

**RECUPERACIÓN DE MATERIALES METÁLICOS EN ESCORIAS DEL
PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO EN LA EMPRESA HB
SADELEC.**

RAÚL CHINOME MORENO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE METALURGIA

UPTC-TUNJA

2018

**RECUPERACIÓN DE MATERIALES METÁLICOS EN ESCORIAS DEL
PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO SUMERGIDO EN LA EMPRESA HB
SADELEC.**

RAÚL CHINOME MORENO

DIRECTOR: Mcs. FABIO RAÚL PÉREZ VILLAMIL

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO**

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE METALURGIA

UPTC-TUNJA

2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Especialmente dedico este trabajo en primer lugar a Dios por el don de la vida, su protección y la oportunidad de terminar esta profesión.

A mi Mama y mi Papa, porque sin sus esfuerzos, amor, paciencia y apoyo incondicional durante estos años de formación, no lo hubiera logrado.

A mis Hermanas y Novia, mujeres que su cariño me inspiraron y fortalecieron hasta el día de hoy.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, la FACULTAD DE INGENIERÍA y a mi amada ESCUELA DE METALURGIA, por la oportunidad de haber vivido tantas experiencias de conocimiento durante este tiempo de formación profesional.

Al Ing. FABIO RAUL PEREZ VILLAMIL, por todos sus conocimientos expresados como profesor, por toda su colaboración durante la dirección de este trabajo, pero especialmente por ser un libro abierto con los estudiantes.

A la Dr. LAIS MUJICA ROSERY, por haberme permitido vivir la experiencia de conocimiento más grande de mi formación; la de haber participado en el proyecto de MAQUINA DE COLADA CONTINUA en la empresa GERDAU DIACO – TUTA.

A todos mis Profesores e Ingenieros por todo su conocimiento transmitidos, tanto de academia como de vida propia, para formarnos como profesionales íntegros, con valores y competitivos.

A la empresa GERDAU DIACO PLANTA TUTA y todo su personal, por abrirme las puertas, para poder poner en práctica mis conocimientos, aprender muchas cosas nuevas y saber a lo que nos enfrentamos como profesionales en la industria.

A mis amigos y compañeros, por tantas horas de estudio, traspasos, tristezas, alegrías, experiencias y festejo de la academia.

A todos ustedes mil gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
JUSTIFICACIÓN	14
1 MARCO TEÓRICO	15
1.1 EMPRESA HB SADELEC	15
1.1.1 Historia	15
1.1.2 Valores corporativos	16
1.1.3 Presencia de sedes de la empresa HB sadelec	17
1.1.4 Productos y servicios	18
1.2 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO	22
1.2.1 Productos de aporte	25
1.3 HORNO DE INDUCCIÓN	43
1.4 MATERIALES REFRACTARIOS	44
1.5 CRISOLES	45
1.6 FUSIÓN DE ESCORIAS EN HORNO DE INDUCCIÓN	47
1.6.1 Descomposición por fusión	47
1.6.2 Fundentes	47
2 METODOLOGÍA	51
2.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO	51
Computadores y software	51
Equipos	51
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	52
2.3 DISEÑO METODOLÓGICO	52
2.4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	53
2.4.1 Fabricación de crisoles laboratorios de metalurgia uptc	53
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE ARCO SUMERGIDO	57
2.6 FUSIÓN DE LAS MUESTRAS	59
2.6.1 Procedimiento de fusión	60
2.6.2 Refusión de botones metálicos	62
2.7 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DESPUÉS DE FUSIÓN	65
2.8 SOFTWARE SLAGAN3	65

3 ANÁLISIS Y RESULTADOS	66
3.1 RESULTADOS DE ENSAYO DE FRX.....	66
3.2 ANÁLISIS DE SOFTWARE SLAGAN3	67
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS.....	69
3.4 ANÁLISIS FUSIÓN DE LAS ESCORIAS DE SAW	69
3.4.1 Reacciones en la fusión	70
3.5 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN DE CHISPA	72
3.5.1 Resultados espectroscopia de emisión de chispa	73
3.6 ANÁLISIS DE ESCORIAS POR DRX	79
3.6.1 Composición de la escorias antes de fundir.....	79
3.6.2 Análisis de escorias con fundentes	81
4 CONCLUSIONES	86
5 RECOMENDACIONES.....	88
6 BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Intensidad de corriente usada.....	25
Tabla 2. Características y aplicaciones de los flux.....	36
Tabla 3. Índice del comportamiento metalúrgico.....	38
Tabla 4. Composición química concrax 1700	54
Tabla 5. Resultados FRX.....	66
Tabla 6. Tabla de FRX articulo	67
Tabla 7. Caracterización de las escorias de SAW	69
Tabla 8. Porcentaje metal recuperado por fundente.....	70
Tabla 8. Porcentaje de elementos recuperado en pequeñas trazas	73
Tabla 9. Recuperación de materiales ferroaleantes.....	75
Tabla 10. Porcentaje de elementos indeseados recuperados	76
Tabla 11. Porcentaje de recuperación de metales de mayor interés	78
Tabla 12. Especies mineralógicas encontradas antes y después de las fusiones con diferentes fundentes.....	83

LISTAS DE GRAFICAS

Gráfica 1. Porcentajes recuperados de metal de las SAWS.....	71
Gráfica 2. Representación de recuperación metálica en pequeñas trazas	74
Gráfica 3. Representación de la recuperación de elementos ferroaleantes.....	75
Gráfica 4. Representación de la recuperación de elementos indeseados.	77
Gráfica 5. Representación de la recuperación de metales de interés.....	79
Gráfica 6. Difractograma DRX escoria base	80
Gráfica 7. Representación porcentual de las especies en la escoria base.	81
Gráfica 8. Difractogramas escorias con fundentes carbonato de sodio y bórax ...	82
Gráfica 9. Difractogramas escorias con fundentes caliza y tetraborato de litio	82
Gráfica 10. Representación porcentual de las especies mineralógicas en SAWS después de las fusiones.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Presencia de HB Sadelec en el mundo.	17
Figura 2. Estructuras fabricadas HB Sadelec.	18
Figura 3. Puentes fabricados por HB Sadelec.	18
Figura 4. Torres fabricados por HB Sadelec.	19
Figura 5. Soporte fabricados por HB Sadelec.	19
Figura 6. Industrias fabricados por HB Sadelec.	20
Figura 7. Plantas fabricados por HB Sadelec.	20
Figura 8. Redes de tuberías fabricados por HB Sadelec.	21
Figura 9. Teleféricos fabricados por HB Sadelec.	21
Figura 10. Hidroeléctrica fabricados por HB Sadelec.	22
Figura 11. Proceso de arco sumergido.	23
Figura 12. Soldeo por arco sumergido.	24
Figura 13. Modelos de aplicación de arco sumergido.	24
Figura 14. Clasificación de 760.	38
Figura 15. Clasificación norma EN 756.	39
Figura 16. Manejo del flux.	42
Figura 17. Bobina de inducción.	43
Figura 18. Crisoles de grafito y carburo de silicio.	46
Figura 19. Crisol de cerámica.	46
Figura 20. Diagrama de metodología.	52
Figura 21. Fabricación de matriz para crisol.	53

Figura 22. Desmontaje de las matrices de los crisoles.	55
Figura 23. Curva de calentamiento del crisol a 1050°C.	55
Figura 24. Crisoles recosidos en mufla de alta temperatura.	56
Figura 25. Crisoles recosido a alta temperatura.	57
Figura 26. Escoria de arco sumergido, depues del proceso de soldadura.	57
Figura 27. Escorias trituradas.	58
Figura 28. Muestra para pulverización.	58
Figura 29. Muestra para ensayo de DRX.	59
Figura 30. Equipo de DRX.	59
Figura 31. Mezcla de Escoria con Fundente.	60
Figura 32. Panel principal Horno de inducción.	60
Figura 33. Fusión en bobina de Horno de Inducción.	61
Figura 34. Retirado de escoria del Crisol.	61
Figura 35. Crisoles cerámicos para refusión de botones.	63
Figura 36. Cargue de crisol cerámico en crisol SiC	63
Figura 37. Crisoles cargados dentro de bobina de indccion	64
Figura 38. Refusión de botone en horno de inducción.	64
Figura 39. Espectrómetro Q8 Magellan.	65
Figura 40. Ingreso de datos al software SlagAn3.	68
Figura 41. Resultados de las propiedades físicas de las escorias.	68
Figura 42. Fusión de escorias en horno de inducción.	70
Figura 43. Muestras para espectroscopia de chispa.	72

RESUMEN

Uno de los grandes problemas a los que se enfrentan las industrias, es la producción de desechos, que por general no tiene un estudio adecuado para darles un uso o aprovechamiento específicos en la industria. Los métodos más adecuados en la recuperación de elementos metálicos es por vía hidrometalurgia lixiviando compuestos y reducción de elementos por fusiones parciales o completas.

En el caso de la empresa HB Sadelec, produce desechos de escorias del proceso de soldadura de arco sumergido, donde se vio el interés de realizarse una serie de estudios para poder determinar un posible uso.

En esta investigación, realizada en la UPTC, se tomaron varios kilos de escorias del proceso de soldadura de arco sumergido, que proporciono la empresa, a las cuales se les hizo una serie de ensayos para su caracterización y así realizar una serie de fusiones en horno de inducción a mezclas de escorias con diferentes tipos de fundentes, para realizar la extracción de elementos metálicos, a los cuales también se les realizaron unas series de ensayos de caracterización.

Con los resultados obtenidos se procedió a un análisis, específicamente de la parte metalúrgica, desde el momento de la caracterización, proceso de fusión y muestras obtenidas, para justificar y dar conclusiones concretas sobre el estudio, donde el proyecto se centra en un posible beneficio económico para la empresa y una ayuda en el cuidado del medio ambiente, recuperando elementos de gran valor como el manganeso, silicio, hierro entre otros.

INTRODUCCIÓN

A diario, las empresas dedicadas a la fabricación de estructuras metálicas producen desechos sólidos que corresponden a escorias de procesos de soldaduras, que están contaminando y ocupando espacio en el medio, pero a su vez estos desechos son ricos en metales y compuestos, que mediante estrategias y estudios adecuados podemos recuperar una gran parte ellos.

Debido a que estas escoria no tiene un uso específico como subproducto o materia prima actualmente, el proyecto de investigación se centra específicamente, en realizar una serie de estudios, para establecer si es posible recuperar materiales metálico, y de ser así, que tipos, cantidades de compuestos y elementos metálicos se pueden recuperar de las escorias del proceso de soldadura de arco sumergido de esta empresa, mediante técnicas de caracterización y procesos de fusión con fundentes alcalinos, donde a las muestras obtenidas se les realizara unas series de pruebas para cualificar y cuantificar la composiciones obtenidas.

Esta serie de estudios se realizan, para poder darles una nueva aplicación como un subproducto y de estas escorias, lograr recuperar la mayor cantidad de materiales, especialmente metálicos, evitando que estas escorias sigan ocupando espacios, produciendo costos adicionales a la empresa y sobretodo así contribuir al cuidado del medio ambiente, reutilizando elementos metálicos, que cada día es más difícil su extracción y además destruyendo nuestros recursos naturales.

JUSTIFICACIÓN

La multinacional HB Sadelec, dedicada a fabricación de estructuras livianas y pesadas en acero, produce ,en solo la planta de Bogotá, desechos que anualmente superan cientos de toneladas, donde la mayoría de estos desechos corresponde a escoria producida en el proceso de soldadura de arco sumergido, los cuales proporcionan un gasto adicional para la empresa, ya que tienen que trasportarse, buscar un lugar para su depósito, contribuyendo a ocupar espacios en rellenos y a su vez contaminado el medio ambiente.

Es por esto, que surge la idea de desarrollar una serie de estudios de caracterización de materiales y fundición a estas escorias, para así darles una nueva aplicación como un subproducto y de este, lograr recuperar la mayor cantidad de materiales, especialmente metálicos, evitando que estas escorias sigan ocupando espacios, produciendo costos adicionales a la empresa y sobretodo así contribuir al cuidado del medio ambiente, reutilizando elementos metálicos, que cada día es más difícil su extracción de la tierra y además destruyendo nuestros recursos naturales.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 EMPRESA HB SADELEC

1.1.1 Historia

HB es la primera compañía en la fabricación de estructuras metálicas, fundada en Colombia en el año 1945 y que pertenece al GRUPO ETHUSS desde 1993.

SADELEC es la segunda compañía del GRUPO ETHUSS fundada por su presidente en el año 1995 complementando las actividades de Eléctricas de Medellín, al fabricar las Torres por las líneas de transmisión.

Unido al desarrollo del país, HB diversifica sus productos, manteniendo y mejorando sus procesos con la modernización de la planta; desde los años 40 y 50, se fabrican todo tipo de estructuras metálicas para el desarrollo industrial de la época, Bodegas, Cubiertas, Fábricas, Industrias completas, Almacenes, Edificios y talleres; Así como todo tipo de puentes para el desarrollo de la infraestructura vial y férrea del país.

En los años 60 y 70 HB participa, en la construcción de proyectos para las industrias del sector cementero, azucarero y siderúrgico; Para los años 80 y 90 con el desarrollo y ampliación de los negocios se inicia la participación en los sectores energético, minero, petrolero, institucional y comercial.

Con la expansión del sistema de interconexión eléctrico nacional, SADELEC fabrica estructuras en acero galvanizado para las torres de las líneas de transmisión eléctrica hasta 500Kv y para los pórticos y soportes de equipos para las subestaciones eléctricas de todas las empresas del sector energético del país y Latinoamérica.

Con el desarrollo de las TIC, SADELEC fabrica estructuras metálicas utilizadas en la expansión de las Redes de Telecomunicaciones, como torres Autosoportadas, Monopolos, soluciones Fast-Deployment, entre otros; así como ejecutar contratos "Llave en Mano" en el despliegue de las redes celulares 2G, 3G, 4G-LTE que van desde la Búsqueda y Adquisición de los predios, Diseño, Fabricación, Construcción e implementación de las electrónica (BTS, Enlaces Microondas, Satelitales, etc).

HB por sus tipos de productos solo hace presencia fuera del país en casos especiales, pero mantiene la búsqueda de oportunidades, ejecutando obras en Ecuador y Venezuela, así mismo ha suministrado estructuras para Costa Rica, República Dominicana, Panamá, Chile, Ecuador y Venezuela por medios marítimos.

En el año 2003, SADELEC se constituye en empresa exportadora de la mano de Eléctricas de Medellín con las torres para las líneas de transmisión, ampliando su portafolio de clientes y productos a la mayoría de países de Suramérica, Centroamérica y el Caribe.

En el año 2000 HB y SADELEC, en las mismas instalaciones, se unen operativamente y desde entonces HBSADELEC se constituye en la más grande organización de construcción en acero del país, con una capacidad instalada para producir más de 40.000 toneladas por año.

La Experiencia y Solidez de HBSADELEC nos lleva incursionar en infraestructura vial, participando en concesiones viales, A.P.P. y más de 20 proyectos de construcción de vías; para el sector energético realiza más de 10 proyectos hidroeléctricos como inversionista, constructor en todos los campos y posterior operación.

En el 2011, funda oficina en Perú con proyectos para las dos empresas, ampliando su presencia a nivel internacional.

1.1.2 Valores corporativos

1.1.2.1 Misión:

En HB SADELEC, construimos productos y estructuras con acero y gerenciamos, desarrollamos e invertimos en proyectos de ingeniería, ofreciendo soluciones integrales al mercado nacional y regional.

Ofrecemos respaldo, solidez, experiencia, y contamos con aliados estratégicos, recurso humano talentoso y tecnología, para garantizar altos estándares de calidad y cumplimiento.

Generamos rentabilidad a los accionistas, satisfacción a los clientes, bienestar a los empleados y protección al ambiente.

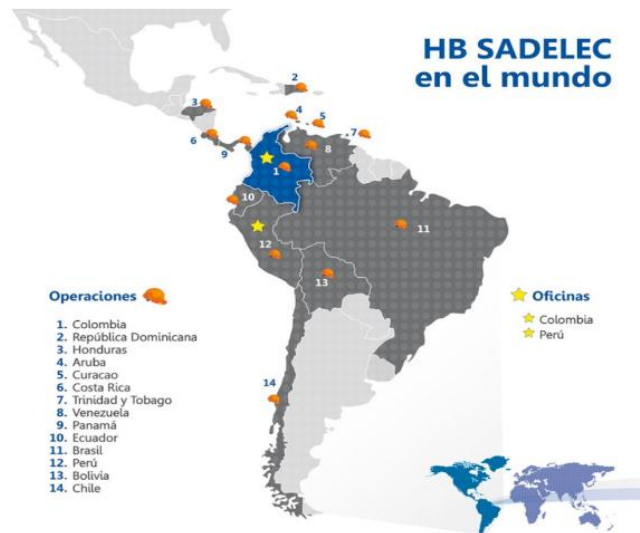
1.1.2.2 Visión:

Seremos la opción más competitiva en proyectos de ingeniería y construcción de productos y estructuras con acero, para mantener nuestro liderazgo en Colombia y tener una destacada posición en América Latina.

Nuestro crecimiento rentable seguirá soportado en las sinergias con aliados estratégicos, en el desarrollo de negocios afines, y en procesos de fabricación automatizados.

1.1.3 Presencia de sedes de la empresa HB sadelec

Figura 1. Presencia de HB Sadelec en el mundo.



Fuente: www.hbsadelec.com.pe/quienes.html

1.1.4 Productos y servicios

1.1.4.1 Estructuras metálicas

Construcción de bodegas, cubiertas, fábricas, almacenes, edificios y talleres para las empresas más importantes del país. HB SADELEC ha sido protagonista del desarrollo y crecimiento de las empresas del sector cementero, azucarero, siderúrgico, energético, minero, petrolero y comercial.

Figura 2. Estructuras fabricadas HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

1.1.4.2 Puentes

Figura 3. Puentes fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

Con más de 65 años en la construcción de puentes en el territorio nacional, HB SADELEC es la empresa más importante y con mayor trayectoria en la fabricación de toda clase de puentes, muestra indiscutible del progreso de la infraestructura.

1.1.4.3 Torres

Figura 4. Torres fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

Por más de 30 años, HB SADELEC, se especializa en el diseño y la fabricación de torres metálicas galvanizadas, las cuales han sido instaladas en Colombia, Centro y Suramérica, cumpliendo los requerimientos exigidos por los clientes que suministran el servicio de energía eléctrica. Así mismo, en la fabricación de torres, antenas, monopolos y la construcción de proyectos para el sector TIC – Tecnología, Informática y Comunicaciones.

1.1.4.4 Pórticos y soportes

Figura 5. Soporte fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

Complemento de la fabricación de torres para líneas de transmisión, HB SADELEC diseña y fabrica pórticos de entrada, intermedios y salida, y soportes metálicos para los equipos en las subestaciones eléctricas.

1.1.4.5 Equipos para la industria

Figura 6. Industrias fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

HB SADELEC desde sus inicios ha fabricado cerca de 20.000 toneladas de plantas y equipos para los sectores cementero, siderúrgico, azucarero, mineros e hidrocarburos.

1.1.4.6 Tanques atmosféricos

Figura 7. Plantas fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

HB SADELEC, ha construido, modificado y reparado más de 110 tanques API con capacidades hasta de 250.000 barriles y más de 250 recipientes ASME (aproximadamente 50 tienen el estampe), en los diversos tipos y calidades de

materiales. Su instalación, según requerimiento se puede hacer sobre patines para que funcionen como unidades de proceso independientes.

1.1.4.7 Tuberías a presión

Figura 8. Redes de tuberías fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

Para su fabricación cuenta con equipos con una capacidad de rolado hasta 60mm de espesor, en anchos hasta 2.4 y 3.0 mts. y con diámetros desde 0.5 mts., permitiendo ofrecer tuberías y blindajes de excelente calidad en el mismo momento en que sea creado un nuevo proyecto hidroeléctrico.

1.1.4.8 Estructuras especiales

Figura 9. Teleféricos fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

HB SADELEC, ha construido transportadores y elevadores, reconstrucción de vagones y góndolas, construcción de plataformas carrotanques férreos y

vehiculares; precipitadores electrostáticos y filtro de mangas, paquetización y modularización de equipos sobre patines.

1.1.4.9 Hidroeléctricas

Figura 10. Hidroeléctricas fabricados por HB Sadelec.



Fuente: <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

Con la experiencia y solidez, HB SADELEC desarrolla para el sector energético, Hidroeléctricas participando en todo el proceso como inversionista, constructor y también incursionando en la operación de todo el proyecto¹.

1.2 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

El proceso de soldadura por arco sumergido, o método SAW, consiste en la fusión de un electrodo continuo, que puede ser macizo o tubular, protegida por la escoria generada por un flux (*), granulada o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado.

El proceso de Arco Sumergido permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de excelente calidad (tasas de deposición de hasta 50 kg/hr) a bajo coste para una amplia gama de aplicaciones. El sistema es totalmente automático y permite obtener grandes rendimientos en producción. Se puede usar también como un proceso semiautomático, mediante una pistola manual, similar a la que se usa en soldadura MIG/MAG, pero con diámetros de hilo mayores (hasta 2,4 mm) y, de forma parecida a como en el proceso MIG se aportaría gas de

¹ <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>

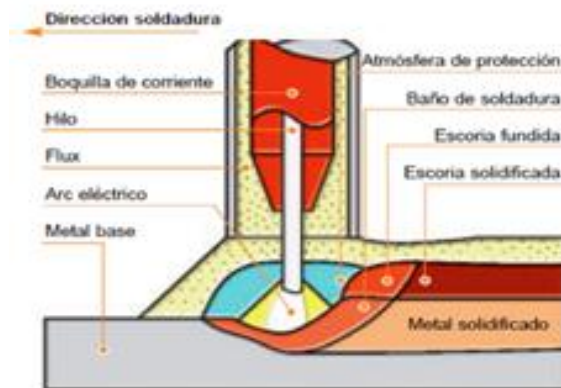
protección, se aporta en este caso el flux que nos viene alimentado de un tanque a presión.

El arco eléctrico se establece entre el electrodo metálico y la pieza a soldar. Como electrodos, pueden utilizarse uno o varios alambres o hilos simultáneamente o bien flejes o bandas.

El flux protege el arco y el baño de fusión de la atmósfera circundante, de tal manera que ambos permanecen invisibles durante el proceso. Parte del flux se funde con un papel similar al del recubrimiento en los electrodos revestidos: protege el arco, lo estabiliza, genera una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso permite añadir elementos de aleación o compensar la pérdida de ellos. El resto de flux, no fundido, puede recuperarse y reciclarse en el proceso².

La figura 11 muestra cómo funciona el proceso de arco sumergido.

Figura 11. Proceso de arco sumergido.

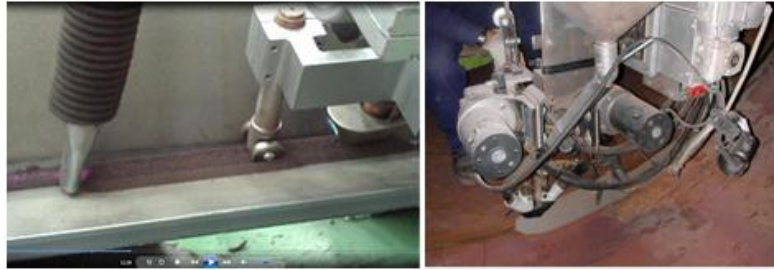


Fuente: www.solysol.com.es

La figura 12 son ejemplos reales en el que se pueden distinguir los elementos fundamentales del arco.

² Lázaro Martín Angela "Soldeo por arco sumergido" www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura%3D20por%3D20Arco%3D20Sumergido%3D20Curso%3D20Completo.pdf+%&cd=14&hl=es-419&ct=clnk&gl=co. Pdf. Pp 2-4

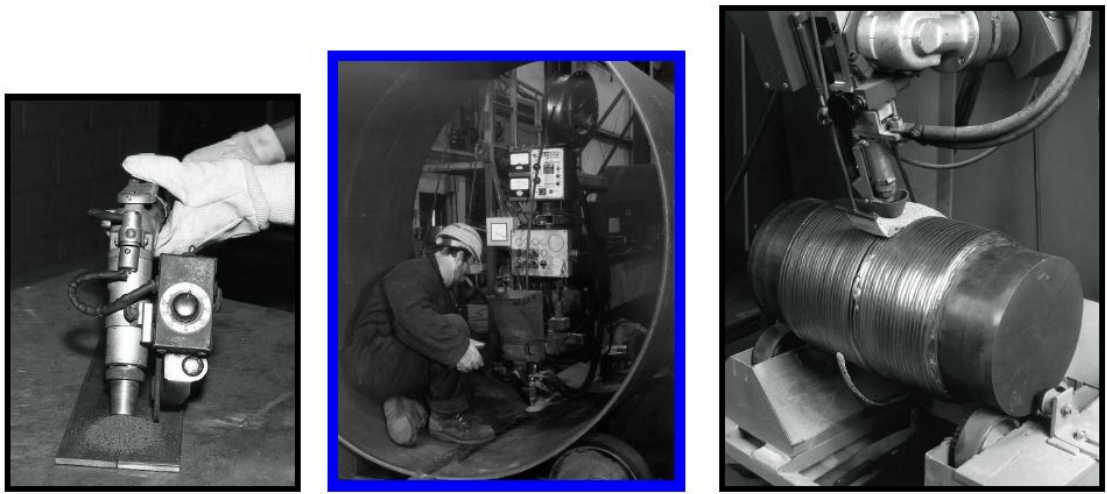
Figura 12. Soldeo por arco sumergido.



Fuente: www.solysol.com.es

En la figura 13 se observan diferentes modelos de aplicaciones prácticas en equipos industriales.

Figura 13. Modelos de aplicación de arco sumergido.



a) Soldadura semiautomática

b) Soldadura con Columna

c) Soldadura en estación fija

Fuente: www.solysol.com.es

1.2.1 Productos de aporte

1.2.1.1 Electrodo

Existen electrodos para soldar aceros al carbono, de baja aleación, de alto contenido en carbono, aleados, inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para aplicaciones de recargues. Los electrodos se suministran en forma de alambre sólido o tubular con flux o metal en polvo en su interior, y en forma de fleje o banda, especiales para depósitos por recargue. Estos últimos pueden depositarse mediante el proceso de soldadura de Arco Sumergido que nos ocupa, o bien mediante el proceso de soldadura por Electro-Escoria, no considerado un proceso de soldadura al arco sino de estado sólido. Normalmente se presentan enrollados en carretes de 10 a 500 kg de peso o en bidones de 100 a 1000kg, mientras que el fleje se suministra en bobinas. Los electrodos de acero se recubren de cobre, excepto para soldaduras de materiales resistentes a la corrosión, ciertas aplicaciones nucleares o la fabricación de reactores para la industria del petróleo y petroquímica. El recubrimiento de cobre evita la corrosión, mejora el contacto eléctrico y disminuye el rozamiento del hilo con el dispositivo de alimentación³. El diámetro del hilo varía normalmente desde 1,6 mm a 6,4 mm. La gama de intensidades usuales es la siguiente:

Tabla 1. Intensidad de corriente usada.

Diámetro mm	Rango de intensidades Amperios
1,6	150 - 300
2	200 - 400
2,4	250 - 500
3,2	300 - 600
4	400 - 800
4,8	500 - 1000
5,6	600 - 1200
6,4	700 - 1600

Fuente: www.solysol.com.es

³ Lázaro Martín Ángela "Soldeo por arco sumergido" www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura%3D20por%3D20Arco%3D20Sumergido%3D20Curso%3D20Completo.pdf+%&cd=14&hl=es-419&ct=clnk&gl=co. Pdf. Pp 9-10

1.2.1.2 Fluxes

Son compuestos minerales mezclados. Entre ellos se encuentran SiO₂, TiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, MnO, K₂O, Na₂O, Li₂O, FeO, ZrO₂ y CaF₂.

Como ocurre con los electrodos revestidos para soldadura manual, el fabricante del flux se reserva la composición química completa del mismo y todo lo más ofrece porcentajes parciales de elementos agrupados por familias que ejercen una acción similar. Según el sistema de fabricación se dividen en:

a. Fluxes fundidos.

En los fluxes fundidos (fused o prefused) la materia prima se mezcla en seco y se funde posteriormente en un horno eléctrico a una temperatura entre 1500°C y 1700°C. Después de la fusión y de cualquier adición final, la carga del horno es colada y enfriada. El enfriamiento se produce por el paso de la mezcla fundida a través de una corriente de agua. El resultado es un producto con apariencia cristalina que es triturado, cribado para clasificación según tamaño y envasado.

Los fluxes fundidos tienen las siguientes ventajas:

- Buena homogeneidad química.
- Fácil eliminación de los finos, sin que afecte la composición del flux.
- Normalmente no higroscópicos, lo que simplifica su manejo y almacenamiento, al mismo tiempo que elimina problemas de soldadura.
- Permiten el reciclado, sin cambios significativos en la composición de las partículas.
- Adecuados para las más altas velocidades de trabajo en la operación de soldeo.

La mayor limitación consiste en la dificultad de añadir desoxidantes y ferroaleaciones durante su fabricación, sin segregaciones o pérdidas elevadas. La causa es la alta temperatura asociada a la fusión de las materias primas. Esto supone que no puedan usarse en algunas aplicaciones, como en juntas estrechas o cuando los requerimientos de propiedades mecánicas son elevados. Además no se pueden obtener en grados básicos o neutros.

Existe una limitación en la intensidad máxima de utilización a efectos de estabilidad de elementos de flux, que aproximadamente es de 800 A. Al no ser

higroscópicos, es suficiente tratarlos a unos 200°C para eliminar la posible humedad.

b. Fluxes cohesionados

En la fabricación de un flux cohesionado (bonded), las materias primas son pulverizadas, mezcladas en seco y cohesionadas con silicato potásico, silicato sódico o una mezcla de ambos. Esta parte de la fabricación es similar a la de la pasta de los electrodos revestidos. Después del cohesionado, la mezcla húmeda es sinterizada y cocida a una temperatura relativamente baja. Los “pellets” se rompen por machaqueo, se criban para clasificación al tamaño deseado y se envasan en sacos de PVC para protegerlos de la humedad.

Las ventajas de los fluxes cohesionados son:

- Es posible la adición de desoxidantes y elementos de aleación, gracias a la baja temperatura inherente al proceso. Los elementos de aleación pueden añadirse ya sea como ferroaleaciones o como metales elementales, para producir aleaciones que no están disponibles en el mercado como electrodos para uso manual o bien para ajustar la composición del metal depositado.
- Al ser baja la densidad de estos fluxes permiten una capa de flux más gruesa en la soldadura.
- Las escorias solidificadas son fácilmente eliminables.

Las limitaciones son:

- Tendencia a absorber humedad, de la misma manera que el recubrimiento de los electrodos revestidos, lo cual da lugar a posible formación de porosidades o fisuración por hidrógeno, a causa de la absorción de humedad.
- Posible cambio en la composición de flux, debido a la segregación o pérdida de las partículas finas.

La intensidad máxima de corriente para estos fluxes oscila entre 800-1000 A. Estos tipos de fluxes están muy en desuso.

c. Fluxes mezclados mecánicamente

Para producir un flux de este tipo, el fabricante o el usuario pueden mezclar dos o más fluxes fundidos, cohesionados o aglomerados entre los comercialmente disponibles en la proporción necesaria para conseguir los resultados deseados.

Los inconvenientes son:

- Segregaciones durante su envasado, almacenamiento o manipulación.
- Segregaciones en el sistema de alimentación y recuperación durante la operación de soldeo.
- Posible inconsistencia de flux resultante de la mezcla.

Estos fluxes también están en desuso, siendo los más utilizados los fluxes aglomerados.

d. Fluxes aglomerados

Son el tipo de flux más utilizado actualmente en la industria. Las materias primas son óxidos de hierro, productos químicos tales como silicatos, fluoruros, carbonatos, etc. Estas sustancias cumplen con objetivos diversos como escorificación viscosidad, desoxidación, ionización, etc.

Ciertos fabricantes suelen expresar los contenidos de componentes, agrupados por familias:



El proceso de fabricación es similar al de los cohesionados, excepto que se utiliza un aglomerante cerámico en lugar de un silicato. El aglomerante cerámico requiere un secado a temperaturas relativamente elevadas.

Después de secos, se tamizan para conseguir la granulometría deseada. Los fluxes aglomerados se consideran cerámicos porque no han sido fundidos. Presentan una superficie muy porosa y suelen ser higroscópicos, por lo que se recomienda que su embalaje sea estanco, además de que puede requerirse su resecado antes de usarlos o el mantenimiento en ambientes secos, tal como el ejemplo de Recomendaciones de almacenamiento que se da más adelante.

Se distinguen de los fundidos porque:

- Aportan mayor cantidad de elementos al metal depositado.
- Se pueden utilizar con hilos no aleados.
- Su actividad química es muy variada. Se distinguen entre fluxes activos, neutros o aleados según si aportan algunos elementos de aleación al metal depositado adicional al aporte del hilo consumible, o bien entre fluxes básicos, ácidos, rutilos o mezcla de ellos, según el tipo de escoria que forman y las propiedades mecánicas que favorecen en el metal depositado.
- El consumo de flux es menor.

La transferencia de Mn procedente del flux al metal depositado es cinco veces mayor en los aglomerados que los fundidos. Por esta razón pueden utilizarse hilos con 0,5% de Mn en el primer caso, precisándose hilos con el 2% de Mn en el caso de fluxes fundidos.

Una ventaja esencial es su baja densidad aparente. La consecuencia es que en el arco se funde o escorifica poco flux. Como resultado, el consumo es de 0,9 kg de flux aglomerado frente a 1,3 kg de flux fundido/kg de hilo (en condiciones óptimas de recuperación y reciclado del flux durante la soldadura).

En este tipo de flux, la intensidad máxima de utilización suele ser mayor que en los fundidos y oscila entre 800 y 1200 A, en función de la naturaleza de los componentes. La temperatura para eliminar la posible humedad también es superior y se sitúa en torno a los 300°C.

1.2.1.3 Ejemplo de recomendaciones de almacenamiento y secado de los fluxes para arco sumergido

a. Almacenamiento

Los fluxes aglomerados en sacos de plástico, almacenados en su embalaje original, no dañado, requieren las siguientes condiciones de almacenamiento a fin de evitar una absorción excesiva de humedad.

- Temperatura superior en 5°C como mínimo, en relación a la temperatura ambiente.

- El flux mantenido en su embalaje de origen, debe almacenarse a cubierto sin contacto directo con el agua (lluvia o condensación).

b. Secado

-Condiciones de Almacenamiento: Temperatura > ambiente + 5°C

-Tiempo de almacenamiento:

- De 0 a 6 meses : Utilizar tal cual
- De 6 meses a 3 años : Secar de 1 a 2 horas a 300-375°C
- El secado debe efectuarse con el flux fuera de su embalaje, en una estufa ya calentada a la temperatura deseada.
- Se recomienda que la estufa tenga circulación de aire y evacuación de la atmósfera.
- El flux debe colocarse lo más extendido posible, no debiendo sobrepasar los 3cm. de altura.
- La operación de secado puede efectuarse un máximo de 4 veces.
- El flux secado, listo para la soldadura, se mantendrá seco durante un tiempo ilimitado, manteniéndolo a una temperatura de 50-120°C.

1.2.1.4 Reciclaje

El flux no consumido, recogido después del fin de la soldadura, deberá ser depurado de cualquier tipo de contaminante (escoria, metal, etc.) Se evitarán los daños sufridos por el flux en los sistemas de aspiración y de reciclaje. La adición de un 10 a un 40% de flux nuevo, contribuirá a mantener la granulometría inicial del flux.

1.2.1.5 Clasificación de los fluxes aglomerados

a. Fluxes activos

Contienen una cantidad controlada de Mn y/o Si que se añaden al flux para proporcionar mayor resistencia a la porosidad o a la fisuración así como mayores niveles de resistencia mecánica.

Su uso está limitado a soldadura por un solo lado, por ambos lados, soldadura en rincón, pero no se recomienda usarlos en multipasada para uniones de aceros de espesores mayores a 25 mm, ya que la composición química y por tanto las propiedades mecánicas que se obtienen son no homogéneas en cada una de las pasadas.

b. Fluxes neutros

No producen cambios significativos en la composición química del metal depositado incluso aunque se produzcan variaciones importantes del voltaje del arco (longitud de arco que, al variar, produce la fusión de mayor o menor cantidad de flux) durante la soldadura. Se utilizan ampliamente ya que pueden usarse tanto en una sola pasada como en multipasada, sobre todo en los casos en que se desea un solo flux para una amplia gama de aplicaciones.

c. Fluxes aleados:

Contienen una cantidad controlada de aleantes, los cuales producen, con alambres de acero al carbono, metales depositados de aceros aleados. Se utilizan principalmente en soldaduras de recargue, no siendo aconsejables para soldaduras de unión o si se requiere una composición química y/o propiedades mecánicas completamente homogéneas en todas las soldaduras, pues éstas dependerán en gran medida de la cantidad de flux que se funde en cada momento, que es, a su vez, dependiente de la longitud del arco o del voltaje del mismo⁴.

⁴ Lázaro Martín Ángela "Soldeo por arco sumergido" www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura%3D20por%3D20Arco%3D20Sumergido%3D20Curso%3D20Completo.pdf+%&cd=14&hl=es-419&ct=clnk&gl=co. Pdf. pp. 10-13

1.2.1.6 Selección del tipo de flux

a. Fluxes ácidos vs. Fluxes básicos

En los últimos años algunos fabricantes de consumibles de soldadura e ingenieros de soldadura han invertido grandes esfuerzos para promocionar los fluxes básicos para arco sumergido como la mejor elección en la mayoría de aplicaciones automáticas y semiautomáticas. Esta estrategia ha conducido a la publicación de informaciones erróneas o faltas de rigor en la promoción de los fluxes básicos frente a los ácidos.

Uno de los errores de concepto más importantes lo constituye la creencia generalizada de que el metal depositado con fluxes altamente básicos proporciona muy buenas propiedades de resiliencia en soldadura multipasada. Es importante entender que, contrariamente a esa extendida creencia, muchos de los fluxes básicos disponibles comercialmente no muestran una relación directa entre basicidad y tenacidad del metal depositado. Utilizar este criterio cuando se selecciona un flux para un determinado trabajo puede incrementar a menudo los costes de producción, dificultar la realización de la soldadura y empobrecer la calidad de la misma.

La elección del mejor par hilo/flux para una determinada aplicación debe tener en consideración muchos otros factores. Simplificando, la elección de un par hilo/flux depende del tipo de aplicación.

Históricamente, el flux escogido como primera opción en aplicaciones de soldadura monopasada ha sido un flux de tipo ácido, con valores de Índice de Basicidad menores que 1(1). El motivo de esta elección es que los fluxes ácidos, por su diseño, proporcionan las siguientes ventajas:

1. Excelente aspecto del cordón.
2. Mayor resistencia a la fisuración del metal de soldadura.
3. Mayor resistencia a la absorción de humedad y, en general, menor contenido de hidrógeno difusible en el metal depositado.
4. Mayor resistencia a porosidad producida por óxido o desescamado.
5. Mayor resistencia a porosidad por contaminación de productos orgánicos (aceites, etc.)
6. Mayor resistencia a porosidad producida por soplo magnético.
7. Mayor resistencia a "pock marking".
8. Mejor eliminación de escoria en soldadura horizontal y soldadura en rincón plano.

9. Procedimientos de soldadura con mayores velocidades y mayores productividades.
10. Capacidad para soldadura con corrientes elevadas.
11. Mejor eliminación de escoria en uniones estrechas que permite la utilización de bisel más pequeño, reduciendo así los requisitos del metal de soldadura.
12. Menor coste del material debido a la selección de materia prima.
13. Menor tendencia a mordeduras en el metal de soldadura.
14. Mejor alimentación de flux.

Una medida habitual de la basicidad de un flux es el Índice de Basicidad de Boniszewski, el cual está basado en la composición química del flux. Se define como:

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + -\frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Los fluxes con $IB > 1,5$, son básicos por naturaleza. Con $IB < 1$ ácidos y cuando $1 \leq IB \leq 1,5$, se consideran neutros.

Por todos estos motivos los fluxes ácidos han sido el consumible elegido en aplicaciones como son la realización de costuras en la fabricación de tubos, en la fabricación de puentes y vigas, en la fabricación de estructuras, depósitos, calderas, y en todo tipo de aplicaciones.

Además de su utilización en aplicaciones monopasada y en soldaduras con número de pasadas limitado, los fluxes ácidos (acompañados del hilo adecuado) han sido utilizados con éxito durante muchos años en aquellas aplicaciones de soldadura multipasada cuyos requisitos de propiedades mecánicas y economía han justificado su uso.

Cuando se utilizan fluxes ácidos en aplicaciones que requieran más de tres pasadas, es importante escoger el hilo correcto para asegurar la correcta composición química del metal depositado y el máximo valor de dureza. En soldaduras de espesores mayores de 25 mm es importante utilizar un flux neutro, independientemente de que sea ácido o básico.

A causa de que los fluxes altamente básicos pueden mostrar peores características de soldadura y, en general tiene un coste superior, su uso debería

estar limitado a aquellas aplicaciones en las que el requisito más importante sea la obtención de valores altos de resiliencia en el metal depositado.

A pesar de que los fluxes ácidos generalmente no presentan valores de resiliencia tan altos como los fluxes básicos en grandes espesores, la decisión final deberá estar basada en el cumplimiento de los requisitos del trabajo a realizar, no en la naturaleza ácida o básica del flux. La idoneidad de la elección del par hilo/flux debería estar basada en los resultados y no en un cálculo teórico como es el Índice de Basicidad.

1.2.1.7 Fluxes activos vs. fluxes neutros

Los términos “activo” y “neutro” responden a una característica de los fluxes para arco sumergido que no tiene nada que ver con la acidez y la basicidad del flux. Las normas AWS A5.17 y AWS A5.23 referidas a fluxes para soldadura por arco sumergido contienen las siguientes definiciones en su apéndice.

a. Fluxes neutros

Son aquellos que no producirán cambios significativos en la composición química del metal depositado como consecuencia de variaciones importantes en el voltaje, y por consiguiente, en la longitud de arco.

Los fluxes neutros se utilizan principalmente en soldadura multipasada, especialmente cuando el metal base tiene un espesor mayor que 25mm.

Observe las siguientes consideraciones en relación con los fluxes neutros:

1. Ya que los fluxes neutros contienen poca o ninguna cantidad de desoxidantes, la función de desoxidante debe ser confiada al hilo. Soldaduras monopasadas con una insuficiente desoxidación o chapas de metal base fuertemente oxidada pueden producir porosidad, agrietamiento en el centro del cordón, o ambos.

2. Mientras que los fluxes neutros mantienen la composición química del metal de soldadura incluso con variaciones de voltaje, no siempre es cierto que la composición química del metal depositado sea la misma que la composición del hilo que se esté utilizando. Algunos fluxes neutros descomponen por el calor del arco liberando oxígeno, dando como resultado un valor de carbono más bajo en el metal depositado que el contenido de carbono del hilo de soldar. Algunos fluxes

neutros contienen manganeso-silicato ($MnO + SiO_2$) que puede descomponer por el calor del arco y añadir manganeso y silicio al metal de soldadura. Estos cambios en la composición química del metal depositado son completamente consistentes incluso cuando hay variaciones importantes del voltaje.

3. Incluso utilizando un flux neutro para mantener la composición química del metal depositado en un determinado rango de valores de la tensión de soldadura, las propiedades mecánicas del metal depositado, resistencia mecánica y resiliencia, pueden verse modificadas como consecuencia de variaciones en otros parámetros de soldadura, como son la profundidad de fusión, el aporte térmico y el número de pasadas.

b. Fluxes activos

Son aquellos que contienen pequeñas cantidades de manganeso y/o silicio. Estos desoxidantes se añaden al flux para dotar al metal depositado de una mejor resistencia a la porosidad y a la fisuración ocasionada por contaminantes o por la propia composición del metal base.

La principal aplicación de los fluxes activos es en la soldadura monopasada, especialmente sobre chapa oxidada.

En relación con los fluxes activos es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Ya que los fluxes activos contienen algunos desoxidantes, el porcentaje de manganeso y/o silicio en el metal depositado variará al cambiar la tensión de soldadura. Un incremento en el contenido de manganeso o silicio aumentará el valor de resistencia mecánica del metal depositado en aplicaciones de soldadura multipasada, pero puede disminuir las propiedades de impactos. Por esta razón el voltaje debe estar controlado de manera más estricta para aplicaciones multipasada cuando se utilizan fluxes activos que cuando se utilizan fluxes neutros.

2. Algunos fluxes son más activos que otros. Esto quiere decir que, en aplicaciones monopasada, ofrecen mayor resistencia a la porosidad causada por los óxidos presentes en la superficie del metal base que un flux que sea menos activo, pero pueden plantear más problemas en soldaduras multipasadas.

El test utilizado para medir la neutralidad relativa de un flux fue desarrollado en Lincoln por Kermit Wall. De hecho, el valor utilizado para comparar la neutralidad de diferentes fluxes se denomina Número de Neutralidad de Wall. La descripción de este ensayo también está descrita en las especificaciones AWS.

1.2.1.8 Número de Neutralidad de Wall

El Número de Neutralidad de Wall es una medida relativa de la neutralidad de un flux. Es un valor que se refiere al contenido de manganeso y silicio del metal depositado por fluxes e hilos para soldadura de aceros al carbono. No es valor aplicable a fluxes aleados. Para que un par hilo-flux sea considerado neutro debe tener un Número de Wall inferior o igual a 40. Cuanto más bajo es el valor del Número de Wall más neutro es el flux.

La tabla 2. Muestra una amplia variedad de fluxes de aplicación industrial con sus características específicas.

Tabla 2. Características y aplicaciones de los flux.

Tipo de flux	Componentes fundamentales	Ventajas	Limitaciones	Índice de Basicidad	Clase
Silicato de manganeso	Mno+SiO ₂ >50 %	Resistencia moderada. Admite oxidación en el metal base. Alta velocidad de soldeo. Facilidad de almacenaje	Limitado para soldeo por multipasadas y donde no se requiera tenacidad. Alto contenido de O ₂ e incremento depositado. Se reduce el C.	Ácido	Fundido
Cálcico con alto contenido de sílice	Ca + MgO + SiO ₂ > 60%	Alta corriente de soldeo. Admite oxidación en el metal base	Mala tenacidad de la soldadura. Utilizable donde no se requiere tenacidad. Alto contenido en O ₂ en el metal depositado.	Ácido	Aglomerado Fundido
Silicato cálcico neutro	Ca + MgO + SiO ₂ > 60%	Moderada resistencia y tenacidad. Apto para todo tipo de corriente.		Neutro	Aglomerado

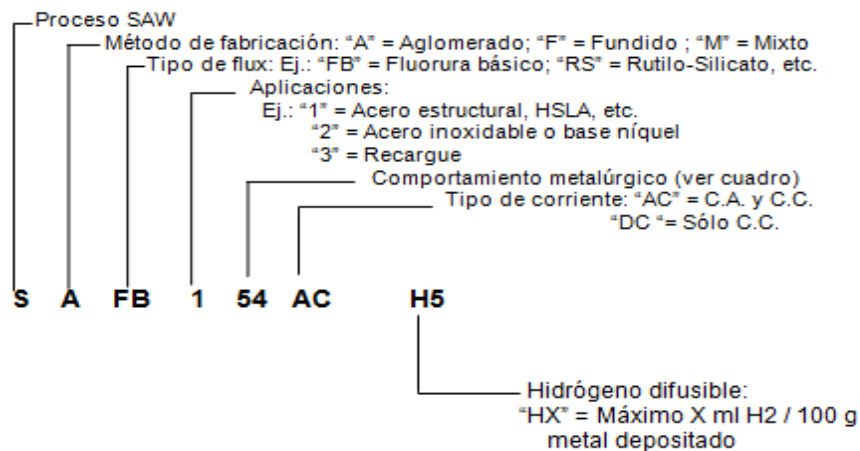
		Admite oxidación en el metal base. Apto para soldeo en una sola pasada y en multipada.			Fundido
Silicato cálcico con bajo contenido de sílice	Ca + MgO + SiO ₂ > 60%	Buena tenacidad con resistencia mediana. Alta velocidad de soldeo. No hay cambios en composición y el más bajo en contenido CO ₂ .	No se admite oxidación en el metal base. No utilizable para soldadura con electrodos múltiples	Básico	Aglomerado Fundido
Aluminato básico	Al ₂ O ₃ + CaO + MgO > 45% Al ₂ O ₃ > 20%	Buena resistencia y tenacidad en pasadas múltiples. No modifica el C, pero hay pérdidas de S y Si.	No admite oxidación en el metal de base. Limitado a soldadura con c.c. y polaridad positiva. Mal desprendimiento de la escoria.	Básico	Aglomerado
Alúmina	Bauxita	No hay cambio de composición de la soldadura e introduce menos O ₂ que los ácidos. Permite una velocidad de soldadura de moderada a rápida.		Neutro	Aglomerado Fundido
Fluoruro básico	CaO + MgO + MnO + CaF ₂ > 5% SiO ₂ £ 22% CaF ₂ £ 15%	Muy bajo O ₂ . De moderada a buena tenacidad a baja temperatura.	Puede presentar problemas de desprendimiento de escoria y de absorción de humedad	Básico	Aglomerado Fundido

Fuente: www.solysol.com.es

1.2.1.9 Sistema de clasificación según en de fluxes e hilos para soldadura por arco sumergido

La Normativa EN 760 para fluxes de soldadura por arco sumergido puede expresarse mediante el siguiente esquema que ayuda a entender cada indicación que clasifica a un flux:

Figura 14. Clasificación de 760



Fuente: www.solysol.com.es

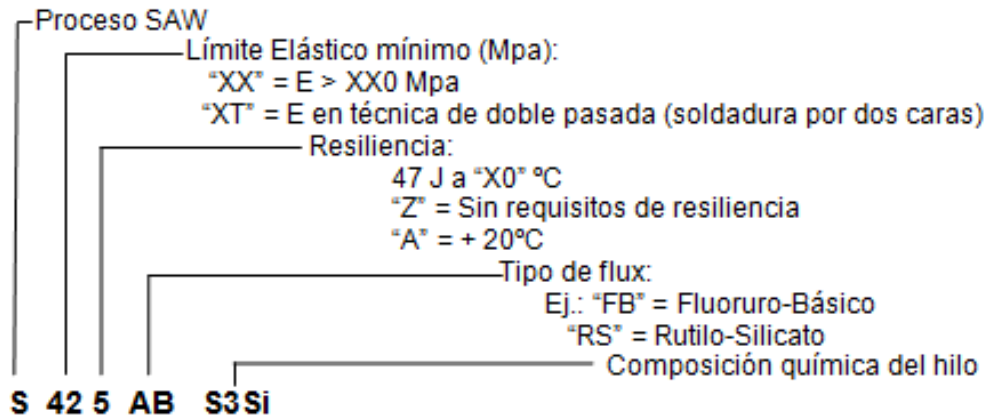
Tabla 3. Índice del comportamiento metalúrgico

COMPORTAMIENTO METALÚRGICO	
PERDIDA	1 = > 0,7
	2 = 0,5 – 0,7
	3 = 0,3 – 0,5
	4 = 0,1 – 0,3
NEUTRO	5 = 0 – 0,1

Fuente: www.solysol.com.es

La Normativa EN 756 para hilos y combinaciones hilo/flux SAW para aceros no aleados y/o de grano fino puede expresarse mediante el siguiente esquema que ayuda a entender cada indicación que clasifica a un flux⁵:

Figura 15. Clasificación norma EN 756



Fuente: www.solysol.com.es

1.2.1.10 Características y propiedades del metal depositado

Factores que van a influir en la naturaleza, características y comportamiento de los depósitos de soldadura por arco sumergido.

a. Composición del flux.

Durante la soldadura por arco sumergido las reacciones entre el metal líquido y el flux son similares a las que se producen en la fabricación del acero entre el metal y la escoria: eliminación de impurezas, transferencia de elementos tales como Mn y Si, etc. Por ejemplo, el contenido en Mn del metal depositado aumenta con el incremento de MnO en el flux. El contenido de Si sólo sube en el metal depositado cuando el SiO₂, contenido en el flux se encuentra por encima de 40%, por lo que se suele limitar a este porcentaje.

⁵ Lázaro Martín Angela "Soldeo por arco sumergido" www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura%3D20por%3D20Arco%3D20Sumergido%3D20Curso%3D20Completo.pdf +&cd=14&hl=es-419&ct=clnk&gl=co. Pdf. Pp 15-22

En cuanto a la captación del oxígeno, los óxidos tales como Al_2O_3 , son muy estables mientras que otros como FeO y MnO no lo son y los fluxes que contengan estos últimos producirán soldaduras con elevado contenido de oxígeno. El SiO_2 y el TiO_2 tienen potenciales de oxígeno intermedios. Tal como se ha visto anteriormente, el tipo de flux influirá enormemente en las características del metal depositado. En resumen:

b. Clases de fluxes.

Todos los fluxes afectan de alguna manera la composición del metal de base. Neutro y activo son términos utilizados para describir el comportamiento químico de un flux sobre la cantidad de material, normalmente Mn y Si, que transfiere al metal depositado y ello depende de la composición del flux, del hilo y del voltaje. Cuando la tensión se incrementa el arco se alarga, aumentando el volumen de flux que se funde y, de esta manera, la cantidad de elementos de aleación disponibles para entrar en el baño de fusión.

c. Fluxes neutros.

Transfieren relativamente poco Mn y Si al metal depositado, incluso con amplias variaciones de voltaje. Las investigaciones muestran que un incremento de tensión desde 28 a 35 V. eleva el Mn en el metal depositado de 1.32 a 1.45% y el Si de 0.51 a 0.55%. Aunque estas variaciones sean pequeñas no se puede asumir que la composición del metal depositado sea la misma que la del hilo del electrodo.

Los fluxes neutros pueden descomponerse en el arco liberando O_2 , que pueden reaccionar con el C en el baño de fusión, empobreciendo a la soldadura en este elemento. Estos fluxes son adecuados para pasadas múltiples en soldaduras de espesores de más de 25 mm. A pesar de que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación ofrecen, sin embargo, poca resistencia a la fisuración y a la porosidad en el metal fundido, resultando una mala selección para soldadura en una sola pasada. Además, como contienen pocos desoxidantes esta acción debe reservarse al propio electrodo.

d. Fluxes activos.

En contraste, los fluxes activos transfieren rápidamente Mn y Si y, a veces, otros elementos al metal fundido. Estos elementos mejoran la resistencia a la porosidad y la fisuración. Elevando la tensión desde 28 a 35 V. los fluxes activos pueden incrementar el Mn de 1.54 a 1.90% y el Si de 0,68 a 1.04%. A medida que

aumenta el voltaje se transfieren más elementos de aleación al metal depositado. Esta acción incrementa las características mecánicas, aunque puede reducir la resiliencia. Por esta razón es necesario un preciso control de la tensión en la soldadura con SAW cuando se emplean fluxes activos. Estos se recomiendan para pasadas únicas en materiales de base oxidados o sucios.

e. Fluxes aleados.

Se llaman así aquellos fluxes activos especialmente formulados para añadir elementos de aleación al metal fundido. Se utilizan con hilo de acero al carbono para depositar un metal aleado o unir aceros de baja aleación y para recargues. Normalmente el cordón que procede de un hilo de acero al carbono con flux aleado cuesta menos que con hilo aleado y flux neutro. Sin embargo hay que prestar una atención especial al reciclaje del flux para garantizar que se mantiene la composición química del cordón. El contenido de elementos de aleación en el metal fundido varía con la longitud de arco, que requiere un cuidadoso control.

Los fabricantes mediante un control de la tensión pueden ajustar el contenido de elementos de aleación en el metal depositado. Además, el carácter de flux se mide por su índice de basicidad. Los fluxes preparados a partir de óxidos ácidos tales como SiO_2 y Al_2O_3 se llaman ácidos. Las soldaduras realizadas con este tipo de flux tienen normalmente altas concentraciones de oxígeno.

Para soldaduras en una sola pasada o en una pasada por cada lado, tanto a tope como en rincón, suelen preferirse los fluxes ácidos, pues proporcionan excelentes propiedades de resistencia mecánica. En cambio, para soldaduras que requieren varias pasadas de soldadura, como lo son las que necesitan rellenar uniones de materiales gruesos (de espesores mayores a 25 mm), es recomendable usar fluxes neutros o básicos en los casos en los que se requiera que el flux ayude a proporcionar elevadas propiedades de resistencia a impactos a bajas temperaturas.

Algunos fluxes se formulan para producir y controlar la transferencia de elementos metálicos. Las ferroaleaciones cohesionadas en el flux pueden aportar elementos de aleación al metal depositado para conseguir las propiedades deseadas del depósito. Óxidos agregados al flux, tales como Cr_2O_3 y NiO ayudan a distribuir elementos metálicos entre el flux fundido y el metal depositado. El contenido en Si del metal depositado depende del Cr_2O_3 contenido en el flux, la composición del electrodo, la composición del metal de base y de los parámetros de soldeo.

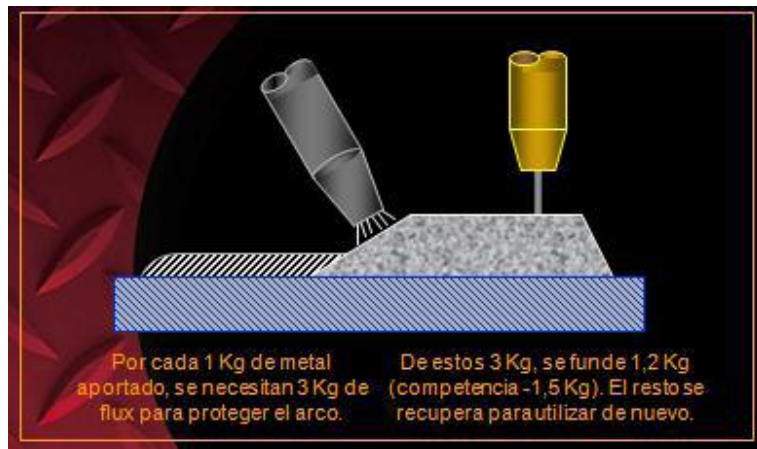
f. Granulometría del flux.

Cuando se emplee un flux de granulometría muy fina es necesario prestar una atención especial al sistema de alimentación y recuperación, pues, cuando está siendo aspirado, el sistema de vacío puede separar las partículas más finas. En ese caso, sólo las gruesas volverían a la alimentación para volver a utilizarse lo que puede acarrear problemas en la composición química del metal depositado.

g. Manejo del flux

Además del equipo de soldadura, deben considerarse los equipos de manejo de flux, tanto de alimentación del mismo a la antorcha de forma constante y en perfectas condiciones de secado y limpieza, como de recuperación y reciclaje del flux no fundido. Estos equipos permiten un gran ahorro en el consumo además de contribuir a la calidad resultante de la soldadura como consecuencia directa de su uso⁶.

Figura 16. Manejo del flux.



Fuente: www.solysol.com.es

⁶ Lázaro Martín Angela "Soldeo por arco sumergido" www.solysol.com.es/data/documents/Soldadura%3D20por%3D20Arco%3D20Sumergido%3D20Curso%3D20Completo.pdf+%&cd=14&hl=es-419&ct=clnk&gl=co. Pdf. Pp 28-31

1.3 HORNO DE INDUCCIÓN

Un horno de inducción es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

El principio de calentamiento de un metal por medio de la inducción fue descubierto por Michael Faraday en 1831 mientras se encontraba experimentando en su laboratorio.

Una ventaja del horno de inducción es que es limpio, eficiente desde el punto de vista energético, y es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que con la mayoría de los demás modos de calentamiento. Otra de sus ventajas es la capacidad para generar una gran cantidad de calor de manera rápida. Los principales componentes de un sistema de calentamiento por inducción son: el cuerpo de bobinas, conformado por las bobinas de fuerza (donde como están dispuestas físicamente es donde hay mayor agitación del baño líquido) y por las bobinas de refrigeración, la fuente de alimentación, la etapa de acoplamiento de la carga, una estación de enfriamiento, el material refractario que protege a las bobinas del baño líquido y la pieza a ser tratada.

Figura 17. Bobina de inducción.



Fuente: www.solysol.com.es

Las fundiciones más modernas utilizan este tipo de horno y cada vez más fundiciones están sustituyendo los hornos eléctricos por los de inducción, debido

a que aquellos generaban mucho polvo entre otros contaminantes. El rango de capacidades de los hornos de inducción abarca desde menos de un kilogramo hasta cien toneladas y son utilizados para fundir hierro y acero, cobre, aluminio y metales preciosos. Uno de los principales inconvenientes de estos hornos es la imposibilidad de refinamiento; la carga de materiales ha de estar libre de productos oxidantes y ser de una composición conocida y algunas aleaciones pueden perderse debido a la oxidación (y deben ser re-añadidos).

El rango de frecuencias de operación va desde la frecuencia de red (50 ó 60 Hz) hasta los 10 kHz, en función del metal que se quiere fundir, la capacidad del horno y la velocidad de fundición deseada - normalmente un horno de frecuencia elevada (más de 3000 Hz) es más rápido, siendo utilizados generalmente en la fundición de aceros, dado que la elevada frecuencia disminuye la turbulencia y evita la oxidación. Frecuencias menores generan más turbulencias en el metal, reduciendo la potencia que puede aplicarse al metal fundido.

En la actualidad los hornos de frecuencia de línea (50 ó 60 Hz, según país) han quedado en desuso, ya que los mismos poseían muy poca eficiencia energética y además cargaban con un alto coste de mantenimiento, dado que contenían una gran cantidad de elementos electromecánicos. En las últimas décadas (aproximadamente desde finales de la década de 1970) se han incorporado equipos de estado sólido, conformados en su etapa de potencia con componentes tales como tiristores (diodos SCR) y transistores de potencia tipo IGBT, con lo que el rendimiento y eficiencia de estos equipos ha aumentado considerablemente.

Un horno para una tonelada precalentado puede fundir una carga fría en menos de una hora. En la práctica se considera que se necesitan 600 kW para fundir una tonelada de hierro en una hora.

Un horno de inducción en funcionamiento normalmente emite un zumbido, silbido o chirrido (debido a la magnetostricción), cuya frecuencia puede ser utilizada por los operarios con experiencia para saber si el horno funciona correctamente o a qué potencia lo está haciendo⁷.

1.4 MATERIALES REFRACTARIOS

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales

⁷Rudney, Valery (2003). Handbook of Induction Heating. Marcel Dekker

inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. Las principales materias primas empleadas en la elaboración de estos materiales son óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio; y algunos refractarios no provenientes de óxidos como los carburos, nitruros, boratos, silicatos y grafito⁸.

Los materiales refractarios deben mantener su resistencia y estructura a altas temperaturas, resistir los choques térmicos, ser químicamente inertes, presentar baja conductividad térmica y bajo coeficiente de dilatación. Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y, magnesio (magnesita) son los materiales refractarios más importantes⁹.

Las propiedades de mayor peso en los refractarios son: composición química, estabilidad dimensional, porosidad, densidad, resistencia a la compresión en frío, cono pirométrico equivalente (PCE, por sus siglas en Inglés), refractariedad bajo condiciones de alta temperatura, deformación por fluencia lenta a alta temperatura, estabilidad volumétrica a alta temperatura (expansión y contracción) y conductividad térmica¹⁰.

Normalmente, los refractarios no tienen una temperatura de fusión específica. Sin embargo, llega a una temperatura en donde el material empieza a reblandecerse. El cono pirométrico equivalente se refiere a la cuantificación de la transición de fase que tiene lugar dentro de un intervalo de temperaturas en donde se lleva a cabo dicho fenómeno. Este es medido a partir de la caída de la punta de un cono elaborado de material refractario sometido a incrementos controlados de temperatura; la caída se expresa en grados¹¹.

1.5 CRISOLES

El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que reciba el metal fundido. Normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla,

⁸ A. Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, dePDHonline-CourseM158: http://www.mtec.or.th/images/users/78/FAQ_refractoryMetal/m158content.pdf

⁹ Wikipedia. (s.f.). Material Refractario. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013, de Wikipedia the free encyclopedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario

¹⁰ A. Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, dePDHonline-CourseM158: http://www.mtec.or.th/images/users/78/FAQ_refractoryMetal/m158content.pdf

¹¹ Schalm, S. (2005). Refractory Engineering (Segunda edición ed.). Essen, Alemania: Vulkan-Verlag

cerámicos, carburo de silicio, etc y puede soportar altas temperaturas, normalmente entre los 500 y 1700°C¹².

Figura 18. Crisoles de grafito y carburo de silicio.



Fuente: ASM Handbook - Casting (Vol. 15)

Figura 19. Crisol de cerámica.



Fuente: ASM Handbook - Casting (Vol. 15)

12 ASM committee. (1998). ASM Handbook - Casting (Vol. 15). ASM International

1.6 FUSIÓN DE ESCORIAS EN HORNO DE INDUCCIÓN

1.6.1 Descomposición por fusión

La fusión ocurre a temperatura elevada. Esto produce cambios estructurales profundos en la muestra, la sustancia original estable se descompone en presencia de una cantidad excesiva de agentes de fusión, generalmente en relación 1:10 ó 1:15. En la descomposición con agentes de fusión, lo más trascendental para lograr la degradación de la sustancia que se quiere estudiar, es la temperatura alcanzada en el proceso. A mayor temperatura mayor destrucción de la estructura original.

La descomposición por fusión depende del área superficial y de la naturaleza de la muestra, así como de la reactividad y las áreas superficiales de los agentes empleados. También es importante realizar una buena mezcla de todas las sustancias antes de someterlas al tratamiento térmico; finalmente, es necesario considerar el carácter químico del solvente empleado para solubilizar al producto de la fusión. Comparando los productos de las digestiones con los obtenidos en las fusiones, los factores desfavorables a los últimos son: elevada viscosidad, baja difusión de los iones liberados y formación de productos insolubles en la interface¹³.

1.6.2 Fundentes

1.6.2.1 Caliza

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos. Es el fundente más común para la fusión en la industria metalúrgica, en adiciones a altos hornos y hornos de arco eléctrico¹⁴.

¹³ Wilver Adolfo Villegas Casares, Pablo Oscar Acereto Escoffe, Mimi Elizabeth Vargas Quiñones "Análisis ultravioleta visible: La teoría y la práctica en el ejercicio profesional", Universidad autónoma de Yucatán, facultad de ingeniería química, México, 2006 pp. 38

¹⁴ C. Klein, C. S. Hurlbut. Manual de Mineralogía, cuarta edición. Editorial Reverté, 1998

1.6.2.2 Bórax

El bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, borato de sodio o tetraborato de sodio) es un compuesto importante del boro. Es el nombre comercial de la sal de boro. Es un cristal blanco y suave que se disuelve fácilmente en agua. Con un punto de fusión de 741°C , como fundente su función es bajar el punto de fusión del indeseado óxido de hierro.

El bórax es un agente de fusión no oxidante, empleado para descomponer sustancias difíciles de fundir, tales como cerámica refractaria, circón, SnO_2 y minerales de Cr, Ti, Nb que contienen oxígeno. El $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ anhidro presenta dos desventajas: la elevada viscosidad del producto de la fusión, y que el boro introducido en gran cantidad debe ser removido para evitar las interferencias en la cuantificación del analito. Las altas temperaturas empleadas producen pérdidas inmediatas de selenio y algunos elementos volátiles, en tanto que la concentración de los óxidos de metales alcalinos disminuye en los tratamientos muy prolongados. Procedimiento para la fusión.

La cantidad requerida de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ se funde y extiende sobre las paredes de un crisol de platino. Al enfriarse lentamente el borax forma una película; una vez introducida la muestra en el crisol, se tapa y calienta gradualmente con agitación ocasional usando una espátula de platino. Este proceso tarda de 30 a 120 minutos. El producto de la fusión se extiende nuevamente sobre las paredes del crisol, el enfriamiento rápido cuarteo la película formada, y las hojuelas son transferidas a un vaso de precipitados. Después de añadir 50 ml de metanol anhidro saturado con HCl gaseoso, se calienta la mezcla en un baño de agua, cubriendo el crisol con un vidrio de reloj. Cuando la reacción concluye, se evapora a sequedad. Los residuos de borato de metilo son removidos a través de varios tratamientos de adición de ácido clorhídrico metanólico y evaporaciones a sequedad, así se elimina el boro que es un interferente de varias determinaciones. Con frecuencia se emplea la mezcla bórax- Na_2CO_3 por ser más básica que el bórax, debido a la formación de NaBO_2 durante la fusión. La relación eutéctica tiene un punto de fusión de 722°C , en tanto que el $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ puro funde a 741°C . Después de digerir con HF los silicatos de las rocas silíceas, la fusión con NaOH bórax 3:1 puede usarse para descomponer los residuos insolubles¹⁵.

¹⁵ Wilver Adolfo Villegas Casares, Pablo Oscar Acereto Escoffe, Mimi Elizabeth Vargas Quiñones "Análisis ultravioleta visible: La teoría y la práctica en el ejercicio profesional", Universidad autónoma de Yucatán, facultad de ingeniería química, México, 2006 pp. 42

1.6.2.3 Carbonato de sodio

El carbonato de sodio es un fundente básico con un punto de fusión de 852°C. Con la sílice forma silicatos de sodio. Es un gran desulfurante formando sulfatos alcalinos.

Los agentes de fusión más utilizados son Na₂CO₃ anhidro que funde a 851°C y K₂CO₃ anhidro que funde a 891°C. Las mezclas eutécticas comerciales de estas sustancias son adecuadas para la determinación de elementos en concentraciones mayores de 5 mg %. Aun cuando el Na₂CO₃ o el NaHCO₃ posean alta pureza, no se deben utilizar para la determinación de elementos a nivel traza, debido a que la corrosión del recipiente durante la fusión produce la contaminación de la muestra. El NaHCO₃ tiene la ventaja de formar una dispersión muy fina alrededor de la muestra y se convierte a Na₂CO₃ a 300°C.

Los recipientes de platino son adecuados para efectuar fusiones con carbonatos, pero se corroen con mezclas de este reactivo y Na₂O₂. Los crisoles de Pt y Zr presentan una resistencia mayor a los agentes de fusión. Para prevenir la corrosión de los crisoles y evitar la contaminación de los productos de la fusión, o las pérdidas parciales de Fe, Sn, Pb, Sb y As por formación de compuestos intermetálicos, es recomendable utilizar agentes como el NaKCO₃ que funde a temperatura más baja, o emplear hornos eléctricos con atmósferas de CO₂ o gases inertes. Durante las fusiones con carbonatos el Ti y el Hg se volatilizan completamente, en tanto que el Se y el As lo hacen parcialmente. Durante la fusión con carbonatos, los enlaces de los polisilicatos y de los aluminosilicatos se disocian formando silicatos alcalinos solubles en soluciones acuosas de ácidos minerales. Los sulfatos, molibdatos, tungstos y las estructuras de polifosfatos con haluros, se descomponen en forma análoga. En el tratamiento térmico con Na₂CO₃, los sulfuros y los iones, Mn²⁺, Cr³⁺, se oxidan por acción del oxígeno atmosférico a sulfatos, manganatos y cromatos solubles en agua¹⁶.

1.6.2.4 Tetra-borato de litio

El Li₂B₄O₇ funde a 917°C, es un agente no oxidante ligeramente ácido, adecuado para la descomposición de materiales de carácter básico. El producto de su fusión es muy viscoso y al enfriar forma cristales difíciles de disolver con ácidos minerales. Las fusiones con el Li₂B₄O₇ a temperaturas altas, puede causar la volatilización de algunos elementos; las pérdidas son proporcionales al tiempo empleado. Las fusiones a temperaturas y tiempos controlados (15 minutos a

¹⁶ Wilver Adolfo Villegas Casares, Pablo Oscar Acereto Escoffe, Mimi Elizabeth Vargas Quiñones "Análisis ultravioleta visible: La teoría y la práctica en el ejercicio profesional", Universidad autónoma de Yucatán, facultad de ingeniería química, México, 2006 pp. 49

1000°C, 10 minutos a 1100°C o 5 minutos a 1200°C) permiten la descomposición de cemento, escoria, lava porosa y loza, sin que ocurran pérdidas de flúor. Los crisoles con aleaciones Pt-Au son los más recomendados. Las reacciones con las paredes del recipiente se incrementan con la temperatura. El Li₂B₄O₇ de alta pureza se utiliza en las determinaciones espectrométricas de emisión o de fluorescencia atómica¹⁷.

¹⁷ Wilver Adolfo Villegas Casares, Pablo Oscar Acereto Escoffe, Mimi Elizabeth Vargas Quiñones "Análisis ultravioleta visible: La teoría y la practica en el ejercicio profesional", Universidad autónoma de Yucatán, facultad de ingeniería química, México, 2006 pp. 43

2 METODOLOGÍA

2.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se desarrolló en los laboratorios de Ingeniería Metalúrgica de la UPTC donde se encuentran los equipos requeridos para el desarrollo del proyecto relacionado a continuación:

Computadores y software

- DRX y Software
- FRX y Software
- Chispa y Software

Equipos

- Horno de inducción UPTC y crisoles.
- Mufla 1050°C UPTC.
- Mufla 2000°C UNV. DEL VALLE.
- DRX Panical y Software.
- FRX Panical y Software.
- Espectrómetro Q8 Magellan.
- Torno y herramientas.
- Taladro fresador y herramientas.
- Trituradora de mandíbulas.
- Pulverizador planetario.
- Matriz metálica de acero, tipo molde.
- Prensa hidráulica.
- Gato hidráulico
- Esmeril y banco de pulido
- Prensa mecánica

Materiales

- Escorias de soldadura por arco sumergido SAW.
- Flux para soldadura de arco sumergido.
- Tetraborato de Litio.

- Carbonato de Sodio.
- Caliza.
- Bórax.
- Agua destilada.
- Concrax 1700.
- Alumina.

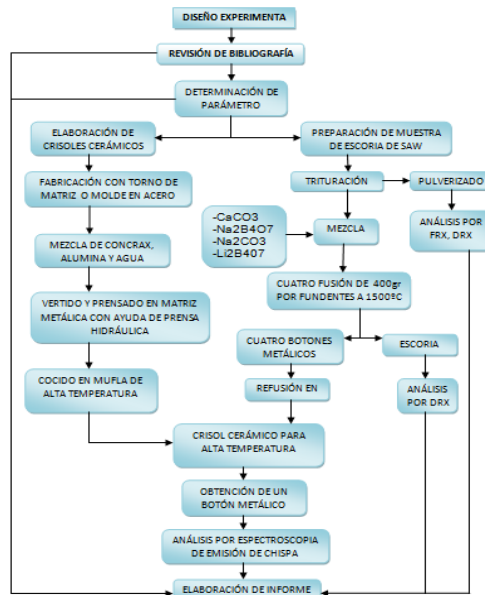
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Se describirá cada uno de los pasos realizados para cumplir con el desarrollo del proyecto

Variables: Para poder recuperar la mayor cantidad de material metálico de las escorias de arco sumergido, se realizan unas series de fusiones con los mismos parámetro de operación del horno de inducción, (potencia, temperatura, tiempo de fusión, carga), y con una variable que corresponde a cuatro diferentes tipos de fundentes.

2.3 DISEÑO METODOLÓGICO

Figura 20. Diagrama de metodología.



Fuente: Autor

En la figura 20, se describe las etapas necesarias para la obtención gráfica y de datos, de donde se extrae la información para el análisis final de la recuperación metálica y el fundente que mejor se adapta en este proceso de extracción.

2.4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Las siguientes fases fueron desarrolladas durante la realización de este proyecto, donde se especifican pruebas, actividades y tiempo en el que se llevaron a cabo.

2.4.1 Fabricación de crisoles laboratorios de metalurgia uptc

Para la fusión de las escorias de arco sumergido, se utilizaron dos tipos de crisoles:

- Crisoles de Carburo de Silicio, fabricados en Brasil.
- Crisoles de cerámicos de Concrax fabricados en los laboratorios de metalurgia UPTC.

1. Se inicio con la elaboración de las matrices y moldes en acero estructural 1045 y fundición gris, mecanizado en el torno que se encuentra en los laboratorios de metalurgia de la UPTC.

Figura 21. Fabricación de matriz para crisol.



Fuente: Autor

2. Mezcla de CONCRAX con alúmina de la siguiente manera en proporciones masa a masa:

- 70% Concrax + 20% Alúmina + 10% H₂O
- 92% Concrax + 8% H₂O

Tabla 4. Composición química concrax 1700

COMPUESTO	%
AL ₂ O ₃	86.0
SiO ₂	4.0
Fe ₂ O ₃	1.6
TiO ₂	3.1
CaO	4.7
MgO	0.3
ALCALIS	0.3

Fuente: https://erecos.com/concrax_1700.pdf

3. Se deposita la mezcla, para compactar y prensarlos dentro de las matrices con prensa hidráulica ubicada en los laboratorios de la UPTC a una presión de 1500psi.

4. Se dejó fraguar por 24 horas y se realizó el desmontaje, todo basado bajo parámetro del distribuidor ERECOs CORONA. (Ver anexo 1).

Figura 22. Desmontaje de las matrices de los crisoles.

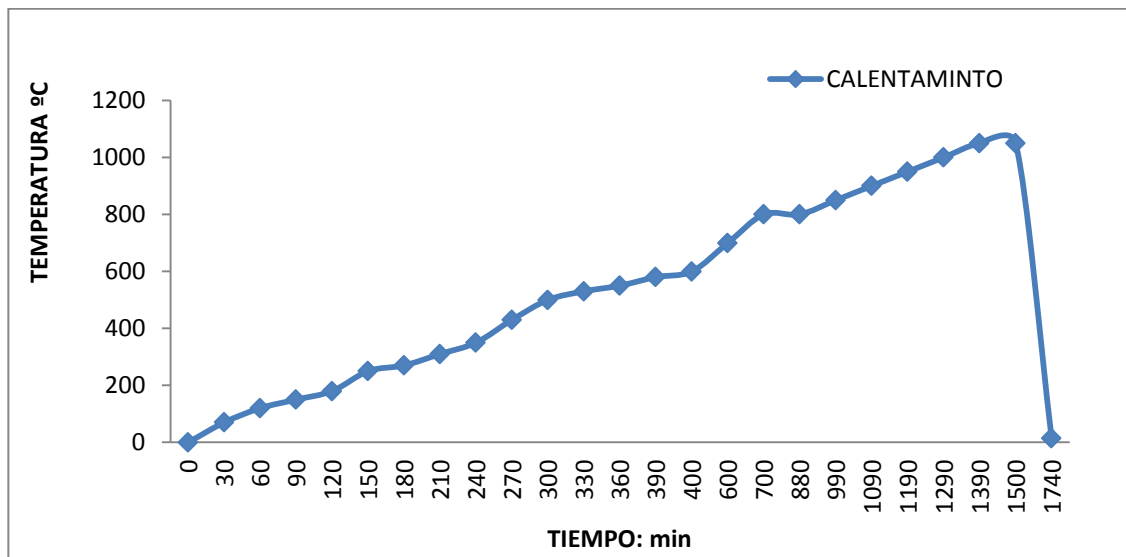


Fuente: Autor

5. Después del tiempo de fraguada se deja en mufla a 125°C por un tiempo de 30 horas, para eliminar la humedad presente en el crisol y darle un primer endurecimiento.

6. Para el endurecimiento y cocción del crisol se le realiza unas ramplas de calentamientos en mufla de la siguiente manera:

Figura 23. Curva de calentamiento del crisol a 1050°C.



Fuente: Autor

Pero debido a su baja temperatura de cocción, se presentaron problemas en la estructura del crisol para fundir a temperaturas superiores a los 1250°C, por eso se vio la necesidad de buscar una mufla que superar esta temperatura.

7. En la universidad del valle, se prestó el servicio de cocción del los crisoles cerámicos, llevándolos a una temperatura de 1550°C.

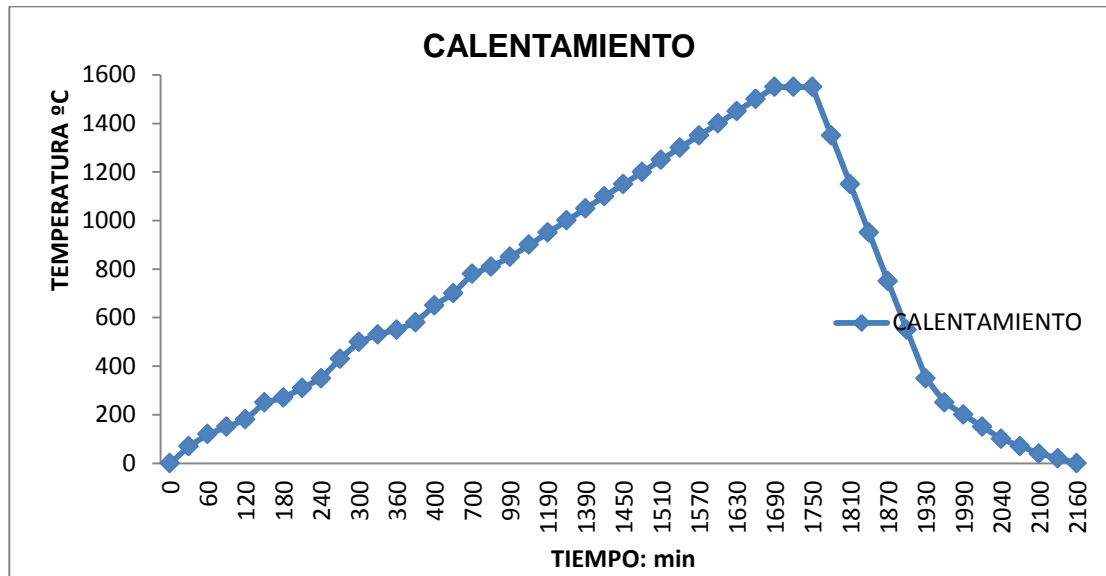
Figura 24. Crisoles recosidos en mufla de alta temperatura.



Fuente: Autor

Realizando una rampa de calentamiento muy lenta ilustrada en la Figura 25.:

Figura 25. Crisoles recocido a alta temperatura.



Fuente: Autor

8. Los crisoles se pusieron a prueba realizando varias fusiones con Al, Cu y finalmente con acero 1045, para evaluar su resistencia termica

2.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE ARCO SUMERGIDO

Para caracterizar las muestras de escorias de arco sumergido, proporcionadas por la empresa HB SADELEC, se realizaron los siguientes pasos:

Figura 26. Escoria de arco sumergido, después del proceso de soldadura.



Fuente: Autor

1. Trituración de las muestras de escorias de arco sumergido a un tamaño menor a 1.5 cm de diámetro.

Figura 27. Escorias trituradas.



Fuente: Autor

2. Cuarteo de las muestras basado en norma ASTM D75-03.

Figura 28. Muestra para pulverización.

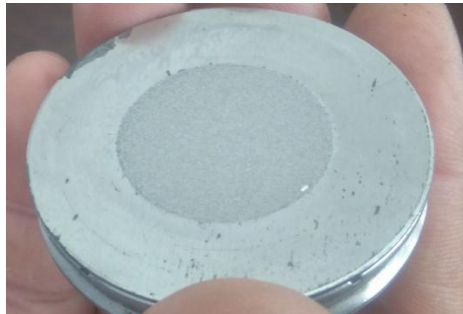


Fuente: Autor

3. Pulverizado de muestras en equipo planetario de la empresa GERDAU DIACO PLANTA TUTA, hasta un tamaño de grano menor a malla 200.

4. Análisis de fluorescencia de rayos X. Prueba efectuadas en los laboratorios de la empresa GERDAU DIACO, realizándose pruebas al flux antes de ser utilizado en el proceso de soldadura y a las escorias después del proceso de arco sumergido.

Figura 29. Muestra para ensayo de DRX.



Fuente: Autor

5. Análisis de difracción de rayos X. Pruebas realizadas en el equipo PANanalítica XPert PRO de la UPTC,

Figura 30. Equipo de DRX.



Fuente: Autor

2.6 FUSIÓN DE LAS MUESTRAS

Para cada fundente se realizó tres fusiones con una proporción de 400gr de escoria y 12gr de fundente, esta cantidad de fundente fue determinada debido a que si se utilizaba una cantidad mayor al 3%, por interacción de alta potencia y alta temperatura, los crisoles sufrieron un gran desgaste y perforación lo cual nos presentó inconveniente por pérdida de material y exposición de la bobina a daños.

Figura 31. Mezcla de Escoria con Fundente.



Fuente: Autor

Todas las mezclas fueron fundidas con una potencia máxima de 29-30Kw, lo cual nos entregaba una temperatura entre los 1500°C y 1600°C, por un tiempo de 25 minutos, esto fue estandarizado después de varias fusiones para determinar el tiempo que nos ofreciera una optima fusión con un menor consumo energético del equipo.

2.6.1 Procedimiento de fusión.

1. Las mezclas fueron fundidas en crisoles de carburo de silicio con referencia AS2, importados desde Brasil, en horno de inducción, ubicado en los laboratorios de metalurgia UPTC.

Figura 32. Panel principal Horno de inducción.



Fuente: Autor

Cabe destacar que para cada fundente se uso un crisol nuevo para evitar contaminación entre muestra y obtener representaciones de optima cálda.

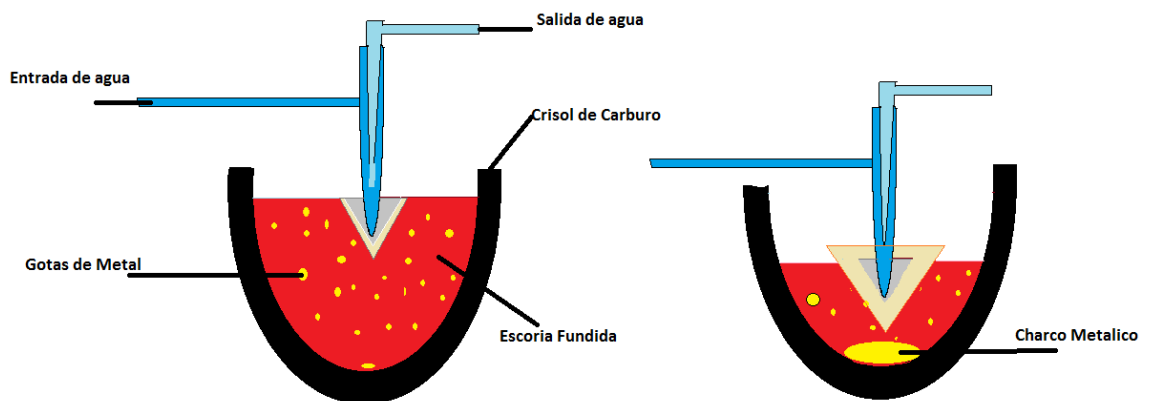
Figura 33. Fusión en bobina de Horno de Inducción.



Fuente: Autor

2. Fundidas las mezcla durante el tiempo establecido, se procedió a retirar paulatinamente las escorias con sonda refrigerada, donde circulaba un caudal de agua fría, dentro de un tubo de acero inoxidable ANSI 316, esto con el fin de que las gotas metálicas fueran descendiendo por gravedad hasta el fondo del crisol y recolectar la mayor cantidad de material metálico en el fondo del crisol

Figura 34. Retirado de escoria del Crisol.



Fuente: Autor

3. Teniendo la mayor cantidad de material metálico fundido en el fondo del crisol con una capa pequeña de escoria, se procedió a colar en coquilla metálica, para su respectiva solidificación a temperatura ambiente y obtención de botones metálicos.

4. Las escorias fueron enfriadas adicionalmente a la sonda en agua, para tener una estructura más quebradiza y fácil de triturar.

5. Se trituro las escorias y se le realizo separación magnética para recuperar las trazas de metal ferroso atrapado dentro la escoria.

2.6.2 Refusión de botones metálicos

Con el propósito de obtener botones de tamaño representativo para las pruebas de espectroscopia de emisión de chispa, fue necesaria la fusión de los tres botones metálicos, de cada fundente, acompañados de todo el material magnético retirado de cada una de las escorias trituradas que fueron fundidas.

Es aquí, en este procedimiento de refusión, donde se hizo necesario la utilización de los crisoles cerámicos de alta alúmina que fueron fabricados en los laboratorios de metalurgia uptc, con el fin de que las muestras metálicas y parte magnética, no fueran saturadas de carbono, problema que se presenta al fundir en crisoles de grafito o carburo de silicio.

2.6.2.1 Procedimiento de refusión

1. Todo el material obtenido de cada fundente, tanto botones metálicos como parte magnética, fueron depositados dentro de los crisoles cerámicos de alta alúmina.

Figura 35. Crisoles cerámicos para refusión de botones.



Fuente: Autor

2. El crisol cerámico de alta alúmina fue depositado dentro de un crisol de carburo de silicio.

Figura 36. Cargue de crisol cerámico en crisol SiC



Fuente: Autor

Esto con el fin de proporcionar una mayor carga al horno de inducción y por ende una mayor potencia entregada, que se refleja en un mayor rango de temperatura. A su vez el crisol de carburo de silicio actúa como protector de atmosfera, interactuando con el oxígeno del medio y formando CO_2 .

3. Los crisoles junto con el material fueron depositados dentro de la bobina de inducción del horno, para su posterior fusión.

Figura 37. Crisoles cargados dentro de bobina de inducción



Fuente: Autor

4. El horno fue puesto en marcha a una potencia máxima de 28Kw y se mantuvo por un tiempo aproximado de 12 minutos hasta fundir el material.

Figura 38. Refusión de botone en horno de inducción.



Fuente: Autor

5. El material fundido fue colado y depositado dentro de coquilla metálica para su solidificación a temperatura ambiente.

2.7 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DESPUÉS DE FUSIÓN

Para un análisis final de los productos obtenidos (botón, escoria) después de la fusión, se preparan acorde a los requerimientos necesarios para cada ensayo.

Escorias: fueron trituradas, pulverizadas a malla 200 y separadas magnéticamente, para caracterización y conocer su composición por difracción de rayos X.

Botones metálicos: se desbastaron con esmeril y pulidos con lijas de grano 80, 120, 400 y 600, para determinar la composición química mediante espectrometría de emisión óptica con fuente de chispa, siguiendo lineamientos de la norma ASTM E 415. Se utilizó un espectrómetro Q8 MAGELLAN BRUKER QUANTRON presentado en la figura.

Figura 39. Espectrómetro Q8 Magellan.



Fuente: Autor

2.8 SOFTWARE SLAGAN3

Este programa contiene una serie parámetro en su base de datos, que simula las propiedades físicas de las escorias a diferentes temperaturas. Teniendo las composiciones químicas de la escoria, se ingresaron estos datos y se simulo por software las propiedades físicas principales de esta escoria.

3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Siendo esta la parte más importante del proyecto, se describirá la caracterización de la escoria, el proceso metalúrgico de fusión y reducción, descripción de los elementos recuperados, impacto ambiental, innovación, aplicación e importancia para la industria metalúrgica el tratamiento de este tipo de escorias, adicionalmente análisis por DRX a las escorias después de la fusión.

3.1 RESULTADOS DE ENSAYO DE FRX

Para realizar un mejor procedimiento de recuperación y un estimado de metales posibles a reducir, se inicio con la caracterización por método de FRX a las escorias de SAW, con estas pruebas se obtuvo la composición del material antes y después de ser aplicado en la soldadura. Los datos obtenidos se representan en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados FRX

ELEMENTO O COMPUESTO	UNIDA	FLUX ANTES DE USAR	FLUX DESPUÉS DE USAR
Al ₂ O ₃	%	19,9856	14,8608
CaO	%	13,6101	10,8827
Cr ₂ O ₃	%	0,1013	0,2250
Fe ₂ O ₃	%	2,8018	3,8686
K ₂ O	%	0,7651	0,8010
MgO	%	20,0989	16,5881
MnO	%	10,9930	9,4345
Na ₂ O	%	3,1383	2,5524
P ₂ O ₅	%	0,1081	0,0416
SiO ₂	%	17,1750	16,4899
TiO ₂	%	1,8409	1,9128
S	%	0,0269	0,0205

Fuente: Autor

Como se refleja, son predominantes los compuestos de tipo oxido, lo cual lleva a pensar que por el método de fusión, se puede reducir mayormente, elementos como el Fe, Mn, Si, Ti, Cr, elementos que son de gran interés para la sector metalúrgico.

Esta información la podemos corroborar con el artículo titulado Escorias de soldadura de arco sumergido: Estrategias de caracterización y lixiviación para la eliminación de aluminio y titanio publicado en la reconocida revista ScienceDirect donde incluye la tabla 6.

Tabla 6. Tabla de FRX artículo

Compuestos	Neutral (%)	Ácido (%)
Al ₂ O ₃ / Al	19.8 / 10.5	25.9 / 13.7
TiO ₂ / Ti	0.8 / 0.5	11.0 / 9.5
CaO	13.6	6.6
F	4.9	1.7
Fe ₂ O ₃	3.9	10.0
MgO	22.6	2.1
MnO	5.3	22.9
Na ₂ O	3.8	2.5
SiO ₂	23.5	11.4
Otros	1.9	6.0

Fuente: ScienceDirect

Cuyas composiciones son muy similares entre las escorias básicas del artículo y las escorias analizadas actualmente, lo cual nos da una confiabilidad con la calibración del equipo de FRX y a la vez un mayor grado de veracidad en la caracterización de dichas escorias.

3.2 ANÁLISIS DE SOFTWARE SLAGAN3

Con la composición química de la escoria se pudo simular varias propiedades físicas, y así conocer parámetros importantes de su comportamiento al momento de su fusión dentro de crisol o cuba refractaria. Esta simulación se realizó a una temperatura de 1600°C.

Las propiedades principales determinadas por simulación en este software son: Densidad y Basicidad, además Viscosidad, Conductividad térmica y Conductividad eléctrica en estado líquido a 1600°C, entre otras propiedades.

Figura 40. Ingreso de datos al software SlagAn3.

Components	Wt-%	Mole Frac.
Temp. °C	1600	
CaO	10.88	0.154
MgO	16.59	0.327
Al2O3	14.86	0.116
SiO2	16.49	0.218
MnO	9.43	0.106
FeO	0.00	0.000
Fe2O3	3.87	0.019
Cr2O3	0.23	0.001
Total	72.35	0.941

Components	Activity	Act. Coeff.	Phase
MnO	1.418E-1	1.264E+0	L
MgO	4.914E-1	1.414E+0	L
Fe2O3	6.508E-2	3.181E+0	L
CaO	1.908E-2	1.165E-1	L
Cr2O3	2.698E-4	2.112E-1	L
Al2O3	7.151E-2	5.811E-1	L
SiO2	2.283E-2	9.853E-2	L
3 CaO - MgO - 2 SiO2	4.243E-2		L
2 CaO - MgO - 2 SiO2	5.922E-2		L
CaO - MgO - SiO2	3.107E-1		L
CaO - MgO - 2 SiO2	2.229E-2		L
CaO - 2 SiO2 - Al2O3	1.323E-3		L
2 CaO - SiO2 - Al2O3	4.442E-2		L
CaO - 6 Al2O3	4.983E-7		L
CaO - 2 Al2O3	9.679E-3		L
CaO - Al2O3	5.754E-2		L
3 CaO - Al2O3	1.316E-4		L
CaO - Cr2O4	1.569E-4		L
3 CaO - SiO2	4.078E-3		L
2 CaO - SiO2	9.993E-2		L
3 CaO - 2 SiO2	7.843E-3		L
CaO - SiO2	9.181E-2		L

Fuente: Autor

Figura 41. Resultados de las propiedades físicas de las escorias.

Components	Wt-%	Mole Frac.
Temp. °C	1600	
P2O5	0.04	0.000
FeO	0.00	0.000
MnO	9.43	0.106
Cr2O3	0.23	0.001
SiO2	16.49	0.218
Al2O3	14.86	0.116
MgO	16.59	0.327
CaO	10.88	0.154
CaF2	0.00	0.000
Na2O	2.55	0.033
K2O	0.80	0.007
TiO2	1.91	0.019
B2O3	0.00	0.000
ZrO2	0.00	0.000
Fe2O3	3.87	0.019
NiO	0.00	0.000
Total	77.65	1.000

Optical Basicity acc. to Duffy & Ingram	0.697
"Corrected" Optical Basicity for viscosity calc.	0.640
Slag Sulphide Capacity (acc. to Young & al.)	0.0026
Slag Phosphorous Capacity (acc. to Young & al.)	1.58E+4
Slag Density [kg/m3]	2894
Specific Heat Capacity [kWh/(ton*K)]	0.43
Thermal Conductivity of liquid [W/(m*K)]	0.45
Electric Conductivity of liquid [1/(ohm*cm)]	1.64
Viscosity acc. to method by NPL [poise] (recom.)	0.736
Viscosity acc. to method by Urbain [poise]	0.851
Viscosity acc. to method by Riboud [poise]	0.638

Fuente: Autor

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS

Teniendo la composición química por el método de fluorescencia y los resultados de las propiedades físicas por el software, se pudo clasificar las escorias de soldadura por arco sumergido, representando los resultados en la tabla 7.

Tabla 7. Caracterización de las escorias de SAW

PROPIEDAD	RESULTADO
DENSIDAD	2894 [Kg/m ³]
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (1600°C)	0.45 [W/(m*K)]
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (1600°)	1.64 [1/(ohm*cm)]
VISCOSIDAD (1600°C)	0.736 poise
BASICIDAD	0.697
BASICIDAD	BÁSICO
CLASE DE FABRICACIÓN	FLUXES AGLOMERADO

Fuente: Autor

Conociendo estas propiedades y teniendo una noción del comportamiento de las escorias, se pudo establecer las condiciones más adecuadas, como tiempos, carga, cantidad de fundente, etc., para realizar la fusión.

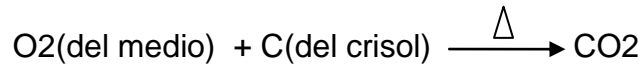
3.4 ANÁLISIS FUSIÓN DE LAS ESCORIAS DE SAW

Durante el desarrollo del proyecto, uno de los ideales es encontrar el fundente más versátil que se adapte a la recuperación del materiales metálico de las escorias de SAW, donde interactúen precio y porcentaje en peso de metal recuperado.

Realmente durante el proceso de fusión de escorias tuvimos como resultado la reducción de compuestos metálicos de tipo óxidos, como se demostró en la composición química determinada por ensayo de FRX. Interactuando la escoria, el fundente, el crisol y la temperatura, crean el ambiente propicio para que presente la reducción, actuando el crisol de SiC como reductor liberando carbono al baño metálico y el fundente disminuyendo el punto de fusión de la escoria.

3.4.1 Reacciones en la fusión

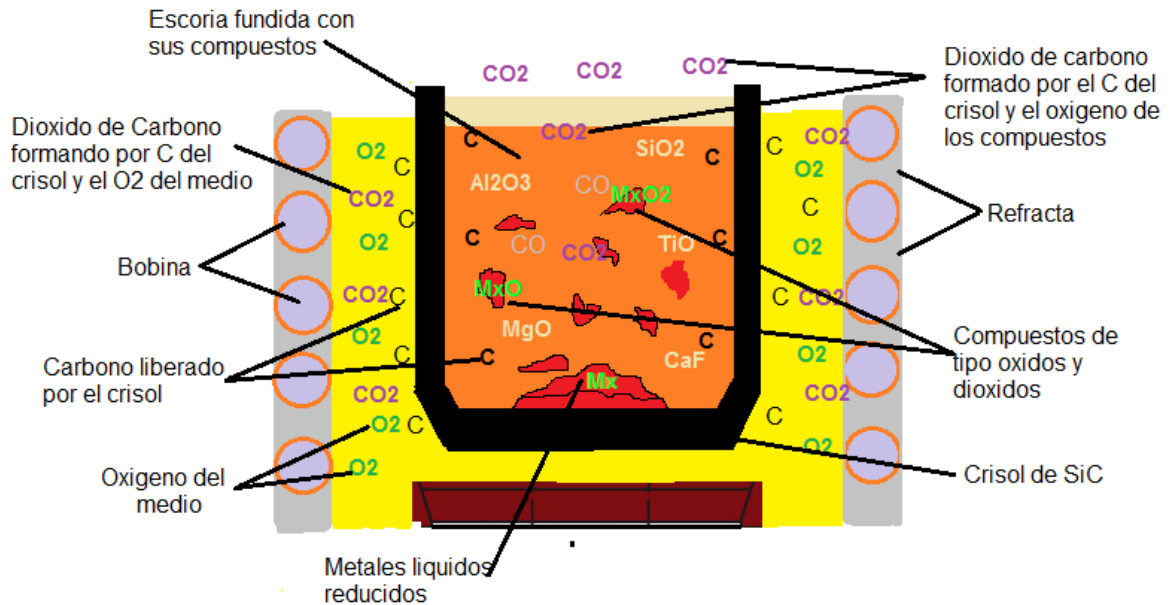
Generalmente las reacciones presentadas en las escorias son oxidación y por ende de reducción. Por ejemplo:



Donde Mx puede ser metales como Fe, Si, Mn, etc.

Las reacciones de fusión de las escorias de SAW en horno de inducción se representan en la imagen

Figura 42. Fusión de escorias en horno de inducción.



Fuente: Autor

Donde se puede observar las reacciones donde interactúa el carbono liberado del crisol con los oxígenos de los compuestos y el medio.

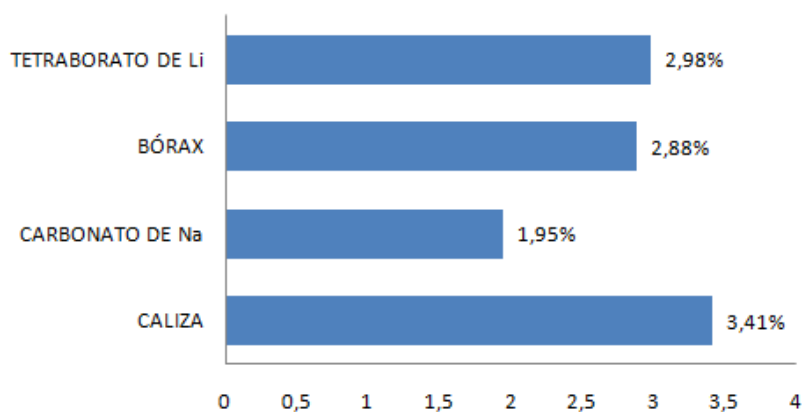
Los resultados del material metálico recuperado en peso de las fusiones, se representa en la tabla 8.

Tabla 8. Recuperación de metal por fusión.

FUNDENTE	FUSIÓN 1	FUSIÓN 2	FUSIÓN 3	TOTAL	%
CALIZA	14,2g	13,7g	13,0g	40,9g	3,41
CARBONATO DE Na	7,0g	8,3g	8,1g	23,4g	1,95
BÓRAX	12,1g	11,0g	11,4g	34,5g	2,88
TETRABORATO DE Li	7,9g	13,2g	14,6g	35,7g	2,98

Fuente: Autor

Gráfica 1. Porcentajes de metal total recuperado por fundente de las SAWS



Fuente: Autor

Siendo inicialmente el fundente más efectivo, la caliza, debido a su alta interacción con el metal y su fusibilidad, además de ser un fundente muy común en la industria metalúrgica, su gran abundancia en la corteza terrestre y su bajo precio, lo hace el más efectivo a comparación de los demás fundentes.

3.5 ANÁLISIS DE ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN DE CHISPA

Uno de los métodos más utilizados en la industria metalúrgica, para conocer la composición química de aleaciones metálicas, es la espectroscopia de emisión de chispa. Esta técnica nos permite obtener resultados rápidos y confiables, utilizando la intensidad de la luz emitida desde una chispa en una longitud de onda particular para determinar la cantidad de un elemento en una muestra. La longitud de onda de la línea espectral atómica da la identidad del elemento, mientras que la intensidad de la luz emitida es proporcional a la cantidad de átomos del elemento.

Figura 43. Muestras para espectroscopia de chispa.



Fuente: Autor

3.5.1 Resultados espectroscopia de emisión de chispa

Para unos análisis más detallados gráfica y cuantitativamente de las muestras, los resultados fueron dividido en cuatro grupos:

1. Elementos en pequeñas trazas.
2. Elementos ferro-aleantes.
3. Elementos indeseables.
4. Elementos de mayor interés.

3.5.1.1 Elementos en pequeñas trazas

En la fabricación de aleaciones metálicas ferrosas, como aceros o ferro-aleaciones, es casi inevitable tener dentro de la matriz metálica elementos en pequeñas cantidades, que a pesar de su mínima cantidad pueden modificar significativamente las propiedades de un acero. Los elementos recuperados se representan en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de elementos recuperado en pequeñas trazas.

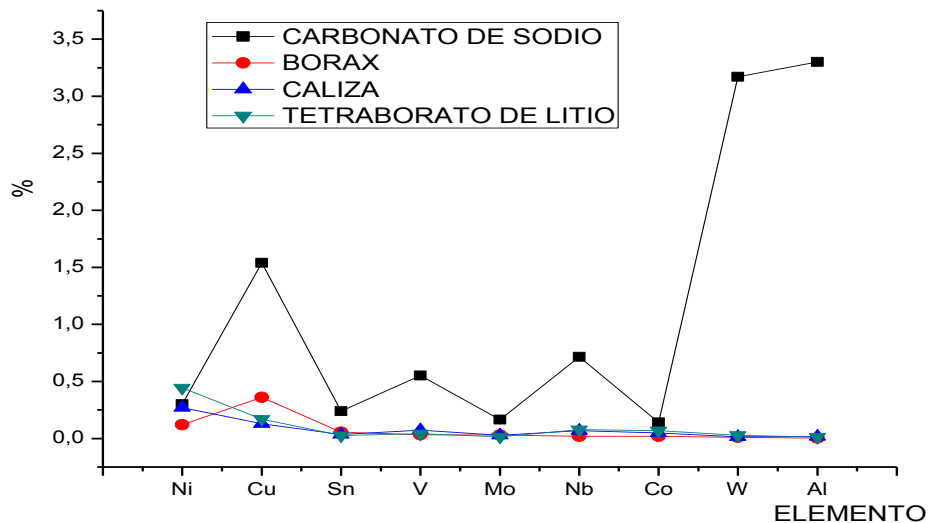
ELEMENTO	CARBONATO DE SODIO	BÓRAX	CALIZA	TETRABORATO DE LITIO
	%	%	%	%
Ni	0,3	0,12	0,271	0,445
Cu	1,54	0,36	0,129	0,17
Sn	0,24	0,056	0,0343	0,0271
V	0,551	0,0322	0,0734	0,0414
Mo	0,166	0,0302	0,0276	0,0151
Nb	0,715	0,0205	0,069	0,0786
Co	0,141	0,019	0,049	0,0684
W	3,17	0,01	0,0144	0,0278
Al	3,3	0,00419	0,0177	0,0137

Los efectos más comunes de estas cantidades son:

El Ni mejora las propiedades del tratamiento térmico reduciendo la temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado. Al emplearse conjuntamente con el Cromo, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste. El Cu Mejora significativamente la resistencia a la corrosión atmosférica. El V Imparte dureza y ayuda en la formación de granos de tamaño fino. Aumenta la resistencia a los impactos (resistencia a las fracturas por impacto) y también la resistencia a la

fatiga. El Mo Mediante el aumento de la penetración de temple, mejora las propiedades del tratamiento térmico. Aumenta también la dureza y resistencia a altas temperaturas. El Co Limita su uso en las calidades superiores de aceros rápidos. Este aleante, se combina con la ferrita, aumentando su dureza y resistencia. Disminuye la templeabilidad en los aceros de alto porcentaje de carbono. El Nb Inhibidor de crecimiento de grano. El W Se emplea en muchos aceros de aleación para herramientas, impartiendoles una gran resistencia al desgaste y dureza a altas temperaturas. El Al Empleado en pequeñas cantidades, actúa como un desoxidante para el acero fundido y produce un Acero de Grano Fino.

Gráfica 2. Representación de recuperación metálica en pequeñas trazas.



Fuente: Autor

En esta primera parte los fundentes BÓRAX, CALIZA Y TETRABORATO DE LITIO, presentaron similar comportamiento al fundir los botones metálicos, recuperando elementos con porcentajes en pesos similares. Con respecto al carbonato de sodio, como se puede representar en la grafica, su recuperación aparenta ser mucho mayor a los demás fundentes, esto debido a que por la complejidad de la muestra, la chispa fue tomada en la parte lateral de la muestra, exactamente en la escoria protectora de la refusión de botones, que quedo adherida al botón al momento del colado y la solidificación, y esto a la vez nos da una idea para analizar adicionalmente las escorias después de las fusiones, para conocer su composición y cambio después de la recuperación metálica.

3.5.1.2 Elementos ferro-aleantes

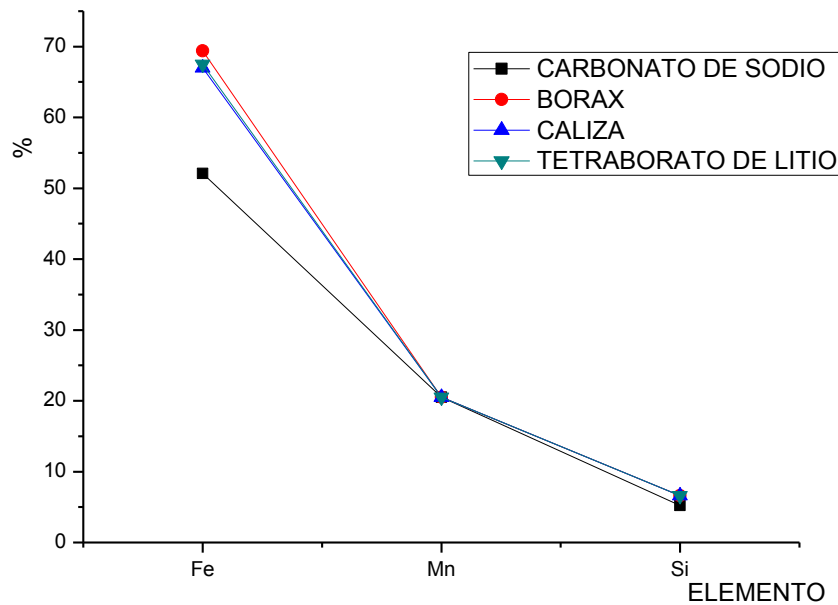
Los elementos de mayor recuperación en estos botones fueron: Hierro, Manganeso y silicio, como se demuestra en la tabla 10.

Tabla 10. Recuperación de materiales ferro-aleantes.

ELEMENTO	CARBONATO DE SODIO	BÓRAX	CALIZA	TETRABORATO DE LITIO
	%	%	%	%
Fe	52,1	69,4	67	67,5
Mn	>20,52	>20,52	>20,52	>20,52
Si	5,23	>6,6	>6,6	>6,6

Fuente: Autor

Gráfica 3. Representación de la recuperación de elementos ferro-aleantes.



Fuente: Autor

Estos elementos son de gran interés en la industria metalúrgica, especialmente en la fabricación de acero y fundiciones, siendo agregados como ferroaleaciones para ajuste de composición química, además de actuar como desoxidante del baño metálico, por ende la recuperación de estos elementos tiene un gran comercio en la industria.

En esta parte, los resultados emitidos por el equipo de espectroscopia de emisión de chispa, revelan que los elementos como silicio y manganeso, superan los valores establecidos por los patrones de calibración del equipo, por ende los resultados con respecto a estos elementos pueden ser superiores a los reflejados en las grafica, pero a pesar de no ser los valores exactos, nos dan una idea cercana a la real de la recuperación de estos elementos.

3.5.1.3 Elementos no deseados

Elementos como el fosforo, azufre y carbono, a pesar que ayudan a mejorar algunas propiedades del acero como la colabilidad, bajar el punto de fusión, endurecerlo, etc, también proveen propiedades indeseadas cuando superan los límites máximos permitidos por las normas, por ello son restringidos dentro de la matriz lo mejor posible. Los resultados en porcentaje dentro de los botones metálicos se encuentra en la tabla 11.

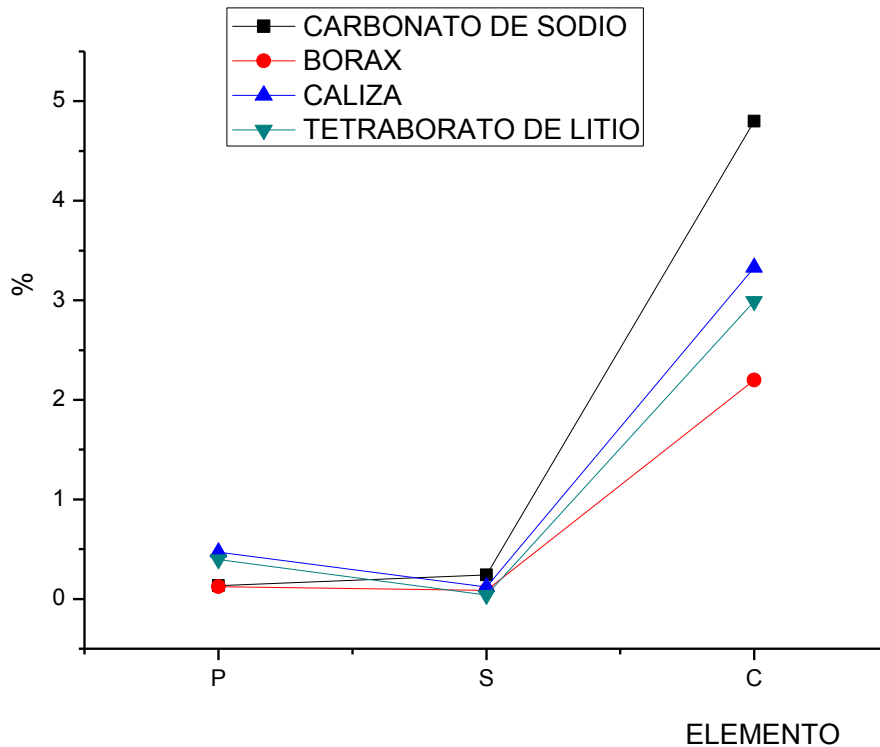
Tabla 11. Porcentaje de elementos indeseados recuperados

ELEMENTO	CARBONATO DE SODIO	BÓRAX	CALIZA	TETRABORATO DE LITIO
	%	%	%	%
P	0,132	0,124	0,471	0,397
S	0,24	0,0847	0,12	0,0383
C	4,8	2,2	3,33	2,99

Fuente: Autor

Uno de los datos más importantes, en la parte de este análisis, es que comercialmente, entre mas bajo el contenido de estos elementos en una ferroaleación, mayor son sus usos y aplicados en la industria, además que su valor por kilo, sube drásticamente, especialmente que sean de muy bajo porcentaje de carbono.

Gráfica 4. Representación de la recuperación de elementos indeseados.



Fuente: Autor

Uno de los inconvenientes que nos llevo a saturar los botones de carbono y obtener los resultados expresados en la grafica, es el mismo crisol de carburo, como se ha expresado anteriormente, las muestras son débilmente magnéticas y poco conductoras a temperatura ambiente, por eso, es necesario el uso de este tipo de crisoles, los cuales absorben la inducción, se calienta a temperaturas elevadas y por medio de radiación funden las muestras. El crisol de SiC a altas temperaturas libera carbono que interactúa con el oxígeno del medio, pero a la vez también libera carbono dentro de la escoria fundida, saturando de carbono las muestras, a pesar de su poco tiempo de exposición.

3.5.1.4 Metales de mayor interés

Por su poca abundancia en la corteza terrestre, su difícil extracción y sus incomparables propiedades adheridas a las aleaciones, el titanio y el cromo son

elementos de gran valor para industria metalúrgica, debido a esto, es de mucha importancia analizar la cuantía de estos elementos en el proyecto.

Tabla 12. Porcentaje de recuperación de metales de mayor interés.

ELEMENTO	CARBONATO DE SODIO	BÓRAX	CALIZA	TETRABORATO DE LITIO
	%	%	%	%
Ti	>2,7	0,177	0,903	0,795
Cr	0,223	0,243	0,363	0,261

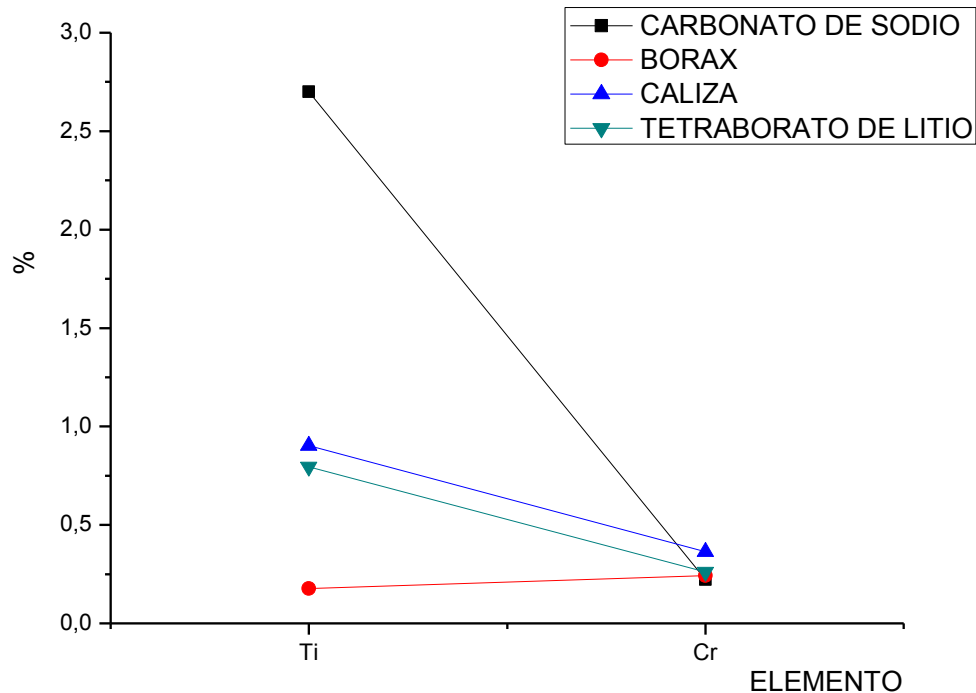
Fuente: Autor

En la tabla 11 se puede observa que en la fusión con bórax, caliza y tetraborato, las concentraciones de Ti varían, pero se mantienen en trazas menores al 1%, mientras que en carbonato de sodio, superan el 2,7%, esto, como se expreso anteriormente, se debe a que la muestra era muy pequeña y al momento del ensayo, la chipa fue tomada en la parte de la escoria, que resulta ser una escoria densa que no se alcanza a reducir pero interactúa con el metal, lo cual nos da una idea, que la temperatura no es lo suficientemente alta para reducirse en su totalidad, con respecto a la cantidad de oxido de titanio presente en la escorias.

Descartando momentáneamente el carbonato de sodio, por lo expresado anteriormente, el fundente que sigue representa la mejor cantidad de elementos recuperados es la caliza, como se representa en la gráfica.

Como resultado general del ensayo de chispa, se puede decir, que la reducción y obtención de materiales metálicos extraídos de las escorias de SAW, es posible por este método de fusión, y la viabilidad depende de factores económicos propios de la empresa. Además que el mejor fundete aplicado por su relación de recuperación y precio resulta ser la caliza.

Gráfica 5. Representación de la recuperación de metales de interés.



Fuente: Autor

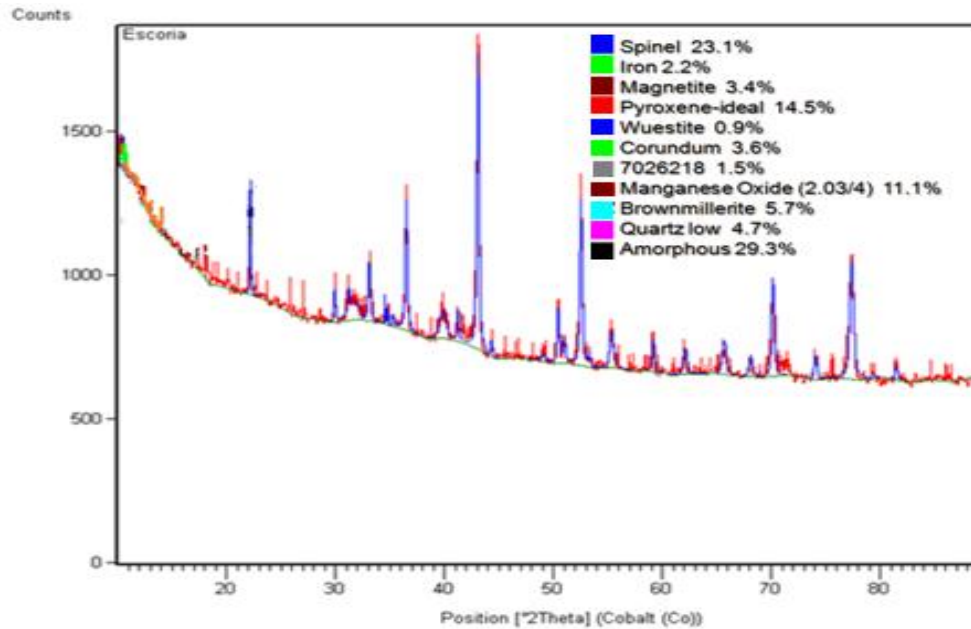
3.6 ANÁLISIS DE ESCORIAS POR DRX

Para realizar el análisis de las escorias obtenidas después de la fusión, se inicia teniendo como base la composición de las escorias antes de fundir, y de ahí comparar una a una con respecto a la escoria inicial y la escoria obtenida después de la fusión, para conocer sus transformaciones mineralógicas y los compuestos reducidos. Todo esto por Difracción de Rayos X por el método de Bragg.

3.6.1 Composición de las escorias antes de fundir

Como se puede observar en la grafica, se determinaron diez especies mineralógicas donde fueron más intensos los picos y los patrones de difracción coincidieron exactamente. Además se determinó la cantidad de material amorfo.

Gráfica 6. Difractograma DRX escoria base.



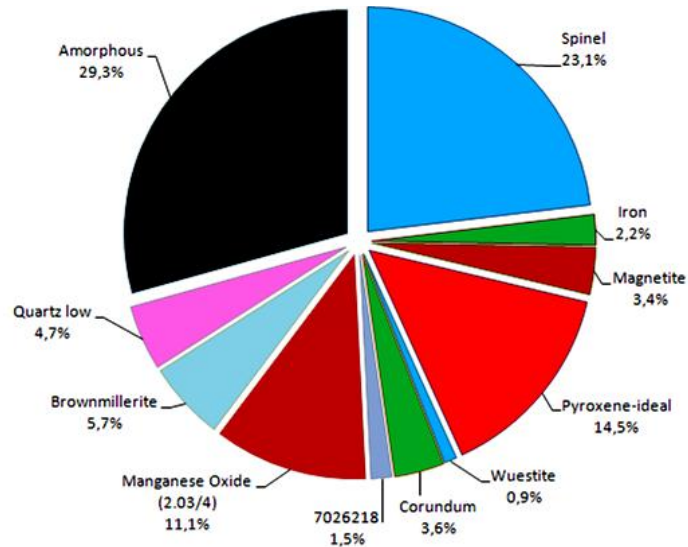
Fuente: Autor

Las especies mineralógicas en la escoria base, es predominante encontrar compuestos de óxidos de magnesio, óxidos de hierro, óxidos de silicio, óxidos de aluminio, aluminosilicatos, así como pequeñas trazas de carbonatos, óxido de titanio y hierro metálico.

Principalmente se identificó la espinela en un 23.1% de tipo óxido alúmino-magnesio ($Mg_8.00Al_{16.00}O_{32.00}$), con sistema cristalino cúbico, la brownmillerita con un 5.7% siendo un óxido múltiple anhidrato de calcio, aluminio y hierro ($Fe_4.00Al_4.00Ca_8.00O_{20.00}$), con sistema cristalino ortorrómbico, el piroxeno ideal en un 9.7% de tipo óxido silicio-magnesio ($Mg_8.00Si_8.00O_{24.00}$), con un sistema cristalino ortorrómbico, el corindón en un 3.6% ($Al_{12.00}O_{18.00}$) con sistema cristalino hexagonal, la magnetita en un 3.4% ($Fe_{24.00}O_{32}$) con sistema cristalino cúbico, hierro metálico con un 2.2% ($Fe_{4.00}$) con sistema cristalino cúbico, la especie 7026218 que corresponde a carbonatos de magnesio y óxido de titanio en un 1.5% ($Mg_{14.94}Ti_{3.06}O_{57.00}C_{131.58}$), cuarzo bajo con un 1,9% ($Si_6.00O_6.00$) con sistema cristalino hexagonal, óxido de manganeso en un 1,1% ($Mn_{16.27}O_{32.00}$) con sistema cristalino cúbico y la wustita con un 0.9% ($Fe_{22.20}O_{24.00}$) con sistema cristalino hexagonal. Todas las especies mineralógicas formadas por la interacción entre los compuestos iniciales del flux y

el contacto con la temperatura recibida del electrodo al momento de aplicar la soldadura.

Gráfica 7. Representación porcentual de las especies en la escoria base.



Fuente: Autor

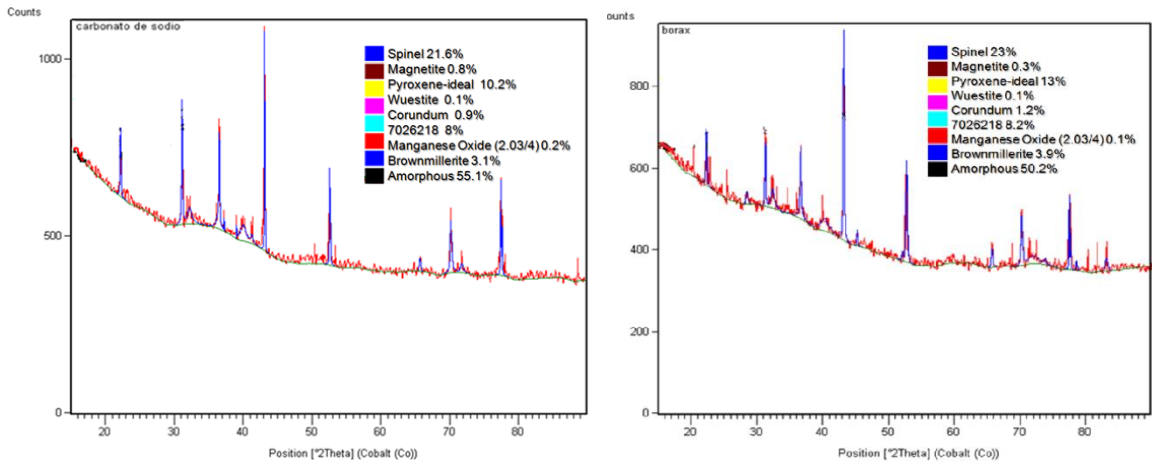
3.6.2 Análisis de escorias con fundentes

Teniendo como referencia la escoria base sin fundir en el horno de inducción, se procede a realizar un análisis en comparación con los demás resultados que se obtuvieron en los DRX de las demás escorias con fundentes.

Difractogramas realizado en equipo de DRX

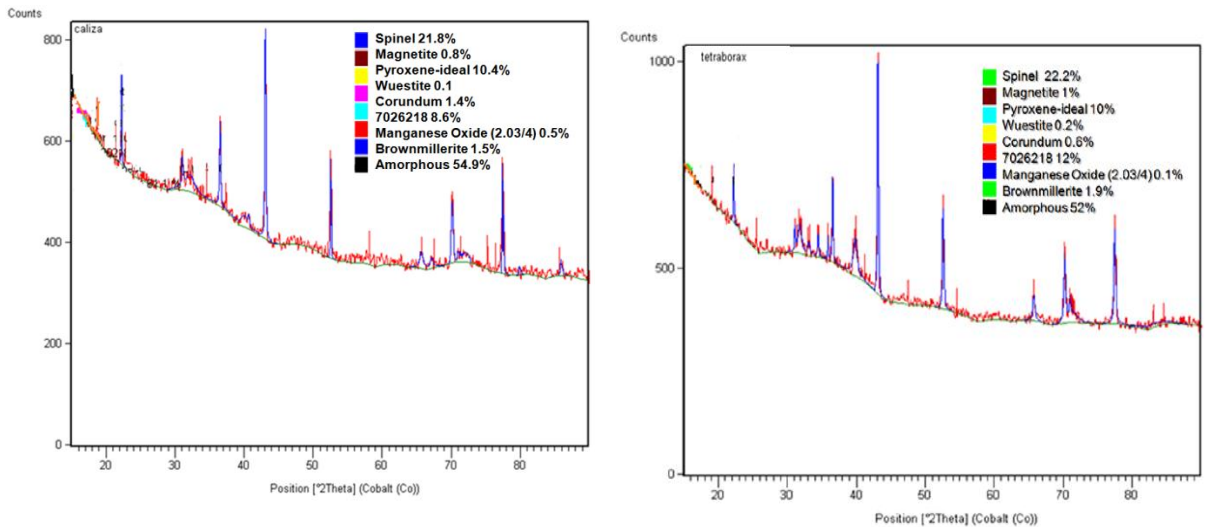
En las graficas 8 y 9 se muestran los difractogramas realizados a las muestras

Gráfica 8. Difractogramas escorias con fundentes carbonato de sodio y bórax.



Fuente: Autor

Gráfica 9. Difractogramas escorias con fundentes caliza y tetraborato de litio.



Fuente: Autor

En la tabla se expresa simplificada los resultados de las composiciones obtenidas por el ensayo de difracción de rayos x, donde las especies mineralógicas en las escorias fundidas con los diversos fundentes no varían significativamente entre composiciones, pero cabe descartar que con respecto a

la escoria base, analizada antes de fundir, la variación es relativamente dispersa, debido a que han desaparecido especies tales como el hierro metálico y el cuarzo bajo, lo cual nos da una idea que estos elementos fueron fundidos y reducidos en gran parte, además cabe la posibilidad que algunos de estos elementos dieron origen a nuevas especies mineralógicas, como es el caso del cuarzo, formando posibles silicatos con el magnesio y/o el aluminio.

Tabla 13. Especies mineralógicas encontradas antes y después de las fusiones con diferentes fundentes.

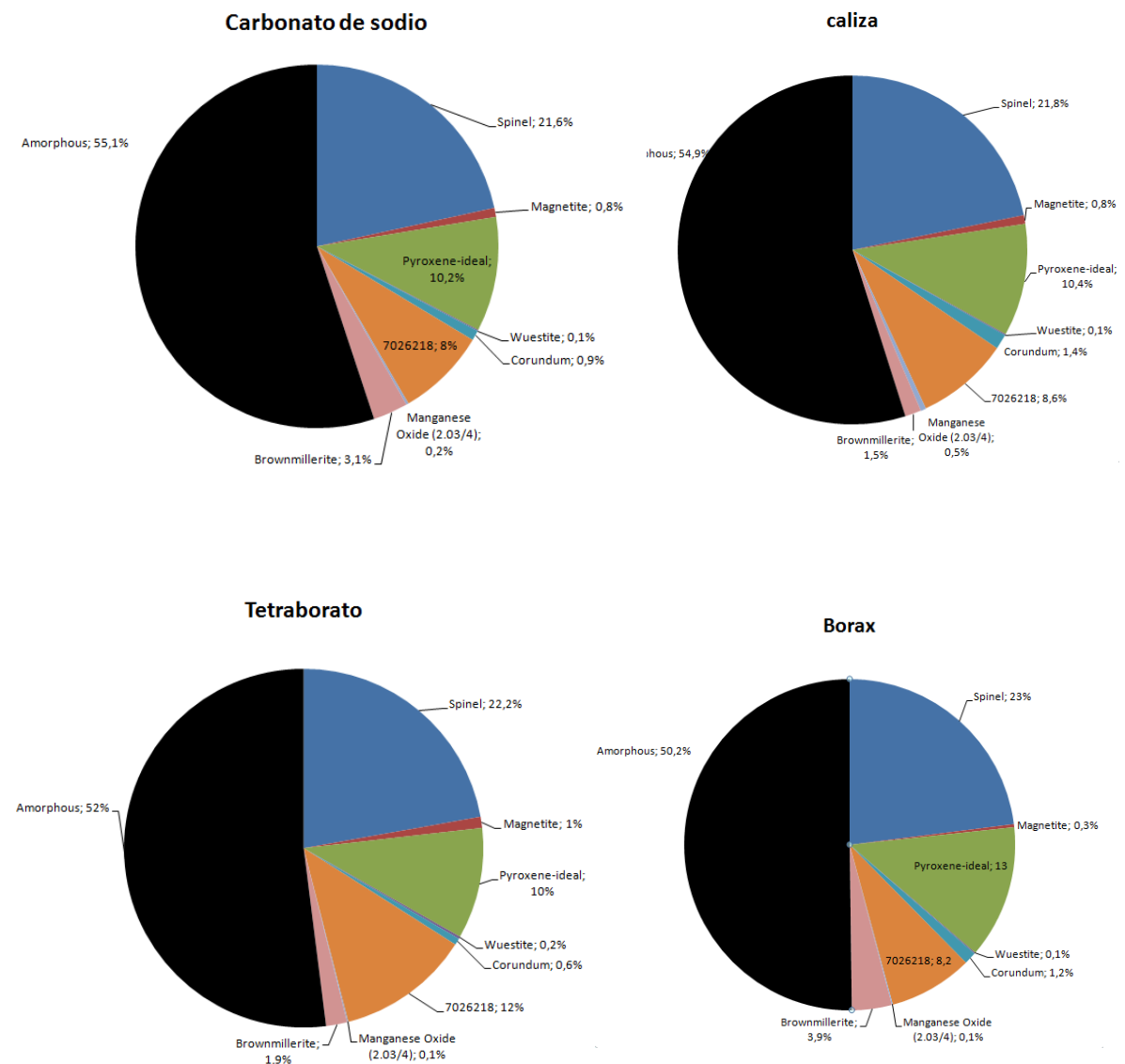
ESPECIE MINERALÓGICA	Escoria	Tetraborato de Litio	caliza	Carbonato de sodio	Borax
Espinela %	23,1	22,2	21,8	21,6	23
Hierro metálico %	2,2				
Magnetita %	3,4	1	0,8	0,8	0,3
Piroxeno-ideal %	14,5	10	10,4	10,2	13
Wustita %	0,9	0,2	0,1	0,1	0,1
Corindón %	3,6	0,6	1,4	0,9	1,2
7026218 %	1,5	12	8,6	8	8,2
Oxido de Manganeso (2.03/4) %	11,1	0,1	0,5	0,2	0,1
Brownmillerita %	5,7	1,9	1,5	3,1	3,9
Cuarzo Bajo %	4,7				
Material Amorfo %	29,3	52	54,9	55,1	50,2

Fuente: Autor

Con respecto al compuesto identificado por el software "7026218" que corresponde a carbonatos de magnesio y oxido de titanio en un 1.5% (Mg_{14.94}Ti_{3.06}O_{57.00}C_{131.58}), se incremento considerablemente, esto corresponde a la saturación de carbono proveniente del crisol de carburo, lo cual nos da una idea que al momento de fundir las escorias, se dio el medio ideal para

formar compuestos de tipo carbonato, adicionalmente los fundentes en poco porcentajes ayudaron a incrementar el contenido de mismas especies, como carbonatos, silicatos y espinelas. El compuesto correspondiente al manganeso (óxido de manganeso), fue uno de los elementos que mayor se redujo, así como los compuestos de silicio, y como era de esperar, las fusiones eran el ambiente ideal para reducir todos los compuestos correspondientes al hierro, de ahí que se puede corroborar los análisis de chispa y sustentar la cantidad de elementos recuperados.

Gráfica 10. Representación porcentual de las especies mineralógicas en SAWS después de las fusiones.



Fuente: Autor

La incrementación de la parte amorfa corresponde a un enfriamiento relativamente rápido de las escorias, lo cual no permitió una recristalización al momento de la solidificación y por tanto se obtiene unas escorias con una estructura sin definir su sistema cristalino.

4 CONCLUSIONES

- Por el procedimiento de calentamiento en horno de inducción, es posible recuperar materiales metálicos, partiendo de la fusión de mezclas de escorias de arco sumergido con los fundentes: caliza, tetraborato de litio, bórax y carbonato de sodio.
- Los rendimientos de la recuperación de materiales metálicos de las escorias de SAW oscilaron entre el 2% y el 4% de la carga total fundida.
- Partiendo de la determinación de composición química por fluorescencia de rayos X, se pudieron establecer propiedades físicas adicionales con software SlagAn3, tales como densidad, viscosidad, conductividad, etc.
- Con la determinación de composición química por FRX y propiedades físicas pos SlagAn3, se pudo clasificar que son escorias de tipo flux básico, con método de fabricación aglomerado.
- El fundente que presento mejor rendimiento en la fusión de las escorias de SAW, es la caliza, gracias a su propiedades, versatilidad, alto rendimiento y bajo precio ante los demás fundentes utilizados.
- Por el ensayo de espectroscopia de emisión de chispa, se reveló que los metales de mayor recuperación en la matriz metálica fueron el hierro, el manganeso y el silicio, además de pequeñas trazas de elementos comunes en los aceros.
- Una de las posibles aplicaciones, de la los botones recuperados de las escorias de SAW, sería como ferroaleante de silicomanganeso, en el ajuste de composiciones química en la fabricación de aceros. Cabe resaltar que hay que tener muy en cuenta elementos como el fosforo, azufre y carbono, que son muy determinantes a la hora de ser comercializados.
- Con respecto a las escorias se pudo determinar mediante difracción de rayos X, que los compuestos mineralógicos de mayor auge, son los

compuestos de tipos óxidos, pequeñas trazas de carbonato que se incrementaron significativamente en cada fusión, debido a la saturación de carbono liberada por el crisol de SiC.

- En general para la empresa HB SADELEC, la recuperación de metales y compuestos a partir de desechos sólidos de escorias del proceso de soldadura de arco sumergido, es posible, mediante una investigación concisa y coherente, que además de brindar un apoyo económico para la empresa, ayudemos como Ingenieros Metalúrgicos al mejoramiento de nuestro medio ambiente, aprovechando los desechos sólidos como materia prima para la obtención de metales y compuesto para usos industriales.

5 RECOMENDACIONES

Como las muestra para fundir no son conductoras ni magnéticas, es inevitable el uso de crisoles de SiC o de grafito en el horno de inducción, por lo cual se recomienda no tenerlo expuesto durante mucho tiempo a altas temperaturas, debido a que por su composición química, libera carbono y satura las muestras de carbono, lo cual es un factor muy importante en la obtención de aleaciones metálicas, entre más bajo el contenido de carbono dentro de la matriz mayor es el precio y el uso industrial. Además si es posible y grande la cantidad de muestra se recomienda la fusión en horno de arco eléctrico, para evitar la contaminación de aleación metálica obtenida.

La viabilidad del proyecto se puede establecer realizando un estudio económico donde se involucren la cantidad de escorias producidas por la empresa, los gastos por transporte y depósito de estos desechos sólidos, la inversión de la planta de fusión y el precio por kilo del material metálico.

A la empresa HB SADELEC, se recomienda un estudio adicional con respecto a las escorias después de la recuperación del metal por fusión, debido a que sus compuestos representan gran interés industrial, además si es posible un tratamiento de estas escorias para ser reutilizados en la fabricación de flux nuevos para el proceso de SAW. Con un estudio adicional es posible dar tratamiento a las escorias después del proceso de fusión y darles un uso adicional a compuestos tales como el MgO, carbonatos, aluminatos y silicatos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ASM committee. (1998). ASM Handbook - Casting (Vol. 15). ASM International.
- Wilver Adolfo Villegas Casares, Pablo Oscar Acereto Escoffe, Mimi Elizabeth Vargas Quiñones “Análisis ultravioleta visible: La teoría y la practica en el ejercicio profesional”, Universidad autónoma de Yucatán, facultad de ingeniería química, México.
- Klein, C. S. Hurlbut. Manual de Mineralogía, cuarta edición. Editorial Reverté.
- Pech-Canul Máximo A.* , González Dzul Carlos E. Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Mérida, Km 6 ant. Carr. a Progreso, Ap 73 Cordemex, CP 97310, Mérida, Yuc., México.2007.
- ASTM E 3. Standard guide for preparation of metallographic specimens.
- ASTM E 45. Standard test methods for determining the inclusion content of steel.
- ASTM E 8. Standard test methods for tension testing of metallic materials.
- ASTM E 384. Standard test method for microindentation hardness of materials.
- ASTM E 415. Standar test method for optical emission vacuum spectrometric analysis of carbon and low-alloy steel.
- M. Sc. Bibiana Sandianes-Vegal , bibiana@cidci.cu, Dr. Jorge Uruchurtu-ChavarínII, juch25@uaem.mx, Dr. Osmar Calderón-SecadaIII, Dr. Osmar Calderón-SánchezIV I Centro de Investigación y Desarrollo del Comercio

Interior (CID-CI), La Habana, Cuba, IIUniversidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Cuernavaca, Morelos, México, IIIEmpresa Gestión del Conocimiento y la Tecnología (GECYT), La Habana, Cuba, IVFacultad de Química de la Universidad de La Habana, Cuba. 2011.

- <http://www.hbsadelec.com.pe/servicios.html>.
- Lázaro Martín Ángela “Soldeo por arco sumergido”.
- Rudney, Valery (2003). Handbook of Induction Heating. Marcel Dekker.
- Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, dePDHonline-CourseM158.
- Material Refractario. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013, A. Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, dePDHonline-CourseM158: Schalm, S. (2005). Refractory Engineering (Segunda edición ed.). Essen, Alemania: Vulkan-Verlag.