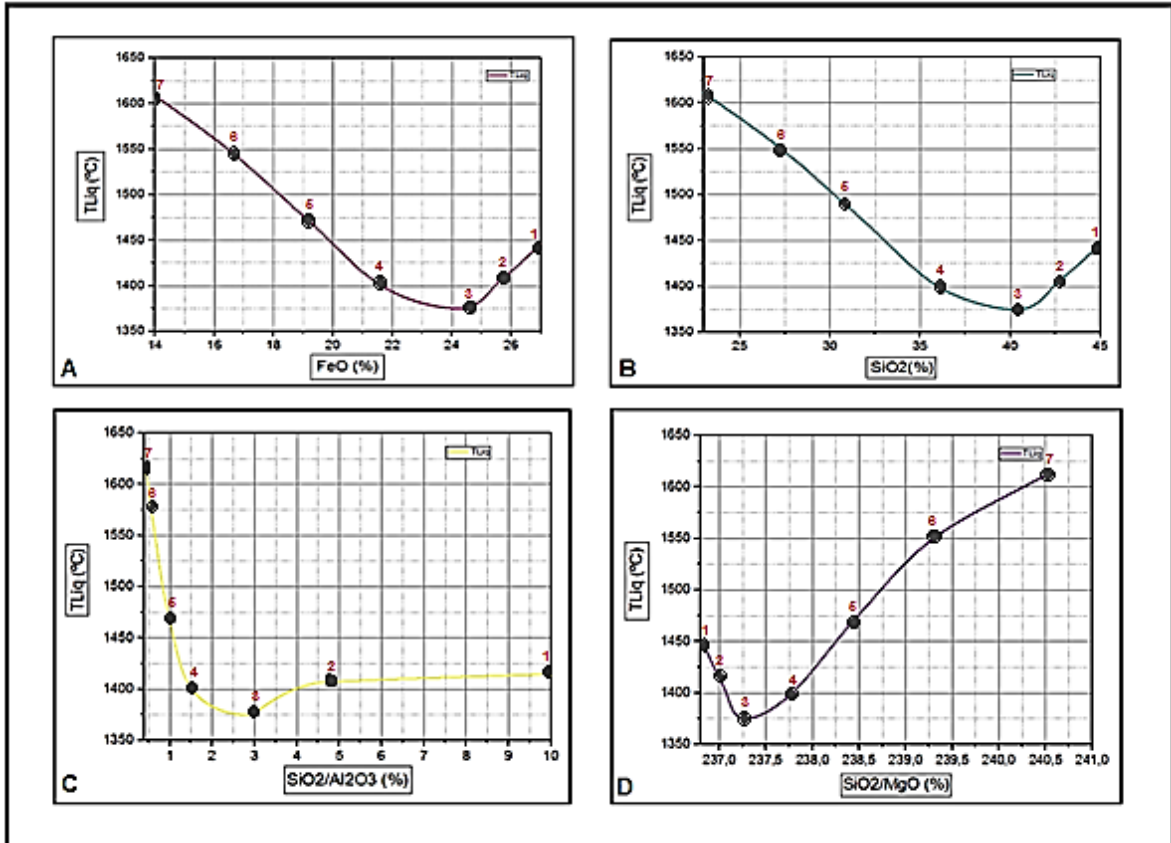
Gráfica 11. Relación de: Temperatura Liquidus, %Alúmina y Tiempo.



Fuente: Autor.

En la gráfica 11, observamos la relación directa de las variables, se puede apreciar que al aumentar el contenido de alúmina hasta 10% disminuye directamente la temperatura de fusión la cual por ende disminuye el tiempo de residencia de la carga en el horno. Al aumenta la T_{Liq} , dada la saturación de alúmina, aumenta directamente el tiempo de fusión.

Gráfica 12. Comportamiento de la Temperatura de Liquidus en función del: FeO, SiO₂ y las relaciones SiO₂/Al₂O₃ y SiO₂/MgO.



Fuente: Autor.

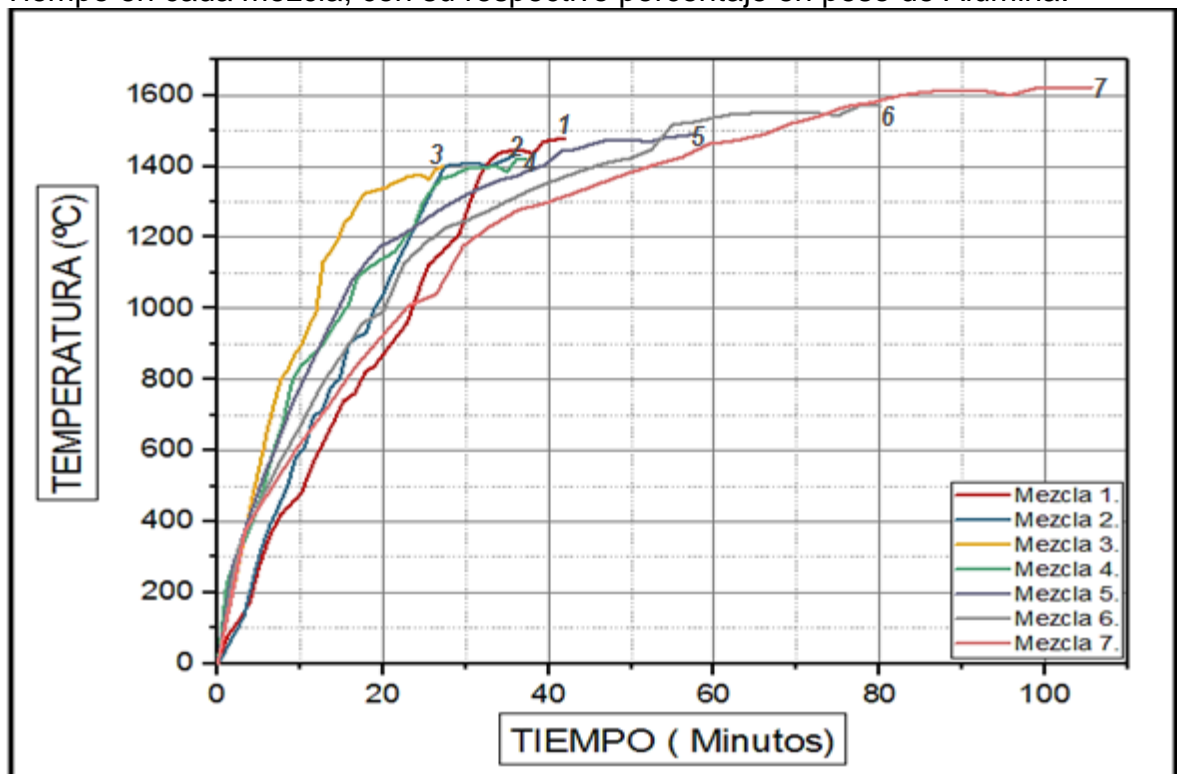
Se puede apreciar en la gráfica 12 el comportamiento de la T_{Liq} con respecto a los óxidos predominantes en la muestra, cada curva fue realizada tomando el porcentaje de cada oxido dentro de la composición química de cada mezcla (tabla 17) contra la Temperatura de Liquidus registrada en cada una (tabla 18), por ende, la adición de alúmina definió el comportamiento de la Temperatura de Liquidus.

Se aprecia el mismo comportamiento entre FeO y el SiO₂, desde la mezcla 7 hasta la mezcla 3, vemos que a medida que disminuye el contenido de alúmina aumentan el porcentaje tanto de FeO como de SiO₂; disminuyendo así la T_{Liq} , no

obstante, aunque siguen aumentando su porcentaje desde la mezcla 3 a la mezcla 1, la T_{Liq} asciende, esto se atribuye directamente al efecto de la alúmina agregada a cada mezcla.

El comportamiento de la relación SiO_2/MgO (S/M) mostrado en la gráfica 12 imagen D, es similar al comportamiento mostrado por la alúmina (gráfica 10). Se conoce que a relaciones bajas de S/M la T_{Liq} aumenta, lo cual se evidencia en la gráfica 12, pero en cierto punto (mezcla 3), vemos que conforme aumenta la relación S/M aumenta también la T_{Liq} , esto es dado a la saturación de alúmina la cual inicia a predominar sobre los silicatos propios de la escoria, transformando así el punto de fusión de la escoria (imagen C).

Gráfica 13: Comportamiento de la Temperatura de Liquidus con respecto al Tiempo en cada mezcla, con su respectivo porcentaje en peso de Alúmina.



Fuente: Autor.

En la gráfica 13 se puede apreciar claramente, cómo la adición de alúmina influyó netamente en el comportamiento de la temperatura, se conoce que en una escoria típica del proceso de obtención de ferróníquel la adición de alúmina disminuye la T_{Liq} fenómeno que vemos claramente en las mezclas 1, 2 y 3.

En un proceso típico de fusión de mineral laterítico de níquel para la producción de ferroníquel, tal adición de alúmina tiene un impacto directo en el modelo de operación del Horno Eléctrico de Arco donde se debe controlar la temperatura de sangrado para que haya una eficiente transferencia de calor desde la escoria hacia el baño metálico, por ende en escorias de bajo punto de fusión dada la adición de alúmina (mezclas 1 y 2) tendrán que someterse a un sobrecalentamiento para cumplir con los requisitos mencionados, tal sobrecalentamiento puede conducir a un claro aumento en el suministro de energía ocasionando un posible recalentamiento de las paredes refractarias del horno, así como mayor gasto de electricidad y tiempo del proceso de producción como tal.

Una vez saturada la escoria en alúmina, dada su alta adición vemos como aumenta nuevamente el punto de fusión desde la mezcla 4 con 20% alúmina hasta la mezcla 7 con 50 % de alúmina, mezclas en las cuales ya no poseemos una escoria típica del proceso de obtención de ferroníquel, dado que el contenido de alúmina es muy alto. Claramente se ve cómo la temperatura y el tiempo son directamente proporcionales pues al aumentar la temperatura aumenta el tiempo, por ende, el proceso de fusión se hace más lento.

6.4 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

La resistividad eléctrica es una propiedad específica de la materia que mide la dificultad que presenta una sustancia para conducir la corriente eléctrica. Entre mayor sea la resistividad de una sustancia menor será su capacidad para conducir la corriente eléctrica. La conductividad eléctrica es la inversa de la resistividad eléctrica y su unidad en el Sistema Internacional es el, siemens/metro o siemens/centímetro. Una vez registrada la Temperatura de Liquidus con la Termocupla tipo R, conectada al controlador de temperatura Mazthermo MC-2938, ésta se retira lentamente para evitar fractura por choque térmico. Dado que la escoria ya se encuentra en estado líquido, se sumergen los electrodos de grafito dentro del baño líquido a una profundidad determinada de 2,6 cm de inmersión y una distancia de separación equivalente a 1,5 cm para cada prueba. Cada electrodo se encuentra conectado mediante cable conductor de cobre hacia los terminales del medidor de resistencia de 4 pines tipo Nilsson y con ello se completa el circuito.

La toma de temperatura, al momento de registrar las medidas de resistencia dadas por el equipo Nilsson, se hizo con ayuda de la pistola de temperatura serie DT-8869H. La medida de la resistencia eléctrica de la escoria depende de diversas variables, una de las más importantes para determinar los valores experimentalmente es la constante de la celda, pues dicha constante permite relacionar los valores obtenidos con los teóricos, y además brinda el porcentaje de error permitido en cuanto a distancia y separación de los electrodos para el

procedimiento experimental, para este caso, la constante de la celda se determinó mediante la siguiente formula:

$$G = \frac{\ln\left(\frac{S}{D} + \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1}\right)}{\pi * \lambda} \quad \text{Ecuación 49.}$$

Donde:

- G = Constante de la celda.
- S = Distancia entre electrodos.
- D = Diámetro de los electrodos.
- λ = Profundidad de inmersión de los electrodos en la escoria fluida

Tabla 20. Resistencias Eléctricas medidas en cada una de las mezclas con sus respectivos valores de Temperatura registrados.

MEZCLAS DE ESCORIA CON SU RESPECTIVO PORCENTAJE EN PESO AGREGADO DE ALÚMINA Y PORCENTAJE DE LAS 4 ESPECIES PREDOMINANTES.													
Nº1 (0%)		Nº2 (5%)		Nº3 (10%)		Nº4 (20%)		Nº5 (30%)		Nº6 (40%)		Nº7 (50%)	
SiO ₂ 45%	FeO 27%	SiO ₂ 42,79%	FeO 25,68%	SiO ₂ 40,57%	FeO 24,36%	SiO ₂ 36,14%	FeO 21,73%	SiO ₂ 31,71%	FeO 19,09%	SiO ₂ 27,28%	FeO 16,46%	SiO ₂ 22,85%	FeO 13,82%
MgO 19%	Al ₂ O ₃ 4,3%	MgO 18,05%	Al ₂ O ₃ 9,04%	MgO 17,1%	Al ₂ O ₃ 13,78%	MgO 15,2%	Al ₂ O ₃ 23,26%	MgO 13,3%	Al ₂ O ₃ 32,74%	MgO 11,4%	Al ₂ O ₃ 42,22%	MgO 9,5%	Al ₂ O ₃ 51,7%
R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C	R(Ω)	T °C
2,6	1401	3,1	1402	4,4	1330	5,8	1374	7,8	1450	9,5	1501	11,1	1584
1,8	1418	2,6	1405	3,8	1342	4,9	1398	6,6	1460	9,1	1523	10,3	1592
1,3	1434	2,0	1407	3,5	1369	4,4	1400	6,1	1474	8,3	1546	9,9	1606
1,1	1445	1,8	1408	3,4	1375	4,0	1405	5,9	1476	7,8	1550	8,5	1613
0,7	1452	1,6	1412	2,9	1393	3,8	1413	5,2	1481	7,6	1551	8,5	1613
PROMEDIO DE LOS VALORES DE RESISTENCIA Y TEMPERATURA													
1,5	1430	2,22	1407	3,6	1362	4,58	1398	6,32	1468	8,46	1534	9,66	1602
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS VALORES DE RESISTENCIA Y TEMPERATURA													
0,73	20,6	0,68	3,71	0,55	25,5	0,80	14,6	0,97	12,8	0,82	21,8	1,14	13,0

Fuente: Autor.

En la tabla 20 se puede apreciar los valores de resistencia medidos experimentalmente con la ayuda del medidor de resistencia de cuatro pines tipo Nilsson, y las temperaturas registradas con la pistola de temperatura serie DT-8869H para cada medida de resistencia tomada. El valor de resistencia evaluado en cada mezcla corresponde a los resaltados en amarillo puesto que equivalen a los valores medidos a la temperatura de Liquidus registrada por medio de la termocupla tipo R (tabla 18). El promedio de los valores de resistencia y temperatura claramente evidencia el mismo comportamiento en comparación con los datos vistos en amarillo, dado que vemos como la resistencia eléctrica incrementa a medida que se aumenta el contenido de alúmina. La desviación estándar nos muestra claramente la medida de dispersión de los datos registrados

tanto de resistencia como de temperatura, indicándonos con ello el alejamiento de los valores con respecto al promedio medido de cada uno. El valor de desviación estándar calculado para los datos registrados nos determina el rango óptimo en el cual los valores registrados serán más exactos con respecto a la medida promedio calculada.

Tabla 21. Análisis de los datos evaluados de Resistencia y Temperatura con respecto a la desviación estándar calculada para cada una de las mezclas de Escoria con su respectivo porcentaje en peso de Alúmina.

MEZCLA	DATOS DE RESISTENCIA Y TEMPERATURA CON RESPECTO AL RANGO MEDIDO DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN RELACIÓN AL PROMEDIO CALCULADO				DATOS DE RESISTENCIA Y TEMPERATURA DE LIQUIDUS EVALUADOS	
	Resistencia Ω		Temperatura $^{\circ}\text{C}$		R (Ω)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Nº 1	1,5 + 0,73	2,23 Ω	1430 + 20,6	1451 $^{\circ}\text{C}$	1,1 Ω	1445 $^{\circ}\text{C}$
	1,5 - 0,73	0,77 Ω	1430 - 20,6	1409 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 2	2,22 + 0,68	2,9 Ω	1407 + 3,71	1411 $^{\circ}\text{C}$	2,0 Ω	1407 $^{\circ}\text{C}$
	2,22 - 0,68	1,54 Ω	1407 - 3,71	1403 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 3	3,6 + 0,55	4,15 Ω	1362 + 25,5	1388 $^{\circ}\text{C}$	3,4 Ω	1375 $^{\circ}\text{C}$
	3,6 - 0,55	3,05 Ω	1362 - 25,5	1337 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 4	4,58 + 0,80	5,38 Ω	1398 + 14,6	1413 $^{\circ}\text{C}$	4,9 Ω	1398 $^{\circ}\text{C}$
	4,58 - 0,80	3,78 Ω	1398 - 14,6	1383 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 5	6,32 + 0,97	7,29 Ω	1468 + 12,8	1481 $^{\circ}\text{C}$	6,1 Ω	1474 $^{\circ}\text{C}$
	6,32 - 0,97	5,35 Ω	1468 - 12,8	1455 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 6	8,46 + 0,82	9,28 Ω	1534 + 21,8	1556 $^{\circ}\text{C}$	7,8 Ω	1550 $^{\circ}\text{C}$
	8,46 - 0,82	7,64 Ω	1534 - 21,8	1512 $^{\circ}\text{C}$		
Nº 7	9,66 + 1,14	10,8 Ω	1602 + 13,0	1615 $^{\circ}\text{C}$	8,5 Ω	1613 $^{\circ}\text{C}$
	9,66 - 1,14	8,52 Ω	1602 - 13,0	1589 $^{\circ}\text{C}$		

Fuente: Autor.

La tabla 21 nos otorga un claro análisis de los datos medidos, observamos como los datos evaluados se encuentran dentro del rango óptimo de medidas dadas por la desviación estándar, lo que indica que los datos medidos experimentalmente son verídicos y confiables. El análisis de los datos de resistencia eléctrica obtenidos para cada mezcla consiste en calcular la resistividad de los mismos a partir del uso de la siguiente ecuación propuesta por Birol et al. (Birol.2014)⁵⁸:

$$\rho = \frac{R \pi r(r+2h)}{L} \quad \text{Ecuación 50.}$$

⁵⁸ BURAK BIROL, GOKHAN POLAT and MUHLIS NEZIHI SARIDEDE. Estimation Model for Electrical Conductivity of Molten $\text{CaFe}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ Slags Based on Optical Basicity. The minerals, Metals and materials Society – 2014.

Donde:

- ρ = Resistividad (Ohmios/centímetro).
- L = Longitud o distancia entre electrodos (centímetro).
- R = Resistencia dada por el instrumento (Ohmios).
- r = Radio del electrodo (centímetro).
- h = Profundidad de inmersión de los electrodos (centímetro).

Teniendo en cuenta que, la conductividad eléctrica es la inversa de la resistividad, entonces tenemos que la conductividad eléctrica de la escoria está dada por la siguiente fórmula:

$$K = 1/\rho \quad \text{Ecuación 51.}$$

Dónde:

- K = conductividad eléctrica de la escoria en (S.cm)
- ρ = Resistividad de la escoria en (Ohmios/centímetro)

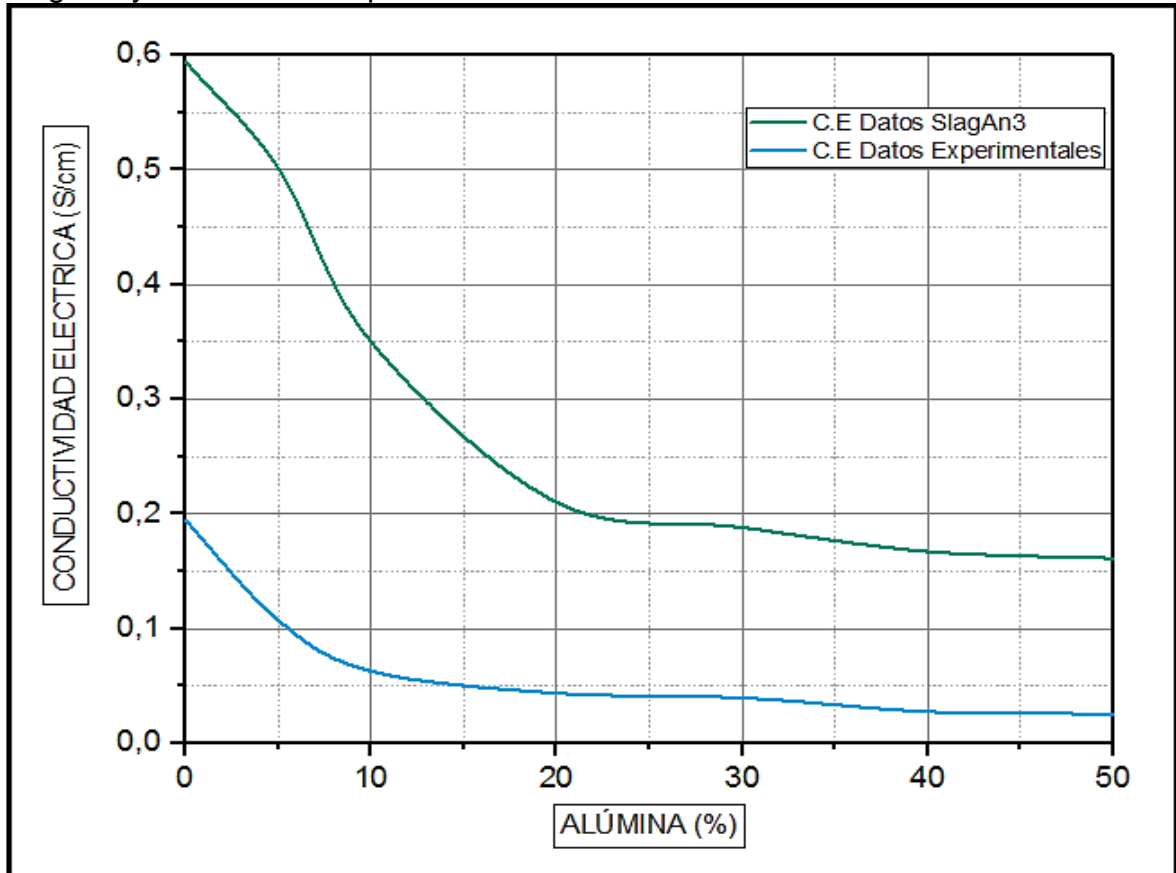
Aplicando las ecuaciones 50 y 51 se determinaron los siguientes valores de resistividad y conductividad respectivamente para cada mezcla. Es necesario tener en cuenta que el cable de cobre y los electrodos de grafito usado en el método experimental de medición poseen una resistividad neta del material por lo cual se hace necesario restar dicha resistividad para obtener así la resistividad neta de la escoria fundida.

Tabla 22. Resultados de la prueba de Conductividad Eléctrica de cada mezcla medida a su Temperatura de Liquidus.

MEZCLA	RESISTENCIA DADA POR EL EQUIPO (Ω).	RESISTIVIDAD DEL COBRE. (Ω .cm).	RESISTIVIDAD DEL GRAFITO (Ω .cm).	RESISTIVIDAD DE LA ESCORIA (Ω .cm).	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA ESCORIA (S/cm).
Nº 1 0% Al_2O_3	1,1 (Ω)	1.72x10 ⁻⁸ (Ω .cm)	3.5x10 ⁻⁵ (Ω .cm)	5,161 (Ω .cm)	0,194 (S/cm)
Nº 2 5% Al_2O_3	2,0 (Ω)			9,383 (Ω .cm)	0,107 (S/cm)
Nº3 10% Al_2O_3	3,4 (Ω)			15,951 (Ω .cm)	0,0627 (S/cm)
Nº 4 20% Al_2O_3	4,9 (Ω)			22,988 (Ω .cm)	0,0435 (S/cm)
Nº 5 30% Al_2O_3	6,1 (Ω)			28,618 (Ω .cm)	0,0394 (S/cm)
Nº 6 40% Al_2O_3	7,8 (Ω)			36,593 (Ω .cm)	0,0273 (S/cm)
Nº 7 50% Al_2O_3	8,5 (Ω)			39,877 (Ω .cm)	0,0251 (S/cm)

Fuente: Autor.

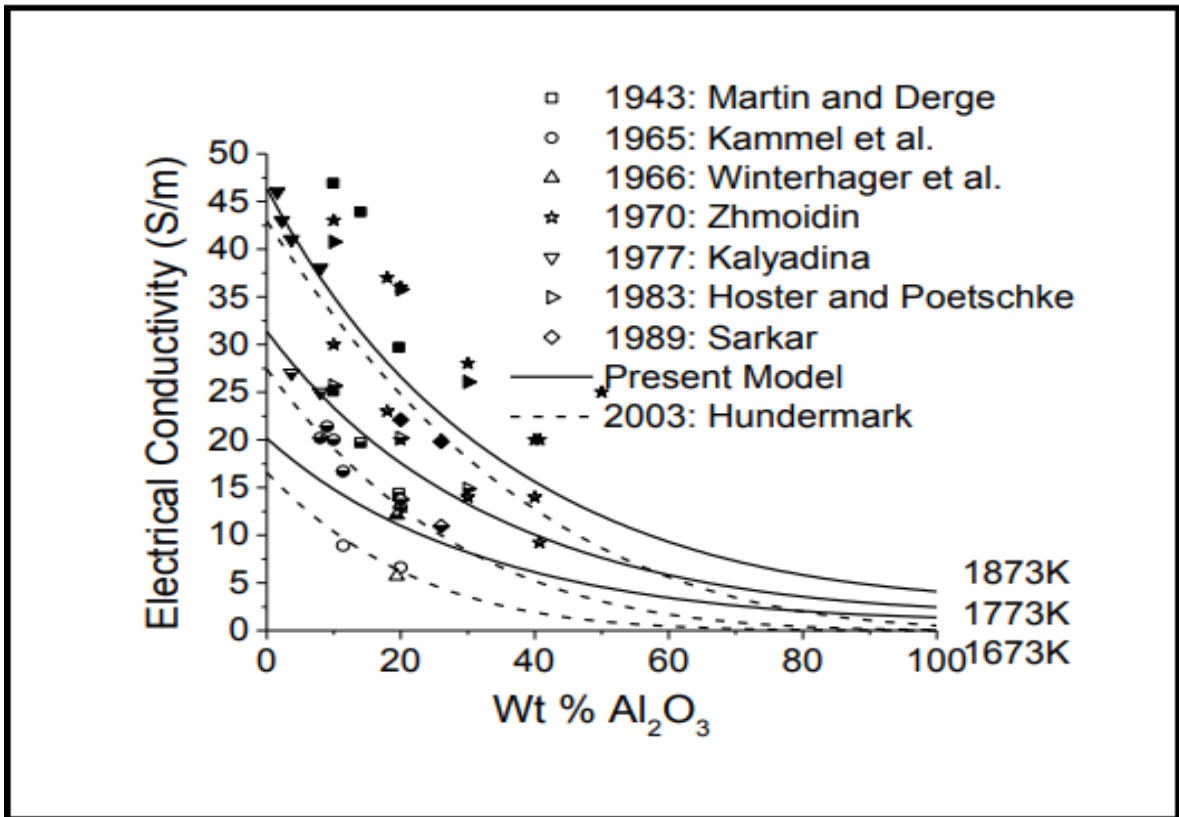
Grafica 14. Comparación de la Conductividad Eléctrica medida en el software SlagAn3 y la calculada experimentalmente.



Fuente: Autor.

En la gráfica 14 se puede apreciar el comportamiento de la conductividad eléctrica medida por el software SlagAn3 y la calculada experimentalmente usando el medidor de resistencia de cuatro pines tipo Nilsson, se puede apreciar una clara diferencia entre ambas líneas, esto dado a que el simulador SlagAn3 presenta la limitación de que los valores estimados no cambian al variar la temperatura, por otra parte dada la misma tendencia de las curvas se puede concluir que los datos registrados experimentalmente presentan una aproximación razonable comparados con los datos obtenidos en el software SlagAn3 con lo que se garantiza un análisis verídico de los resultados.

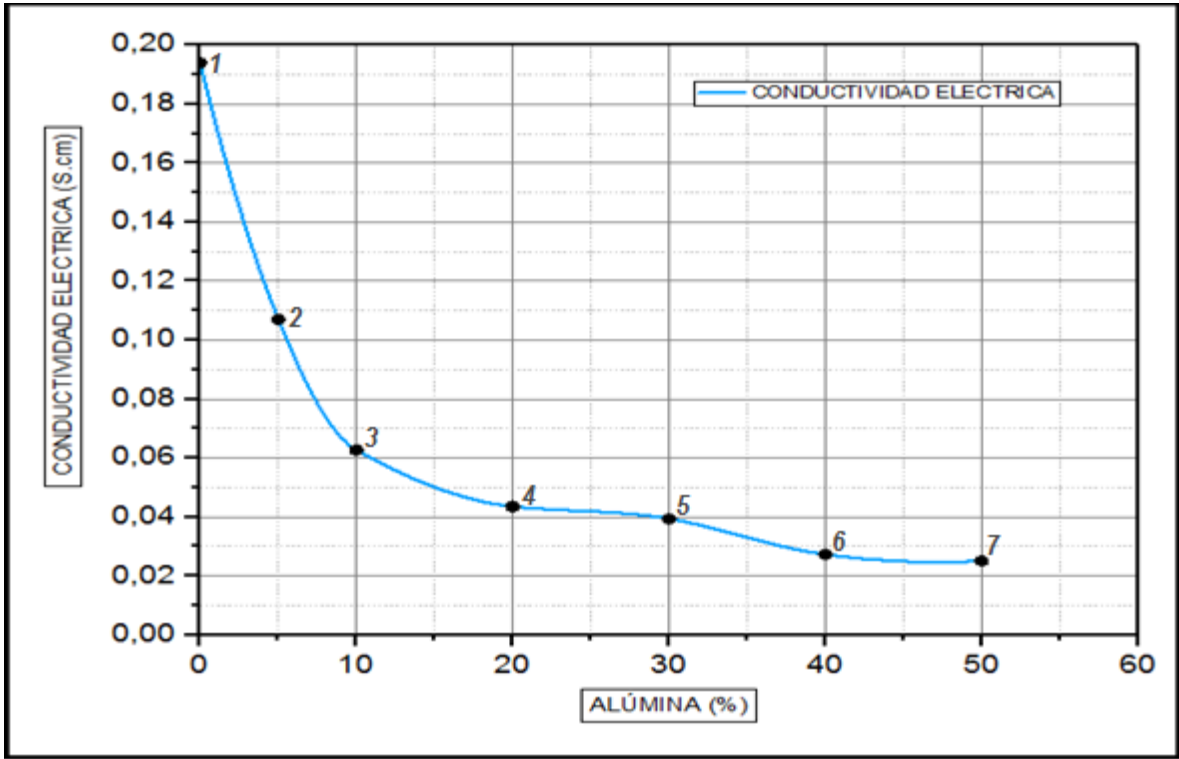
Grafica 15. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica en relación con el contenido en peso de Al_2O_3 . Medida a diferente Temperatura y por diferentes autores.



Fuente: Modeling the Molar Volume and Electrical Conductivity of Oxide Melts, Eric Robert Thibodeau - December 2014.

La conductividad eléctrica de la Al_2O_3 fue ampliamente estudiada por varios grupos de investigadores, la mayoría de las mediciones registradas se dan en relación con el porcentaje en peso. Las composiciones medidas (en% en peso) se ven claramente en la gráfica 15, el análisis de estos datos demuestra claramente la dispersión significativa de los resultados experimentales; sin embargo, todos los autores obtuvieron tendencias similares siendo menor la conductividad eléctrica a mayor porcentaje en peso de la alúmina.

Gráfica 16. Relación entre Conductividad Eléctrica y % de Alúmina de cada una de las mezclas realizadas.

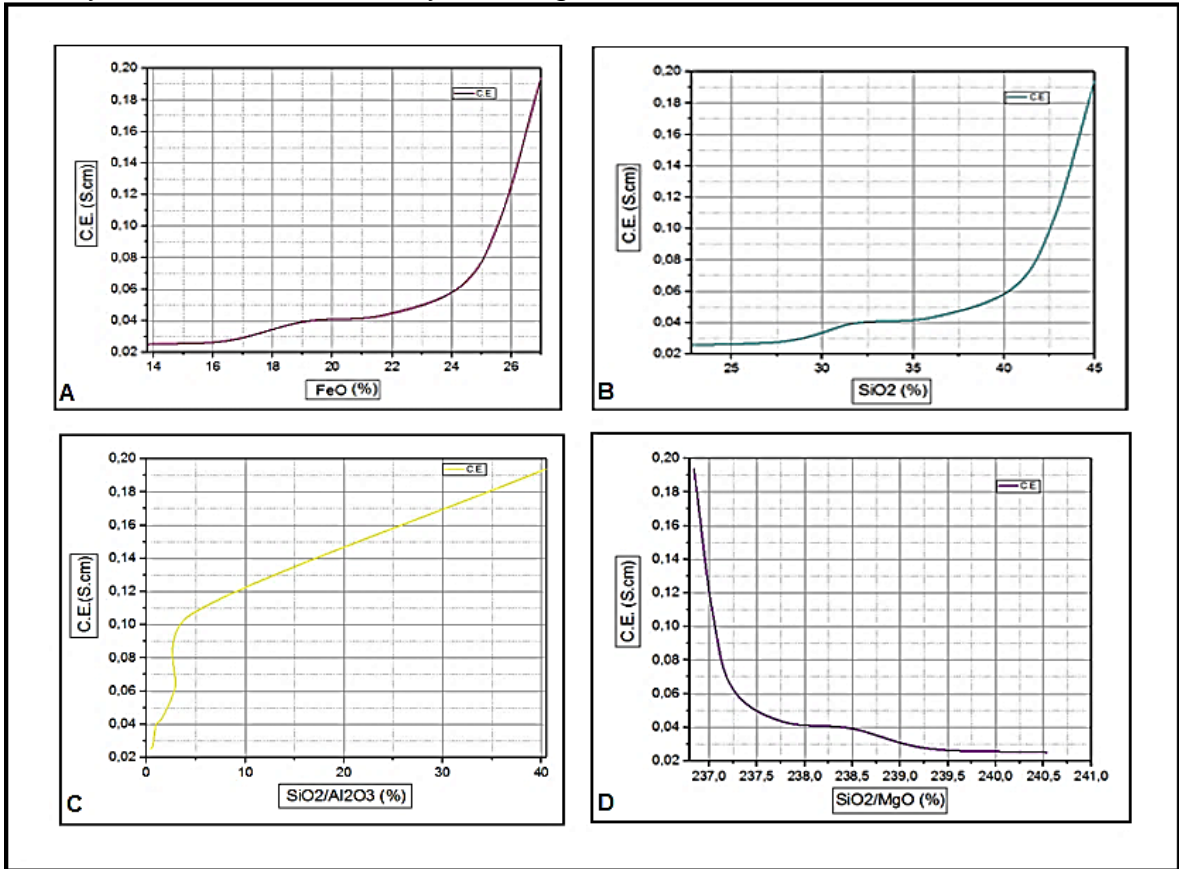


Fuente: Autor.

En la gráfica 16 se puede observar como disminuye la conductividad eléctrica a medida que el porcentaje de alúmina aumenta lo que concuerda con el comportamiento dado en anteriores investigaciones (gráfica 15). Conforme aumenta el contenido de alúmina (20 % de alúmina agregada en peso) vemos como la pendiente tiende a estabilizarse puesto que la conductividad eléctrica se hace menos pronunciada dada la posible formación de una matriz de aluminio dentro de la escoria.

El Al_2O_3 en estado líquido es trivalente encontrándose en forma iónica (Al^{3+}) por lo cual puede asociarse fácilmente con el oxígeno dada la alta afinidad que posee el aluminio por el oxígeno, formando así óxidos iónicos de aluminio tal como el AlO_4^{-5} entre otros los cuales al encontrarse en un medio saturado de alúmina conducen a disminuir la conductividad eléctrica puesto que no conducen la electricidad dado que los electrones están fuertemente localizados y atraídos por los dos núcleos de los átomos que los comparten.

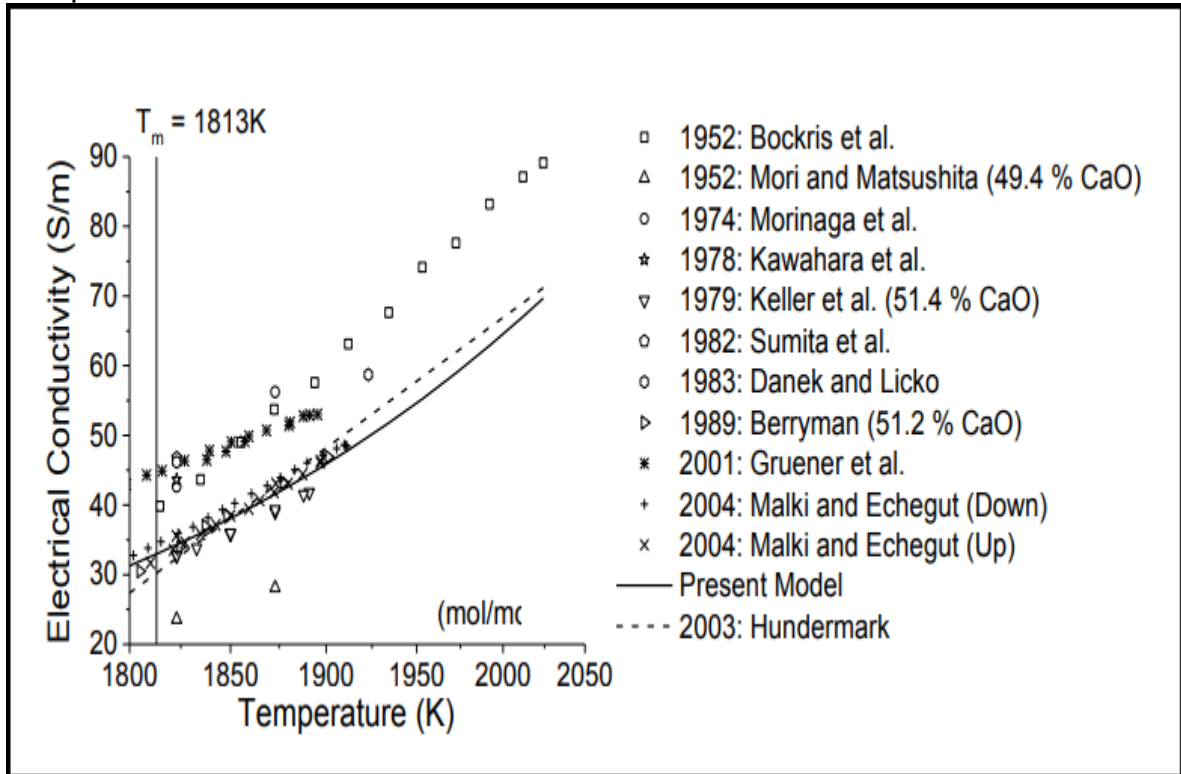
Gráfica 17. Comportamiento de la Conductividad Electrica en función del: FeO, SiO₂, y la relación SiO₂/Al₂O₃ y SiO₂/MgO.



Fuente: Autor.

En la gráfica 17, se observa claramente como la alúmina al encontrarse en alta concentración define netamente el comportamiento eléctrico de la escoria. La conductividad eléctrica de la escoria proviene de iones que se pueden movilizar bajo el campo eléctrico siempre formando una estructura de red tridimensional, en el caso de los óxidos básicos, estos pueden romper la estructura de red de los óxidos ácidos dada la liberación de iones de oxígeno. Por lo tanto, en un cierto rango la conductividad de la escoria aumentará con el aumento del contenido óxidos básicos como CaO, MgO, MnO, y disminuirá con el contenido de óxidos ácidos como Al₂O₃, entre otros.

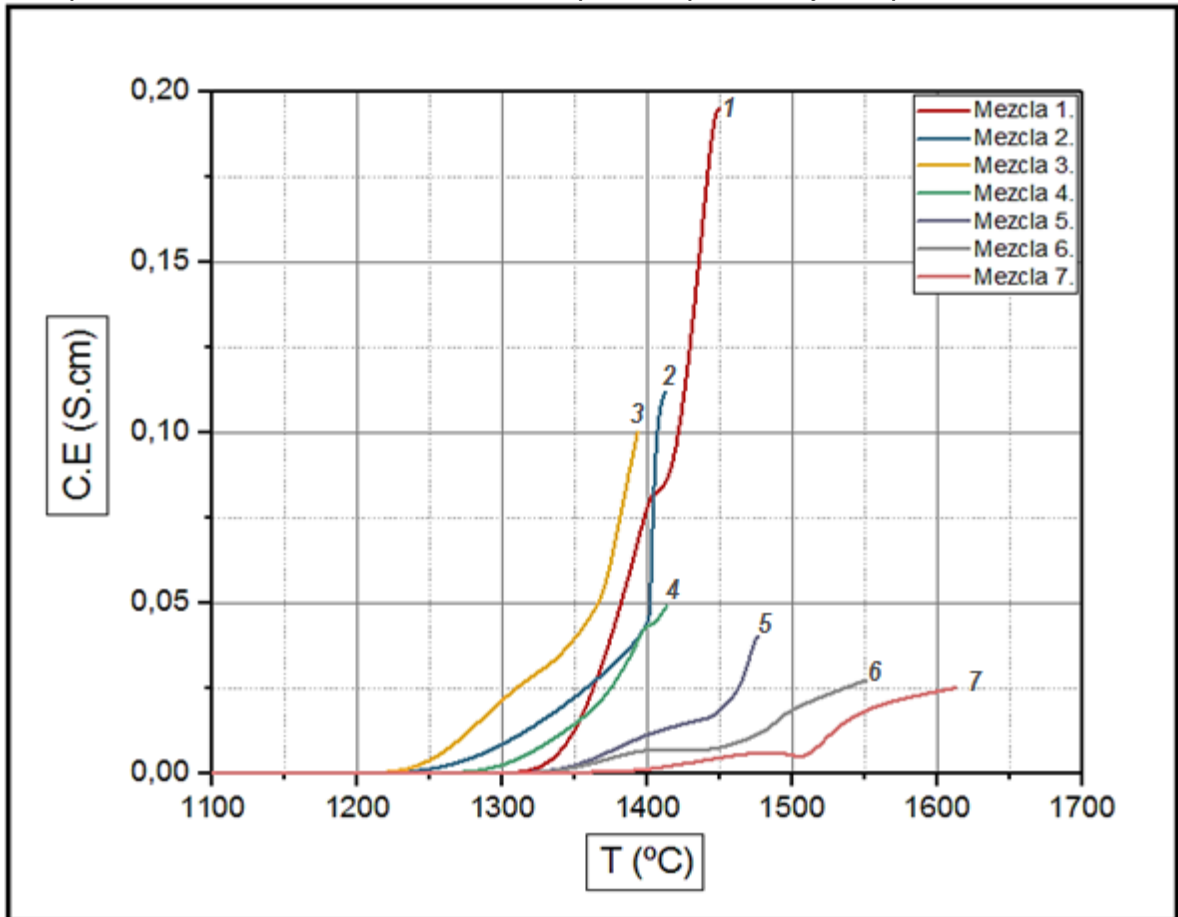
Grafica 18. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica con relación a la Temperatura.



Fuente: Modeling the Molar Volume and Electrical Conductivity of Oxide Melts, Eric Robert Thibodeau - December 2014.

La conductividad eléctrica en relación con la temperatura fue ampliamente estudiada por varios grupos de investigadores, la mayoría de las mediciones registradas se dan a temperaturas muy elevadas gráfica 18, el análisis de estos datos demuestra claramente una dispersión de los resultados experimentales; sin embargo, todos los autores obtuvieron tendencias similares siendo mayor la conductividad eléctrica a mayor temperatura.

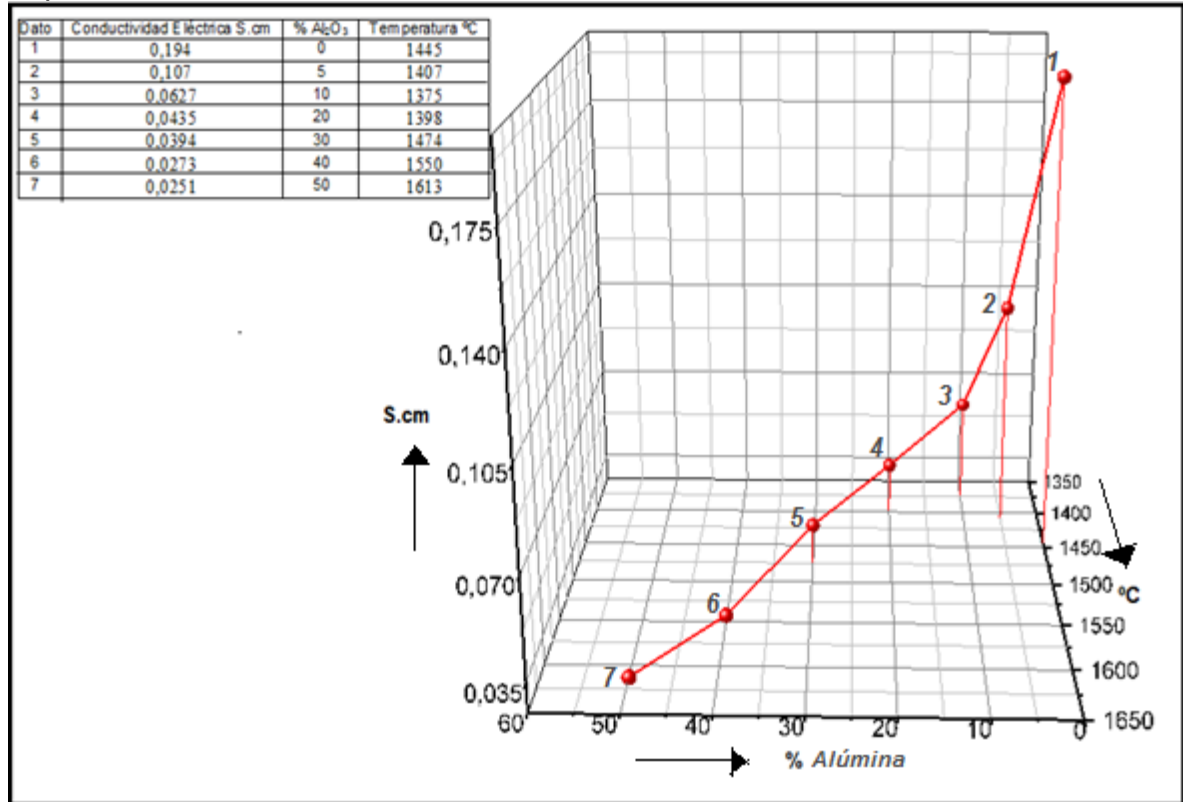
Gráfica 19. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica con respecto a la Temperatura de cada mezcla con su respectivo porcentaje en peso de Alúmina.



Fuente. Autor.

En la gráfica 19 se observa claramente cómo, a medida que aumenta la temperatura aumenta la conductividad eléctrica, comportamiento dado en previas investigaciones (gráfica 18). Las mezclas 5, 6 y 7 presentan conductividades bajas a temperaturas elevadas dado que contienen los porcentajes de alúmina más altos 30, 40 y 50% respectivamente, encontrándose posiblemente ya una matriz de alúmina en cada mezcla. Las mezclas 2 y 4 aunque se encuentran a temperaturas muy similares registran conductividades muy diferentes, esto dado al contenido de alúmina siendo 5% para la mezcla 2 y 20% para la mezcla 4. Como vemos, la mezcla 3 inicia a conducir electricidad a menor temperatura que las demás mezclas, esto debido a que el porcentaje de alúmina es bajo, y por ende su punto de fusión ha disminuido, fenómeno que vemos también en la mezcla 2. La mezcla 1 con 0% de alúmina registra la conductividad más alta.

Gráfica 20. Relación de: Conductividad Eléctrica, % Alúmina y Temperatura Liquidus.



Fuente: Autor.

En la gráfica 20 observamos que cuando la cantidad de alúmina satura la muestra, la temperatura de fusión de la escoria y la conductividad eléctrica aumentan. La conductividad eléctrica de la escoria disminuye notoriamente a medida que la adición de Al₂O₃ aumenta conforme lo preparado en cada muestra. Así mismo se aprecia que la acción de la alúmina con respecto a la T_{Liq} de la escoria, es que esta disminuye dicha temperatura, pero cuando se encuentra en porcentajes elevados por encima de 14,6% aproximadamente, pierde tal propiedad e inicia a aumentar el punto de fusión de la escoria.

En la gráfica 20 se ve claramente como el tiempo de fusión de la escoria aumenta a raíz de la saturación de alúmina en la matriz de la escoria y la conductividad eléctrica disminuye a causa de la resistencia de esta matriz al paso de corriente. Esto indica que su relación es directa y que estas tres variables dependen una de la otra, un pequeño cambio de una afecta drásticamente el comportamiento de las otras.

7. CONCLUSIONES:

- ❖ Con esta investigación se contribuye de manera importante al entendimiento y comprensión del fenómeno de la conductividad eléctrica de la escoria del proceso de obtención de ferróníquel y su importancia en el funcionamiento y control del Horno Eléctrico de Arco.
- ❖ Los resultados son acordes con la literatura en los ensayos de DRX y FRX realizados a las muestras de escoria y alúmina. El espectro obtenido del ensayo de Difracción de Rayos X realizado a la escoria, corrobora el enfriamiento rápido a que se somete la escoria a la salida del horno de arco y por esto se encuentra material amorfo en la muestra (85,3%). Se evidencio también la formación de especies mineralógicas de tipo olivino y piroxenos. El ensayo de Fluorescencia de Rayos X realizado a la escoria, mostró una composición química característica de escorias provenientes del proceso de producción del ferróníquel dados los contenidos altos de SiO_2 , FeO , y MgO .
- ❖ La alúmina (Al_2O_3), tiene un efecto importante en el comportamiento de la escoria del proceso de fusión de mineral laterítico de níquel dada su influencia en las propiedades tales como. Temperatura de Liquidus y Conductividad Eléctrica. Es por ello que, para garantizar un buen control del funcionamiento del Horno Eléctrico de Arco uno de los aspectos más relevantes es garantizar la estabilidad de la alúmina dentro de la composición química de la escoria.
- ❖ Se detectó que la alúmina tiene un efecto directo sobre la temperatura de Liquidus de la escoria, a medida que aumenta su proporción con valores de hasta de 14% en peso la temperatura disminuye, no obstante, a medida que él % en peso sobrepasa el 15 % el efecto neto es aumentar la temperatura de Liquidus.
- ❖ Se confirmó el uso del medidor de resistencia de cuatro pines tipo Nilsson conectado mediante un cable conductor de cobre a electrodos de grafito sumergidos dentro de escoria líquida, es un instrumento eficiente para determinar y medir la conductividad eléctrica de escorias fundidas.
- ❖ Se determinó mediante el análisis de los resultados obtenidos en este proyecto, que el efecto de la alúmina sobre la conductividad eléctrica de la escoria del proceso de obtención de ferróníquel, está dado por su contenido dentro de la composición de la misma, ya que a mayor contenido de alúmina menor conductividad eléctrica.

❖ Al disminuir la conductividad eléctrica de la escoria aumenta por ende su resistencia al paso de electrones, esto puede interpretarse en el funcionamiento del horno de arco eléctrico de dos maneras distintas, positivamente debido a que, al tener una mayor resistencia al paso de corriente, las partículas se calentarán más rápido aumentando la tasa de fusión. Negativamente puede impactar la distribución de energía a lo largo del horno de arco eléctrico.

❖ La relación entre la conductividad eléctrica y la composición de la escoria es muy compleja y un pequeño cambio en la composición puede disminuir o aumentar la conductividad eléctrica de la misma, aun así, se pueden implementar métodos operativos que permitan controlar las propiedades físico-químicas de la misma, mejorando con ello las condiciones de operación y funcionamiento del Horno Eléctrico de Arco.

❖ Gracias al análisis realizado en este proyecto, se logró un entendimiento importante en el efecto que causa una especie dentro de una escoria de tipo metalúrgico sobre la conducción eléctrica y así la facilidad de calentar una masa de material dentro de un horno eléctrico de arco HEA, y que condiciones operativas y de diseño permitirá tomar mejores decisiones en el mejoramiento y control de las variables eléctricas del Horno.

8. RECOMENDACIONES:

- ❖ Dada la importancia que tiene el Horno Eléctrico de Arco y su desempeño fundamental en el procesamiento de minerales lateríticos de níquel para la producción de ferroníquel, se recomienda la implementación de una nueva estrategia de control del horno eléctrico de arco basado en el efecto de la alúmina sobre la conductividad eléctrica de la escoria, utilizando la información y los datos desarrollados en este trabajo.
- ❖ Para validar los resultados alcanzados en este trabajo con respecto al efecto de la alúmina sobre la conductividad eléctrica de la escoria, se recomienda hacer mediciones de conductividad eléctrica del baño de escoria de manera más frecuente, lo que permitirá hacer ajustes o calibraciones más acertadas del mismo.
- ❖ La conductividad de la escoria depende directamente de la composición y temperatura de la misma, es necesario tener en cuenta que todos los óxidos afectan de forma diferente la conductividad, ya que algunos son más conductores que otros, se recomienda evaluar el efecto de los demás elementos constituyentes de una escoria típica de ferroníquel sobre la resistencia eléctrica de la escoria para con ello tomar decisiones más factibles sobre el control y operación del proceso realizado en el Horno Eléctrico de Arco.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- ❖ BIROL Burak, POLAT Gokhan and NEZIHI SARIDEDE Muhlis. **Estimation Model for Electrical Conductivity of Molten $\text{CaFe}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ Slags Based on Optical Basicity**. The minerals, Metals and materials Society – 2014.
- ❖ PÉREZ VILLAMIL Fabio Raúl. **Viscosidad y conductividad eléctrica de la escoria de Cerromatoso S.A.** Trabajo de grado Master en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Tunja. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, 2007. *Páginas 17-142*.
- ❖ GASIK Michael. **Handbook of ferroalloys, theory and technology**. 1st Edition, 2013, Chapter 10 – Technology of Ferronickel. *Pages 367–375*.
- ❖ ALVAREZ MURALLES Luis Mariano. **Evaluación de la escoria de ferroníquel como agregado fino**. Trabajo de graduación, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. *Noviembre de 2009. Páginas 21-33*.
- ❖ NERET GONZALES Carlos Eduardo. **Caracterización de las escorias de fusión del proceso de producción de ferroníquel**. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero en Materiales. Sartenejas, Universidad Simón Bolívar, Decanato de Estudios Profesionales de Ingeniería de Materiales. *Marzo del 2014. Páginas 3-83*.
- ❖ DÁVILA BELTRÁN Iván Fernando. **Estudio de las propiedades fisicoquímicas de las escorias de Cerromatoso S.A.** Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en Metalurgia. Tunja, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia. 2008. *Páginas 16-32*.
- ❖ MADIAS Jorge. **Electric Furnace Steelmaking**. Treatise on Process Metallurgy, Volume 3. 2014. Chapter 1,5. *Pages 272-298*.
- ❖ PÉREZ RODRÍGUEZ Héctor Alirio, PÉREZ VILLAMIL Fabio Raúl. **Study of the predominant phases and characterization of slags of the process to obtaining Ferronickel**. Article, Scientia et Technica. Año XIII, No 36, *Septiembre 2007*.
- ❖ TING WU, QIAN WANG, CHENGFENG YU, SHENGPING HE. **Structural and viscosity properties of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ slags based on molecular**

dynamic simulation. Journal of Non-Crystalline Solids. Volume 450. 15 October 2016, Pages 23-31.

❖ P.E. TSAKIRIDIS. **Aluminum salt slag characterization and utilization.** Journal of Hazardous Materials, Volumes 217–218. 30 May 2012. Pages 1-10.

❖ PÉREZ VILLAMIL Fabio Raul. **Typical slag viscosity and conductivity in the Ferronickel's production.** revista facultad de ingeniería, UPTC, 2009, Vol 18, No 26.

❖ CHANG-YU Sun, XING-MIN Guo. **Electrical conductivity of MO (MO=FeO, NiO), containing CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ slag with low basicity.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 21, Issue 7, July 2011, Pages 1648-1654.

❖ PARDO CARDOZO Leonardo Alexander, M.SC PÉREZ VILLAMIL Fabio Raúl. **Parámetros para la medición de la conductividad eléctrica de escorias fundidas.** Tópico: 02. Fundición, Solidificación y Soldadura, 2015.

❖ BARATI FORMER Mansoor, Ph.D. **Electrical and Electronic Conductivity of CaO-SiO₂-FeO Slags at Various Oxygen Potentials.** Part I. Experimental Results, Kenneth s. Coley, Associate Professor is with Department of Materials Science and Engineering. June 11, 2005.

❖ GUO-HUA Zhang, KUO-CHIH Chou, AND FU-SHEN Li. **A new model for evaluating the electrical conductivity of nonferrous slag.** International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. Volume 16, Number 5. October 2009, Page 500.

❖ SUSAN L. SCHIEFELBEIN and DONALD R. SADOWAY. **A High-Accuracy, Calibration-Free, Technique for Measuring the Electrical Conductivity of Molten Oxides.** Metallurgical and Materials Transactions. Volume 28b, December 1997.

❖ BOHÓRQUEZ BAUTISTA Ferney. **Influencia de la adición de óxido de hierro Fe₂O₃ sobre la conductividad eléctrica de escorias siderúrgicas.** Trabajo presentado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Tunja. Abril 2016. Páginas 46-66.

❖ TRIANA CAMARGO Juan Pablo. **Estudio de variables que permiten disminuir retención de escoria en Horno Eléctrico FC01 de Cerromatoso S.A.** Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Tunja. 2017. páginas 39-45.

10. INFOGRAFÍA.

- ❖ http://www.upme.gov.co/docs/niquel_colombia.pdf.
- ❖ <https://pruebadehabilidadesquimica1005an.weebly.com/oxido-basico.html>.
- ❖ <https://www.ecured.cu/Ferron%C3%ADquel>.
- ❖ <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Metalurgia/Documents/APUNTES/OBTENCION%20PARCIALES%20COMPLETOS.pdf>.
- ❖ <https://es.scribd.com/document/241725160/Calcinacion-pdf>.
- ❖ <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-22.pdf>.
- ❖ <https://sites.google.com/site/hornoelectricodearco/4-el-proceso/4-3-fusion-y-afino>.
- ❖ <http://www.navarrosic.com/empresa/carburo>.
- ❖ [file:///C:/Users/win8.1/Downloads/Clase_17_B_Ley_de_Bragg_2010_1%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/win8.1/Downloads/Clase_17_B_Ley_de_Bragg_2010_1%20(1).pdf).
- ❖ https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf.
- ❖ https://www.kew-ltd.co.jp/files/en/manual/4102A_IM_S_L.pdf.

11. ANEXO.

A continuación, se muestra la relación de datos entre Temperatura y Tiempo de cada una de las pruebas realizadas en el proyecto.

Anexo A: Temperatura y Tiempo de fusión de cada una de las Mezclas.

Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3		Mezcla 4		Mezcla 5		Mezcla 6		Mezcla 7	
Segundos	°C	Segundos	°C	Segundos	°C	Segundos	°C	Segundos	°C	Segundos	°C	Segundos	°C
1,2	80	1	40	0,8	100	1,1	227	1,8	277	2,5	327	3,3	377
2,5	120	2,1	90	1,7	190	2,2	300	3,6	399	5	449	6,6	499
3,8	170	3,1	130	2,5	280	3,3	350	5,4	518	7,5	568	9,9	618
5	275	4,2	230	3,4	380	4,5	420	7,2	620	10	670	13,2	720
6,3	360	5,2	320	4,2	470	5,6	500	9	732	12,5	782	16,5	832
7,6	420	6,3	390	5,1	560	6,7	600	10,8	820	15	870	19,8	920
10,1	480	7,3	440	5,9	650	7,9	680	12,6	908	17,5	958	23,1	1008
11,4	560	8,4	500	6,8	730	9	800	14,4	991	20	991	26,4	1041
12,7	620	9,4	580	7,6	800	10,1	840	16,2	1077	22,5	1127	29,7	1177
14	680	10,5	610	8,5	830	12,4	890	18	1132	25	1182	33	1232
15,2	740	11,6	700	9,3	870	13,5	930	19,8	1177	27,5	1227	36,3	1277
16,5	760	12,6	710	10,2	900	14,6	970	21,6	1197	30	1247	39,6	1297
17,8	820	13,7	780	11	950	15,8	1010	23,4	1223	32,5	1273	42,9	1323
19	840	14,7	800	11,9	990	16,9	1090	25,2	1252	35	1302	46,2	1352
20,3	880	15,8	900	12,7	1130	18	1110	27	1280	37,5	1330	49,5	1380
21,6	920	16,8	920	13,6	1160	19,2	1130	28,8	1304	40	1354	52,8	1404
22,9	960	17,9	930	14,4	1190	20,3	1145	30,6	1326	42,5	1376	56,1	1426
24,1	1040	18,9	1000	15,3	1240	21,4	1160	32,4	1346	45	1396	59,4	1463
25,4	1120	20	1040	16,1	1260	22,6	1200	34,2	1363	47,5	1413	62,7	1473
26,7	1150	21,1	1100	17	1300	23,7	1230	36	1372	50	1423	66	1490
28	1180	22,1	1150	17,8	1325	24,8	1300	37,8	1390	52,5	1449	69,3	1520
29,2	1210	23,2	1200	18,7	1330	25,9	1337	39,6	1404	55	1518	72,6	1540
30,5	1300	24,2	1250	19,5	1335	27,1	1366	41,4	1442	57,5	1524	75,9	1568
31,8	1380	25,2	1300	20,4	1340	28,2	1372	43,2	1448	60	1537	79,2	1580
33	1420	26,3	1350	21,2	1353	29,3	1385	45	1461	62,5	1548	82,5	1600
34,3	1440	27,4	1400	22,1	1360	30,5	1396	46,8	1472	65	1550	85,8	1610
35,6	1445	28,4	1405	22,9	1370	31,6	1396	48,6	1474	67,5	1550	89,1	1613
36,9	1445	30,5	1407	23,8	1374	32,7	1398	50,4	1474	70	1550	92,4	1613
38,1	1435	31,6	1407	24,6	1374	33,9	1398	52,2	1468	72,5	1550	95,7	1600
39,4	1470	32,7	1398	25,5	1364	35	1385	54	1480	75	1543	99	1620
40,7	1475	34,8	1420	26,3	1390	36,1	1420	55,8	1485	77,5	1570	102,3	1621
42	1478	35,8	1430	27,2	1400	37,2	1420	57,6	1490	80	1570	105,6	1621

Anexo B: NORMA ASTM G57 (06) Re aprobada en el 2012.

Método de prueba estándar para Medida de campo de la resistividad del suelo utilizando el Wenner Método de cuatro electrodos.

Esta norma se emite bajo la designación fija G57; el número inmediatamente después de la designación indica el año de la adopción original o, en el caso de la revisión, el año de la última revisión. Un número en paréntesis indica el año de la última aprobación. Un superíndice épsilon (ϵ) indica un cambio editorial desde la última revisión o reprobación.

Alcance

- Este método de prueba cubre el equipo y los procedimientos para la medición de campo de la resistividad del suelo, tanto en un sitio, como para muestras extraídas del suelo, para su uso en el control de la corrosión de estructuras enterradas.
- Para convertir cm (unidad métrica ...) a metro (SI unit), divida por 100.
- Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de este estándar establecerlo. Adoptar prácticas prudentes de seguridad y salud y determinar la aplicación de las limitaciones regulatorias antes de su uso.

Terminología y Definiciones:

- Resistividad: la resistencia eléctrica entre caras opuestas de una unidad de cubo de material; es la inversa de la conductividad. La resistividad se usa con preferencia a la conductividad como una expresión del carácter eléctrico de los suelos (y aguas) ya que se expresa en números enteros.
- Discusión: Las medidas de resistencia indican la capacidad relativa de un medio para transportar corrientes eléctricas. Cuando una estructura metálica se sumerge en un medio conductor, la capacidad del medio para llevar corriente influirá en la magnitud de las corrientes galvánicas y las corrientes de protección catódica. El grado de polarización de los electrodos también afectará el tamaño de dichas corrientes.

Resumen del método de prueba:

- El método de los cuatro electrodos de Wenner requiere que se coloquen cuatro electrodos de metal con la misma separación en línea recta en la superficie del suelo a una profundidad que no exceda el 5% de la separación mínima de los electrodos. La separación del electrodo debe seleccionarse teniendo en cuenta los estratos de suelo de interés. La representación de medición de resistividad resultante detecta la resistividad promedio de un hemisferio de suelo de un radio igual a la separación del electrodo.

➤ Se imprime una tensión entre los electrodos externos, lo que hace que la corriente fluya, y el voltaje que se produce entre los electrodos internos se mide utilizando un voltímetro sensible. Alternativamente, la resistencia se puede medir directamente.

La resistividad, es entonces:

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = 2\pi aR \text{ (a in cm)}$$

dónde:

- a = separación de electrodos.
- R = resistencia Ω .

ASTM G57 - 06 (2012)

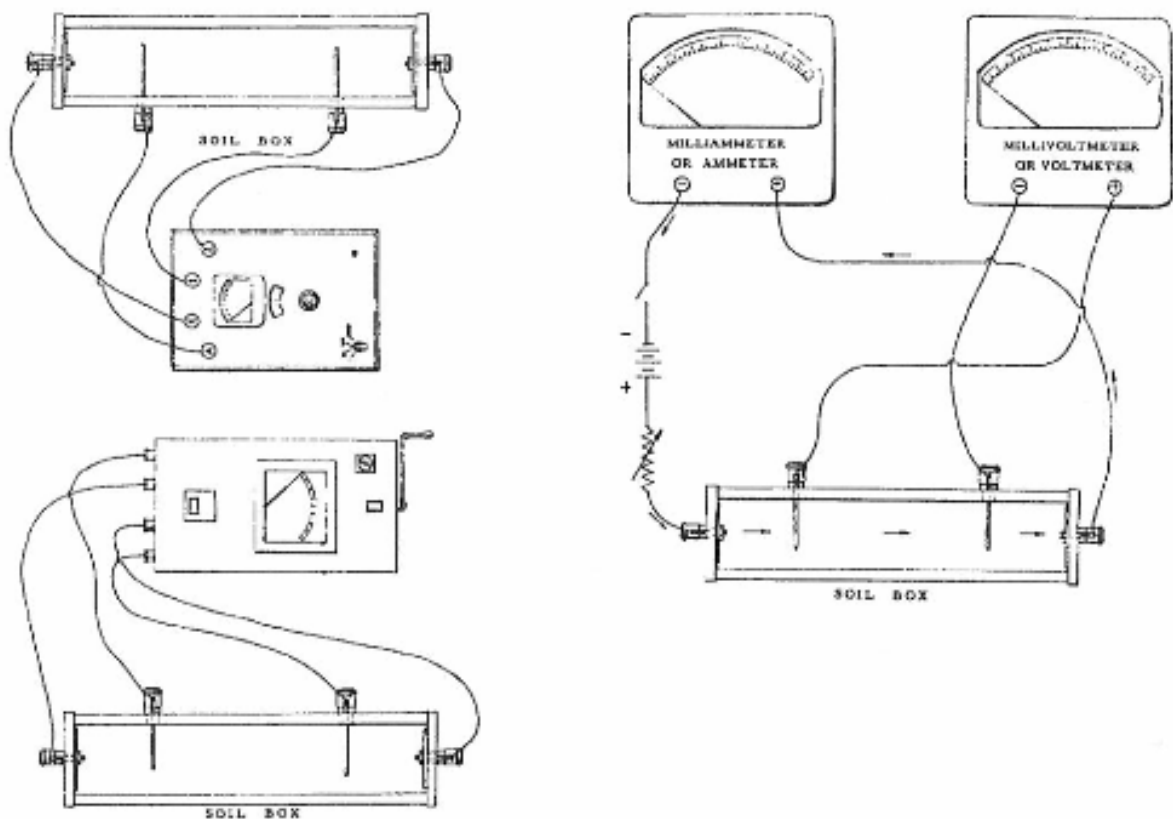


FIG. 1 Typical Connections for Use of Soil Box with Various Types of Instruments

Significado y uso: Se mide la resistividad del suelo para controlar la corrosión de las estructuras enterradas. La resistividad del suelo se usa tanto para la estimación de las tasas de corrosión esperadas como para el diseño de sistemas de protección catódica. Como un parámetro de diseño esencial para los sistemas de protección catódica, es importante tomar tantas medidas como sea necesario para obtener una caracterización suficientemente representativa del entorno del suelo que experimentará toda la estructura enterrada.

Aparato.

➤ Medidas de campo:

✓ El equipo requerido para tomar medidas de resistividad de campo en grado consiste en una fuente de corriente, un voltímetro, amperímetro o galvanómetro adecuados, cuatro electrodos metálicos y el cableado necesario para realizar las conexiones que se muestran en la Fig. 2.

✓ Fuente de corriente: Una fuente de corriente, generalmente 97 Hz, es preferido ya que el uso de mayores provocará la polarización de la mayoría de los electrodos de metal, lo que produce un error. La corriente puede ser provista por un generador de C.A acodado o por una fuente de vibración equipada. Se puede usar una fuente inalterada si los electrodos se desgastan con metal brillante antes de la inmersión, la polaridad es regular y se invierte durante la inspección, y las medidas se promedian para cada polaridad.

✓ Voltímetro: El voltímetro no extraerá corriente apreciable del circuito para evitar efectos de polarización. Se prefiere un tipo de movimiento de mano, pero un instrumento de tipo electrónico arrojará resultados satisfactorios si la impedancia de entrada del medidor es de al menos 10 mega ohmios.

✓ Electrodos: fabricados a partir de acero normal o acero inoxidable martensítico de 0,475 a 0,635 cm (3/16 a 1/4 in) con un diámetro de 30 a 60 cm (1 a 2 pies) de longitud son satisfactorios para la mayoría de las mediciones de campo. Ambos materiales pueden requerir un tratamiento térmico para que sean lo suficientemente rígidos como para ser insertados en seco o en tumba. Los electrodos deben estar formados por un mango y un terminal para terminales de cable que se encuentren permanentemente en el intervalo requerido.

✓ Cableado: alambre de cobre aislado de 18 a 22 pies. Los terminales deben ser de buena calidad para garantizar que se realice un contacto de baja resistencia en los electrodos y en el medidor. Cuando se realicen muestreos regulares con un espaciado de electrodos fijo, se puede fabricar un cable multicomponente.

➤ Medida de la muestra del suelo:

✓ El equipo requerido para la medición de la resistividad de las muestras de suelo, ya sea en el campo o en el laboratorio, es idéntico al que se requiere para

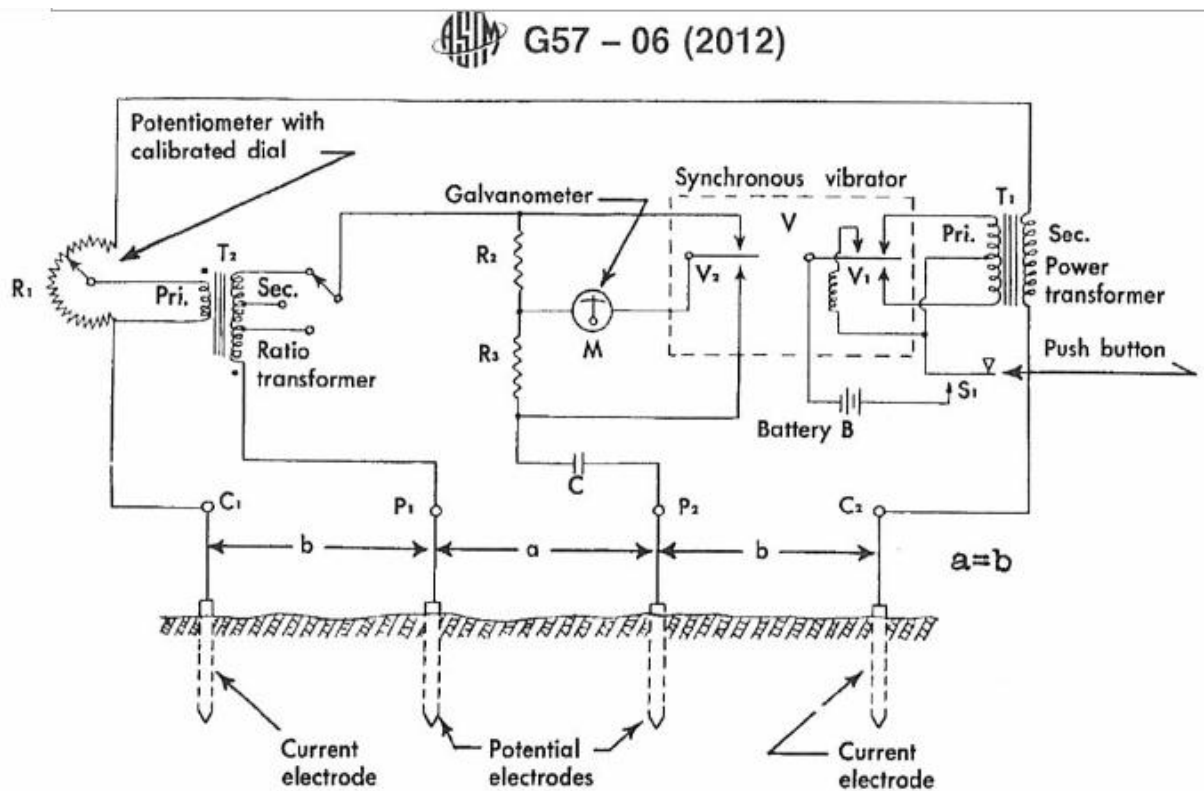
medir la pendiente, excepto que los electrodos se reemplazan por un contenedor inerte que contiene cuatro electrodos montados permanentemente (ver Fig.1).

✓ Si los electrodos que transportan corriente (afuera) no están espaciados en el mismo intervalo que los electrodos de medición potencial (adentro), la resistividad, ρ , es:

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = 95,76 \ b \ R \left(1 - \frac{b}{b+a} \right)$$

dónde:

- b = espaciamento de los electrodos externos, ft.
- a = espacio de electrodo interno, ft,
- R = resistencia, Ω .



➤ Las dimensiones de la caja. puede establecerse de modo que la resistividad se lea directamente desde el voltímetro sin más cálculos. La caja. debe ser fácilmente limpiable para evitar la contaminación por muestras anteriores.

Estandarización: Verifique periódicamente la precisión de los medidores de resistencia usando una caja de década de resistencia comercial. El error del medidor no debe exceder el 5% sobre el rango del instrumento. Si el error excede este límite, prepare una curva de calibración y corrija todas las mediciones en consecuencia. Una caja de suelo. puede ser calibrado usando soluciones de resistividad conocida. Soluciones de cloruro de sodio y agua destilada con resistividades de 1000, 5000 y 10000 Ω -cm, se recomiendan para este propósito. Estas soluciones deben prepararse en condiciones de laboratorio poco precisas utilizando un medidor de conductividad comercial, calibrado a las soluciones estándar a 20 ° C (68 ° F).

Procedimientos de campo:

➤ Medidas de campo:

✓ Seleccione la alineación de la medición para incluir una topografía uniforme sobre los límites del tramo del electrodo. No incluya bocitas no concluyentes grandes como suelo congelado, cimientos de concreto, etc., que no sean representativos del suelo de interés, en el tramo de electrodo.

✓ Seleccione espaciamientos de electrodo con respecto a la estructura de interés. Dado que la mayoría de las tuberías están instaladas a la altura de 1.5 a 4.5 m, espaciado de electrodos de 1.5, 3.0 y 4.5 m, se usan comúnmente, el espaciamiento del espaciado es igual a la profundidad máxima de interés. Para facilitar el cálculo del campo de las resistividades, espaciamientos de 1.58, 3.16, y 4.75 m, que resultan en factores de multiplicación de 1000, 2000 y 3000, se pueden usar cuando un elector se usa el instrumento galvanometría.

✓ Impresiona un voltaje a través de los electrodos externos. Mida el clico de voltaje a través de los electrodos internos y registre tanto la corriente como el voltaje si se usa un amperímetro y un voltímetro separados. Cuando se usa un resistómetro, lea la resistencia de forma indirecta y registre.

✓ Haga un registro del espaciamiento de los electrodos, resistencia o amperios y voltios, fecha, hora, temperatura del aire, topografía, clivaje, y las incrustaciones de contaminación para facilitar la interpretación posterior.

➤ Medida de la muestra del suelo:

✓ Las muestras de suelo deben ser representativas del área de interés donde el estrato de interés contiene una variedad de tipos de suelos. Es deseable muestrear cada tipo por separado. También será necesario preparar una muestra mixta. El ejemplo debe ser razonablemente grande y completamente mezcla para que sea representativo. El suelo debe estar bien compactado en capas en la caja del suelo, con espacios de aire eliminados en la medida de lo posible. Llena la caja Avance hasta la parte superior y tome medidas como anteriormente se dijo. El medidor utilizado puede limitar la parte superior

rango de resistividad, que se puede medir. En tales casos, la resistividad debe registrarse como $<10000 \Omega \cdot \text{cm}$, y así sucesivamente.

ASNT G57 – 06 (2012)

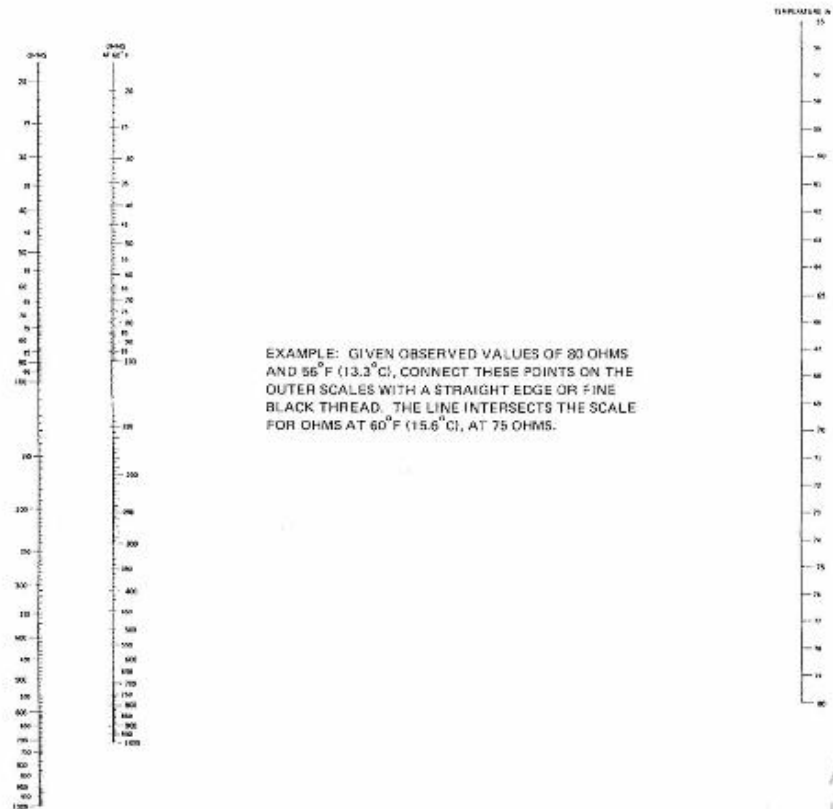


FIG. 3 Nomogram or Conversion Chart for Reducing Soil Paste Resistance in ohms at a Particular Temperature as Measured in the Bureau of Soils Cup, to Resistance at 15.6°C (60°F)

✓ La resistividad medida será dependiente sobre el grado de compactación, contenido de humedad, solubilidad del constituyente y temperatura. El efecto de las variaciones en la compactación y el contenido de humedad se puede reducir saturando completamente la muestra antes de colocarla en la caja. Esto se puede hacer preparando una suspensión espesa de la muestra, agregando solo agua suficiente para que produzca una pequeña cantidad de agua superficial, que debe dejarse evaporar antes de volver a mezclar la lechada y colocarla en la caja. Donde esté disponible, use agua subterránea de la excavación de muestra para la saturación. De lo contrario, use agua destilada. Si se espera que la resistividad del suelo sea inferior a $10000 \Omega \cdot \text{cm}$, se puede usar agua corriente local sin introducir un error grave. Algunos suelos absorben humedad lentamente y contienen constituyentes que se disuelven lentamente, y la resistividad puede no estabilizarse desde 24 horas después de la saturación. La medición saturada proporcionará una resistividad mínima próxima, y puede ser útil en comparación

con medidores de resistividad "recibidos". El agua excedente no se debe vaciar, ya que esto revertirá los componentes solubles.

✓ La corrección de la temperatura no será necesaria si se mide la certeza se maculó en el momento o inmediatamente después de tomar la muestra. Si las muestras se retienen para una medición posterior, corrija la resistencia si la temperatura de medición es sustancialmente diferente de la temperatura de tierra. Se recomienda una corrección a 15.5 °C (60°F) si la temperatura de la muestra excede los 21 °C (70°F).

$$R_{15,5} - R_T \left(\frac{24,5+T}{40} \right)$$

Donde:

- T = temperatura del suelo, °C.
- R_T = resistividad a T °C.

Planificación e Interpretación:

➤ Planificación:

✓ Las encuestas se realizarán a intervalos regulares o aleatorios. El primer método es adecuado para la presentación gráfica y el trazado de la resistividad frente a la distancia, e identificará gradientes y cambios abruptos en el estado del suelo. Este último método permite un tratamiento matemático preciso, como el análisis de probabilidad acumulativo. Este método de prueba permite la determinación de la probabilidad de la presencia de un suelo con una