

**RESISTENCIA AL DESGATE ABRASIVO DE UN RECUBRIMIENTO DURO
APLICADO POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE ARCO REVESTIDO**



Autores:

**FRANCISCO ANTONIO VIDAL CARLO
NÉSTOR SEGUNDO HOYOS ARTEAGA**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA - CÓRDOBA**

2017

**RESISTENCIA AL DESGATE ABRASIVO DE UN RECUBRIMIENTO DURO
APLICADO POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE ARCO REVESTIDO**

Autores:

**FRANCISCO ANTONIO VIDAL CARLO
NÉSTOR SEGUNDO HOYOS ARTEAGA**

Trabajo de grado presentado en la modalidad de Trabajo de investigación como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.

Director:

ING: LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN, Ph.D

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA - CÓRDOBA**

2017

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN
DIRECTOR

ELKIN CAMILO MEDELLÍN PÉREZ
JURADO 1

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DÓRIA
JURADO 2

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia y a todos aquellos que siempre me han apoyado, A Dios, por darme la dicha de vivir y por estar conmigo en cada momento de mi vida, por fortalecer mi corazón, darme sabiduría y haber puesto en mi camino personas que han sido mi soporte durante mi formación como persona y como profesional.

Francisco Antonio Vidal Carlo

A mi madre Elodia Josefa Arteaga Muñoz

Néstor Segundo Hoyos Arteaga

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos esta oportunidad y suministrarnos las fuerzas necesarias para seguir adelante.

A todas nuestras familias, en especial a Elodia Josefa Arteaga Muñoz, Néstor Segundo Hoyos Vidal y Francisco Miguel Vidal Burgos, Linda Rosario Carlo Hernández, es gracias a ustedes que nos han convertido en las personas que somos.

A Luis Armando Espitia Sanjuán, director de este trabajo, por su paciencia, orientación académica y por su gran contribución a nuestro crecimiento personal, gracias por creer en nosotros.

A Juan José Toro Castrillón y Mery Arrubla por su ayuda incondicional y constante en el laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

A Elkin Camilo Medellín Pérez y Yahir Enrique González Dória jurados, por su colaboración, paciencia, orientación académica, y apoyo para realizar este proyecto.

A la Empresa La Granja Industria (Mondragón), por su paciencia y disposición para la manufacturas de las probetas y aplicación de los recubrimientos.

A todos aquellos que directa o indirectamente contribuyeron en la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVO GENERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. REVISIÓN DE LITERATURA	18
3.1. DESGASTE	18
3.1.1. TIPOS DE DESGASTE.....	18
3.1.1.1. Desgaste abrasivo	20
3.1.1.2. Desgaste erosivo.	27
3.1.1.3. Desgaste por deslizamiento	29
3.1.1.4. Desgaste por reacción triboquímica.....	30
3.2. RECUBRIMIENTOS DUROS APLICADO POR SOLDADURA	32
3.2.1. GENERALIDADES.	32
3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES.	33
3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	38
3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X	38
3.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM Y EDS).....	44
3.3.2.1. Capacidad de imágenes.....	45
3.3.2.2. Estructura de análisis	46
3.3.2.3. Análisis elemental.....	46

3.3.2.4. Componentes del microscopio electrónico de barrido.....	47
4. MATERIALES Y MÉTODOS	54
4.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL DEL RECUBRIMIENTO DURO APLICADO POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE ARCO REVESTIDO.....	54
4.1.1. SELECCIÓN DEL ACERO.....	54
4.1.2. SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DURO	55
4.1.3. CORTE DE PROBETAS.....	56
4.1.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	57
4.2. ENSAYOS DE DESGASTE ABRASIVO AL RECUBRIMIENTO DURO BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO ACORDE A LA NORMA ASTM G65.....	58
4.3. RELACIÓN ENTRE MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DEL MATERIAL ENSAYADO.	59
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
5.1. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL.....	60
5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA	60
5.1.2. MEDIDAS DE MICRODUREZA	64
5.2. ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS.....	66
5.2.1. ANÁLISIS DE LA MATRIZ.....	66
5.2.2. ANÁLISIS CARBUROS HEXAGONALES	69
5.2.3. ANÁLISIS CARBUROS ALARGADOS	71

5.3.	ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	74
5.4.	RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESGASTE ABRASIVO.....	75
6.	RECOMENDACIONES	77
7.	CONCLUSIONES	78
8.	BIBLIOGRAFÍA	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales tipos de desgaste	20
Figura 2. Representación esquemática de algunos sistemas sometidos a desgaste abrasivo, a) canaletas, b) sistemas hidráulicos con elementos extraños, c) extrusoras, d) trituradoras de rocas.....	21
Figura 3. Ilustración esquemática de desgaste abrasivo a tres cuerpos.	22
Figura 4. Mecanismos de desgaste involucrados en desgaste abrasivo	22
Figura 5. Esquema de la respuesta del material ante los mecanismos de desgaste.....	23
Figura 6. Imagen real de la respuesta de materiales ante los mecanismos de desgaste abrasivo.	24
Figura 7. Representación esquemática de la máquina para ensayos de abrasión a tres cuerpos definida por la norma ASTM G65.....	26
Figura 8. Mecanismos de desgaste erosivo.....	28
Figura 9. Mecanismos de desgaste involucrados en triboquímica.	31
Figura 10. (a) Ilustración de depósito de recubrimientos duros aplicado por soldadura, (b) vista transversal de una pieza recargada.	32
Figura 11. Desgaste de microestructuras con diferentes contenidos de carbono siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM G65.....	35
Figura 12. Imágenes de microestructuras típicas de recubrimientos duros con diferentes composición, (a) Hipoeutectica, (b) eutéctica, (c) hipereutéctica con bloques hexagonales grandes.	36
Figura 13. Microestructura de uno de los recubrimientos ensayos en el estudio (RFeCr-A) con una sola capa.	37
Figura 14. Caso general de fenómeno de interferência de ondas.....	38
Figura 15. Fenómeno de interferencia de ondas: Interferencia constructiva.	39
Figura 16. Fenómeno de interferencia de ondas: Interferencia destructiva.	39

Figura 17. Esquema de la geometría de los rayos reflejados en los planos atómicos paralelos de un material.	40
Figura 18. Resultados de un experimento en difractor con cloruro de sodio.....	42
Figura 19. Resultados de un experimento en difractor con cloruro de sodio.....	43
Figura 20. Imagen característica tomada mediante microscopia electrónica de barrido.	44
Figura 21. Distribución de Fe, Ni y P entre las fases principales en un meteorito de hierro.	47
Figura 22. Imagen esquemática de un microscopio electrónico de barrido.....	48
Figura 23. Imagen esquemática de la columna del cañón de electrones en un microscopio electrónico de barrido.....	49
Figura 24. Imagen esquemática de un microscopio electrónico de barrido.....	50
Figura 25. Probetas preparadas para realizar ensayos de caracterización y abrasión según norma ASTM G65.	57
Figura 26. Imágenes de microscopía óptica de la sección transversal de la muestra evidenciando la interfaz del recubrimiento con el sustrato. a) Magnificación 100x de la interfaz entre el recubrimiento duro [1] y el sustrato de acero [2], b) magnificación 200x y c) magnificación 500x del sustrato.	60
Figura 27. Imágenes de microscopía óptica de la primera capa de la muestra de soldadura. a) Magnificación 100x, b) magnificación 200x y c) magnificación 500x.	61
Figura 28. Imágenes de microscopía óptica de la segunda capa de la muestra de soldadura. a) Magnificación 50X, b) Magnificación 100X, c) Magnificación 200X, c) Magnificación 500X.....	62
Figura 29. Imágenes de microscopia óptica de la superficie de la muestra de soldadura. a) Magnificación 50X, b) Magnificación 100X, c) Magnificación 200X, d) Magnificación 500X.....	63
Figura 30. Representación esquemática de la formación de fases en la soldadura a partir del enfriamiento del líquido.	64

Figura 31. Imagen de microscopia óptica de la superficie del recubrimiento donde se observa las Indentaciones realizadas en cada una de las fases: Matriz (M), carburos hexagonales (CH), carburos alargados (CA).	65
Figura 32. Mapa composicional de la matriz del recubrimiento depositado en la muestra.	66
Figura 33. Espectro EDS tomado en la matriz de la muestra de recubrimiento duro para el punto 2.....	67
Figura 34. Espectro EDS tomado en la matriz de la muestra de recubrimiento duro para el punto 3.....	68
Figura 35. Mapa composicional para el análisis químico de los carburos hexagonales presentes.....	69
Figura 36. Espectro EDS tomado en el carburo hexagonal a de la muestra de soldadura.	70
Figura 37. Mapa composicional de dos carburos alargados en la matriz que se presentaron en la muestra de soldadura luego de pasar por el proceso de enfriamiento.	71
Figura 38. Espectro EDS tomado en el carburo alargado a presente en la muestra de soldadura	72
Figura 39. Difractograma del recubrimiento duro West Hard 70.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de diferentes tipos de desgastes según diversos autores recopilada por Zum Gahr.....	18
Tabla 2. Parámetros para cada procedimiento a realizar en la prueba de abrasión según la norma.....	27
Tabla 3. Composición química nominal en porcentaje en peso del acero ASTM A36. .	54
Tabla 4. Composición química nominal en porcentaje en peso del recubrimiento duro WEST HARD 70.	55
Tabla 5. Parámetros de aplicación de recubrimiento en las muestras.....	56
Tabla 6. Amperajes recomendados para la aplicación del recubrimiento.....	56
Tabla 7. Medidas de microdureza en escala vickers para cada una de las fases presentes en la superficie del recubrimiento.	65
Tabla 8. Porcentaje en peso de elementos en los carburos de la muestra de soldadura para el punto 2.....	67
Tabla 9. Porcentaje en peso de elementos en la matriz de la muestra de soldadura para el punto 3.....	68
Tabla 10. Porcentaje en peso de elementos en el carburo hexagonal a de la muestra de soldadura.	70
Tabla 11. Porcentaje en peso de elementos en el carburo alargado a presente en la muestra de soldadura.	72
Tabla 12. Energía emitida teórica (rayos X), por los átomos de la muestra de soldadura.	73
Tabla 13. Pérdida de masa del recubrimiento duro y el acero de herramienta AISI D2.	75

RESUMEN

Se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo de un recubrimiento duro West Hard 70 teniendo en cuenta el catálogo de soldaduras especiales West Rode, mediante la aplicación de tres capas de recubrimiento sucesivas en dos placas de acero ASTM A36 utilizando el proceso de soldadura eléctrica de arco revestido SMAW.

La superficie del recubrimiento fue analizada por medio de microscopia óptica, medidas de microdureza, análisis cualitativo de EDS y por difracción de rayos X. La resistencia al desgaste fue medida en una máquina de desgaste abrasivo a tres cuerpos bajo norma ASTM G65 siguiendo el procedimiento A.

Los resultados mostraron que el recubrimiento es una aleación hipereutéctica formada por una matriz bifásica de martensita y carburos alargados eutécticos junto con carburos hexagonales proeutéticos. Ambos carburos son tipo M_7C_3 , ricos en Hierro y Cromo. Los resultados de desgaste abrasivo mostraron que el recubrimiento es aproximadamente 3,1 veces más resistente que un acero de herramienta AISI D2.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente avance tecnológico mundial ha permitido que diferentes empresas ofrezcan alternativas para plantear soluciones a los diferentes tipos de desgaste presentes en la industria. El desgaste abrasivo es un tipo de desgaste ampliamente encontrado en la industria. Este proceso degenerativo puede surgir en cualquier mecanismo o máquina sometido a contacto y movimiento relativo en presencia de partículas abrasivas, (Martínez Pérez, 2002).

Se presenta principalmente en la industria minera, de construcción, agrícola, naval y metalmecánica, en diferentes componentes tales como rieles, elementos de maquinaria pesada, discos de arado, hélices, bujes, entre otros, (Kato, 1997). El desgaste de componentes de máquina es uno de los problemas más costosos dentro de la industria. Varios estudios se han realizado para estimar los costos asociados al desgaste abrasivo. Martínez reportó que más del 50 % de los casos de desgaste en la industria es realizado por mecanismos de desgaste abrasivo (Martínez Pérez, 2002). Neale y Gee en el Reino Unido mostraron que aproximadamente el 25 % de la facturación por ventas anuales (~\$ 1 mil millones de libras) se pierde por problemas asociados al desgaste, también que del costo total asociado al desgaste en la industria, el 63 % corresponde al desgaste abrasivo, porcentaje mayor en comparación al desgaste por erosión que promedia el 11 % del costo total, (Neale & Gee, 2001).

La ingeniería de superficies ha experimentado sensibles avances en los últimos años, especialmente en lo que se refiere al desarrollo de materiales que pueden ser aplicados para formar recubrimientos superficiales con propiedades específicas adecuadas para

1. INTRODUCCIÓN

aplicaciones de desgaste. Una alternativa para mejorar la resistencia de componentes sometidos a desgaste abrasivo, se presenta a partir de recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica. Este proceso conocido como soldadura de recargue es un método de creciente utilización en componentes de máquinas sometidos a desgaste severo, corrosión u oxidación, (Giachino & Weeks, 2007).

En el mercado existe una gran variedad de electrodos para producir recubrimientos utilizados en desgaste abrasivo. Sin embargo, la selección de un recubrimiento es tomada sin fundamento científico, debido a que solamente se tiene en cuenta la información suministrada por el fabricante a través de catálogos, o basado en experiencias anteriores, por tanto, existe un desconocimiento sensible por parte del usuario a la hora de escoger el recubrimiento.

Teniendo como objetivo proveer una alternativa para aumentar la vida útil de componentes sometidos a desgaste abrasivo con la finalidad de disminuir costos asociados a mantenimiento, compra de nuevos componentes, tiempo de reparación, el número de detenciones obligadas para mantenimiento, entre otros. En este proyecto se estudió microestructuralmente un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido y posteriormente, se realizaron ensayos de desgaste abrasivo a tres cuerpos acorde a la norma ASTM G65. Este trabajo contribuyó a crear un soporte académico bajo un fundamento científico que permitió entender las propiedades y características requeridas en un recubrimiento utilizado en aplicaciones de desgaste abrasivo.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia al desgaste abrasivo bajo norma ASTM G65 de un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar química y microestructuralmente un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido.

- ✓ Realizar ensayos de desgaste abrasivo a un recubrimiento duro bajo condiciones controladas de laboratorio acorde a la norma ASTM G65.

- ✓ Establecer relaciones entre microestructura y resistencia al desgaste abrasivo del material ensayado comparando la pérdida de masa con el acero de herramienta AISI D2.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.DESGATE

El desgaste es definido como la pérdida de material producida por superficies en contacto con movimiento relativo entre ellas. (Stachowiak G. W., 2005). El estudio del desgaste hace parte de la tribología, definida como la ciencia y tecnología que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo. La palabra tribología es derivada del griego tribos que significa frotamiento y abarca científicamente investigaciones que incluyen fricción, lubricación y desgaste, (Zum Gahr, 1987). La fricción y el desgaste usualmente traen consecuencias negativas en el funcionamiento de las máquinas y componentes, cuestan dinero por pérdida de energía y de material, reducen la calidad de los productos, disminuyen la producción y pueden causar accidentes. (Ludema, 1996).

3.1.1. TIPOS DE DESGASTE

Existen varias clasificaciones de procesos de desgaste según los autores que las proponen. La característica común es el uso del mecanismo para distinguir el proceso de desgaste. La tabla 1 muestra una clasificación de los tipos de desgaste realizada por algunos autores. (Zum Gahr 1987).

Tabla 1. Clasificación de diferentes tipos de desgastes según diversos autores recopilada por Zum Gahr.

3.1.1. TIPOS DE DESGASTE

	Autores	Clasificación de procesos de desgaste
1	Burwell y Strang	Desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, desgaste corrosivo, desgaste por fatiga superficial, fretting, erosión y cavitación
2	Jahanmir	Adhesión, delaminación, fretting, abrasión, desgaste por impacto, fatiga superficial, desgaste corrosivo, desgaste difusivo, desgaste eléctrico por contacto.
3	Godfrey	Adhesión suave, adhesión severa, abrasión, erosión, erosión, fatiga, delaminación, corrosión, electrocorrosión, fretting corrosión, daños por cavitación, descarga eléctrica y pulido
4	Rice	Adhesión, abrasión, fatiga, corrosión u oxidación.
5	Norma DIN 50320	Adhesión, abrasión, fatiga superficial y reacción triboquímica.

Fuente. Zum Gahr (1987)

Zum Gahr. (1987) Estableció que la cantidad de procesos de desgaste podría ser reducida teniendo en cuenta el punto de vista del mecanismo básico porque algunos términos son redundantes o repetitivos, por ejemplo, en la clasificación de Godfrey mostrada en la Tabla 1 se mencionan como tipo de desgaste adhesión mediana y adhesión severa, sin embargo es el mismo mecanismo “adhesión”, en realidad lo que se describe es la severidad del desgaste. De acuerdo a esto, Zum Gahr propuso cuatro tipos de desgaste principales para describir cualquier tipo de desgaste. Esta clasificación general se muestra en la figura 1.

3.1.1. TIPOS DE DESGASTE

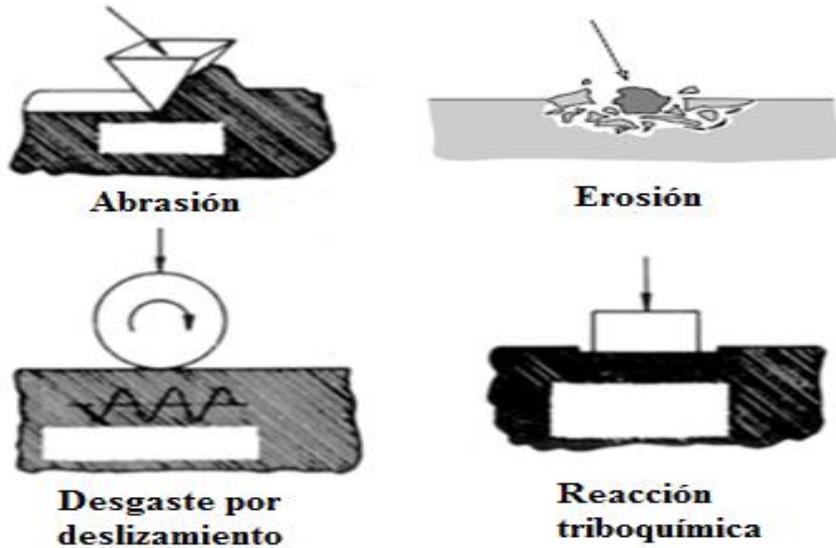


Figura 1. Descripción esquemática de los cuatro principales tipos de desgaste

Fuente. Adaptado de (Zum Gahr, 1987).

A continuación se hace una breve descripción de estos tipos de desgaste.

3.1.1.1. Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo es el desplazamiento de material causado por la presencia de partículas duras incrustadas entre una o ambas superficies o por la presencia de protuberancias duras en una o ambas superficies en movimiento relativo. Una “partícula dura” puede ser un material externo, por ejemplo, un mineral como sílice, alúmina u otros. El desgaste abrasivo puede ser clasificado dependiendo del número de partes involucradas en abrasión a dos cuerpos y abrasión a tres cuerpos. En la abrasión a dos cuerpos, el cuerpo abrasivo se mueve libremente sobre la cara de un material, como arena deslizándose por una tolva o el dragado de grava. En la abrasión a tres cuerpos las partículas abrasivas

3.1.1.1. DESGASTE ABRASIVO

actúan como elemento de interface entre el cuerpo sólido y el contracuerpo, (Zum Gahr, 1987). La figura 2 muestra algunos sistemas en los cuales se presenta desgaste abrasivo.

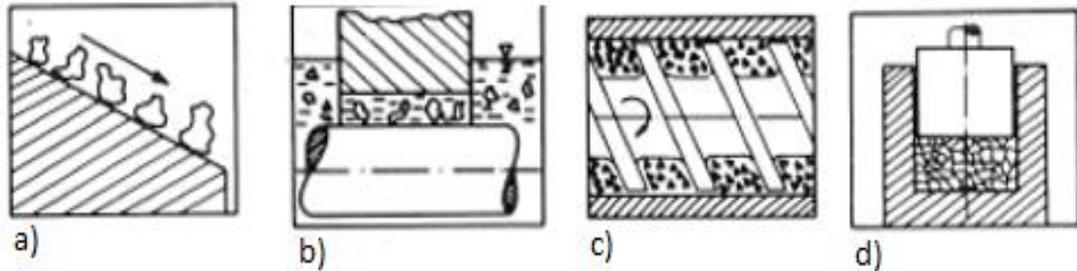


Figura 2. Representación esquemática de algunos sistemas sometidos a desgaste abrasivo, a) canaletas, b) sistemas hidráulicos con elementos extraños, c) extrusoras, d) trituradoras de rocas.

Fuente. Adaptado de Zum Gahr (1987)

3.1.1.1.1. Mecanismos de desgaste abrasivo.

El desgaste por deformación plástica toma lugar en el desgaste abrasivo durante la deformación de asperezas. El desgaste abrasivo ocurre durante el contacto de dos superficies llamadas cuerpo y contracuerpo. La remoción de material ocurre porque el cuerpo es considerablemente más duro que el contracuerpo, o debido a la introducción de partículas duras entre las dos superficies en contacto. Cuando existe movimiento relativo entre las superficies, el cuerpo o las partículas duras aran y remueven material del contracuerpo, produciendo surcos o rasguños en la superficie. La figura 3 ilustra la remoción de material en el contracuerpo producto de las asperezas del cuerpo o por la introducción de partículas duras entre las superficies.

3.1.1.1. MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

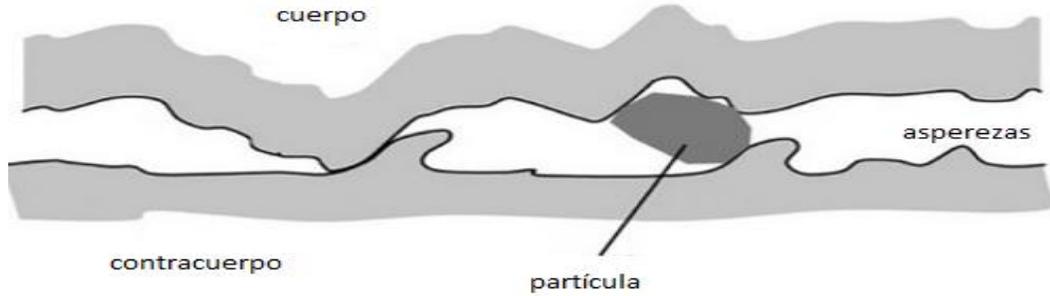


Figura 3. Ilustración esquemática de desgaste abrasivo a tres cuerpos.

Fuente: Adaptado de Zum Gahr (1987)

Dependiendo de la geometría de la superficie dura y del grado de penetración, la remoción del material es llevada a cabo por diferentes mecanismos de desgaste. La figura 4 muestra los mecanismos involucrados en el desgaste abrasivo, una interacción física entre la partícula abrasiva y la superficie del material como lo son corte, arado, fatiga y agrietamiento.

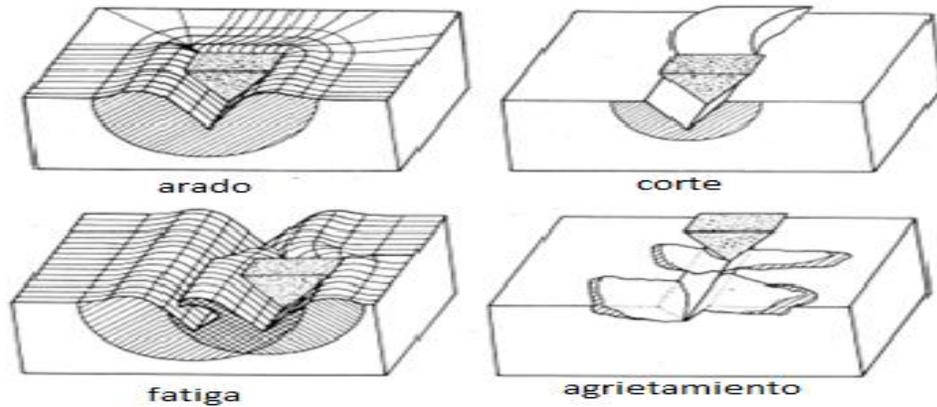


Figura 4. Mecanismos de desgaste involucrados en desgaste abrasivo

Fuente. Adaptado de (Zum Gahr, 1987)

En la figura 4, durante el **arado** se produce un desplazamiento de material a los lados y al frente, creando crestas y proa respectivamente. En el **corte**, la pérdida de material es

3.1.1.1. MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

igual al volumen de la ranura producida, estos fenómenos son típicos en materiales dúctiles. El **agrietamiento**, ocurre cuando hay altas concentraciones de esfuerzos impuestas por las partículas sólidas, (Bhushan, 2013). **La fatiga** se produce cuando la superficie es sometida a esfuerzos repetitivos, produciendo un desprendimiento de material, (González Hernández, 2008).

La respuesta del material ante estos mecanismos de desgaste depende entre otros factores de su naturaleza dúctil o frágil. Cuando el material presenta una respuesta dúctil se puede producir deformación elástica y plástica y posteriormente, remoción de material. En este caso, existe desplazamiento de material a los lados o al frente creando una proa. Si la respuesta del material es frágil, generalmente se generan grietas en la superficie. Es importante aclarar que los anteriores mecanismos pueden aparecer en conjunto tanto en los materiales dúctiles como frágiles. Las figuras 5 y 6 muestran esquemáticamente y de forma real estos mecanismos de desgaste.

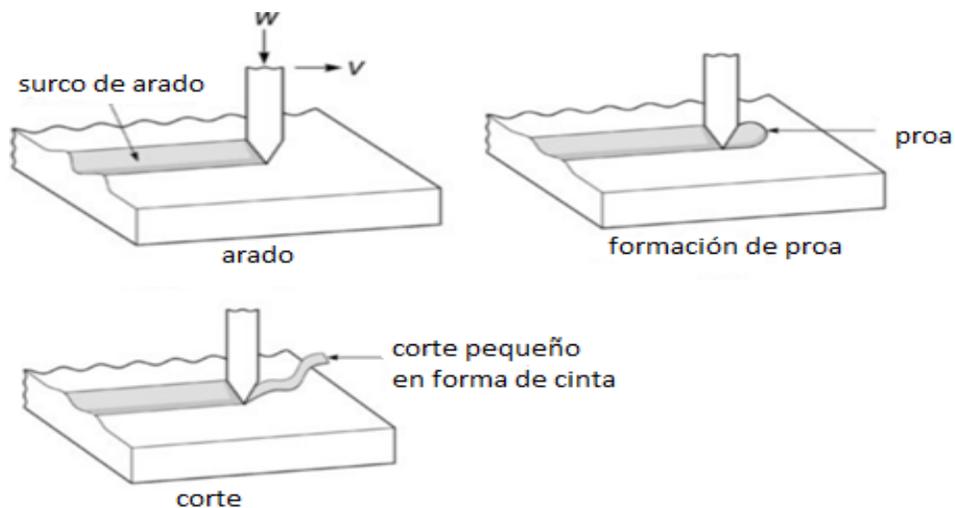


Figura 5. Esquema de la respuesta del material ante los mecanismos de desgaste.

Fuente. Adaptado de Zum Gahr (1987)

3.1.1.1. MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

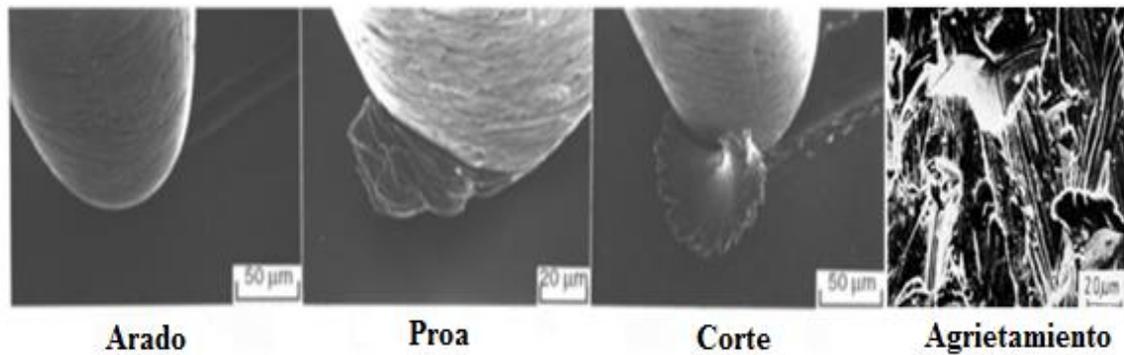


Figura 6. Imagen real de la respuesta de materiales ante los mecanismos de desgaste abrasivo.

Fuente. Adaptado de (Bhushan, 2013) y (Zum Gahr, 1987).

3.1.1.1.2. Ensayos para medir resistencia al desgaste abrasivo norma ASTM G65

Existen varias normas para realizar ensayos de abrasión a nivel de laboratorio como lo son la norma ASTM G65, DIN 50 320, ISO 8486 - 1. El método de ensayo propuesto en la norma ASTM G65 cubre los procedimientos para determinar la resistencia de materiales metálicos a la abrasión por medio de arena seca y una rueda de caucho. La intención de este ensayo es medir la resistencia a abrasión de diferentes materiales bajo un conjunto específico de condiciones. Los resultados del ensayo de abrasión son reportados como pérdida de volumen en milímetros cúbicos para un procedimiento de ensayo en particular. Para materiales con resistencia a la abrasión superior tendrán un menor volumen de pérdida.

Este método cubre cinco procedimientos recomendados los cuales son apropiados para específicos grados de resistencia al desgaste o espesores de material.

3.1.1.1.2. ENSAYOS PARA MEDIR RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO NORMA ASTM G65

✓ **Procedimiento A:** relativo a ensayos rigurosos que colocan a los materiales metálicos en un rango de pérdida de volumen desde baja a extrema resistencia a la abrasión. Este es particularmente usado en el rango de materiales de media a extrema resistencia a la abrasión.

✓ **Procedimiento B:** una variación del procedimiento A. Este puede ser usado para materiales altamente resistentes a la abrasión, pero es particularmente usado en materiales en el rango de media a baja resistencia a la abrasión. El procedimiento B debe ser usado cuando los valores de pérdida en volumen desarrollados por el procedimiento A exceden los 100 mm^3 .

✓ **Procedimiento C.** una variación a corto alcance del procedimiento A para uso en capas o recubrimientos delgados.

✓ **Procedimiento D.** Esta es una variación del procedimiento A para cargas bajas, el cual es particularmente usado en materiales en el rango de baja resistencia a la abrasión.

✓ **Procedimiento E.** Variación corta del procedimiento B que es usada en materiales con media o baja resistencia a la abrasión.

La figura 7 muestra de manera esquemática la máquina para ensayo abrasivo según la norma ASTM G65.

3.1.1.1.2. ENSAYOS PARA MEDIR RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO NORMA ASTM G65

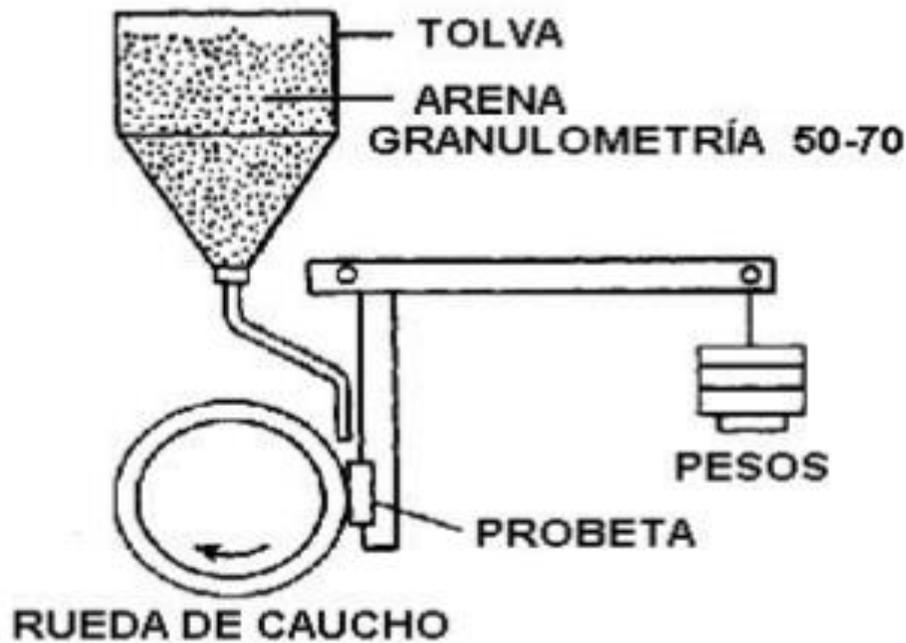


Figura 7. Representación esquemática de la máquina para ensayos de abrasión a tres cuerpos definida por la norma ASTM G65.

Fuente. Adaptado de (ASTM G65, 2004).

La máquina está compuesta por una tolva, una rueda giratoria de acero revestida con caucho y un mecanismo de contrapeso para aplicar una fuerza específica sobre la probeta. Se utiliza como abrasivo arena con granulometría AFS 50-70, la cual se inyecta entre la probeta y la rueda de acero revestida con caucho. Antes y después de los ensayos la probeta se pesa para determinar la pérdida de masa. Dependiendo del tipo de material, la norma ASTM G65 suministra los parámetros de operación del ensayo como lo muestra la tabla 2.

3.1.1.1.2. ENSAYOS PARA MEDIR RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO NORMA ASTM G65

Tabla 2. Parámetros para cada procedimiento a realizar en la prueba de abrasión según la norma.

PROCEDIMIENTO ESPECIFICADO	FUERZA APLICADA A LA MUESTRA, N (lb)	REVOLUCIONES DE LA RUEDA	ABRASIÓN LINEAL	
			m	Ft
A	130(30)	6000	4309	14138
B	130(30)	2000	1436	4711
C	130(30)	100	71.8	236
D	45(10.5)	6000	4309	14138
E	130(30)	1000	718	2360

Fuente. Adaptado de (ASTM G65, 2004)

3.1.1.2. Desgaste erosivo.

El desgaste erosivo es causado por el impacto repetitivo de partículas sólidas o líquidas en la superficie de un objeto. El desgaste erosivo ocurre en una amplia variedad de máquinas, ejemplos típicos son los daños a los álabes de las turbinas de gas cuando un avión vuela a través de nubes de polvo.

3.1.1.2.1. Mecanismos de desgaste erosivo

El desgaste por erosión implica varios mecanismos de desgaste que son controlados por el material de la partícula, el ángulo de incidencia, la velocidad de impacto, y el tamaño de la partícula. Si la partícula es dura y sólida el proceso se desarrolla de forma similar al desgaste por abrasión. El término desgaste erosivo se refiere específicamente al

3.1.1.3. MECANISMOS DE DESGASTE EROSIVO

número indeterminado de mecanismos de desgaste que se producen cuando partículas pequeñas impactan la superficie de componentes mecánicos. Los mecanismos de desgaste ilustran a continuación en la figura 8.

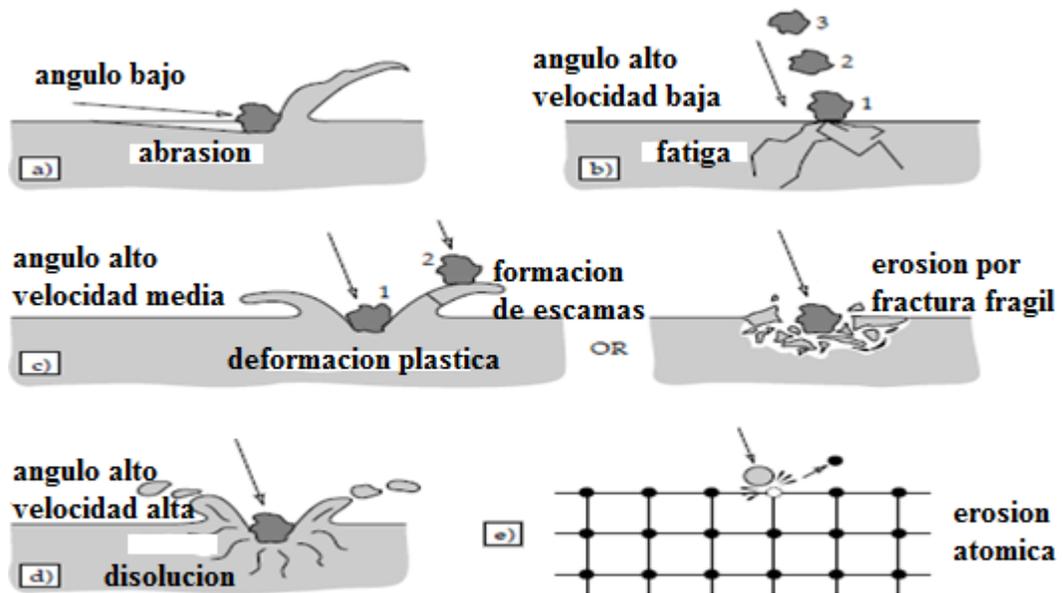


Figura 8. Mecanismos de desgaste erosivo.

Fuente. Adaptado de (Stachowiak & Batchelor, 1993)

El ángulo de incidencia es el ángulo entre la superficie erosionada y la trayectoria de la partícula inmediatamente antes del impacto, un bajo ángulo de incidencia se presenta en procesos como la abrasión debido a que las partículas realizan un seguimiento de toda la superficie desgastada después del impacto. Un alto ángulo de incidencia causa mecanismos de desgaste típicos de erosión. La velocidad de la partícula erosiva tiene un efecto muy fuerte sobre el proceso de desgaste. Si la velocidad es muy baja, el impacto no es suficiente para que se produzca la deformación plástica y el desgaste toma camino por

3.1.1.3. MECANISMOS DE DESGASTE EROSIVO

la fatiga superficial. Cuando se aumenta la velocidad se producen deformaciones plásticas con el impacto de las partículas, (Stachowiak & Batchelor, 1993).

3.1.1.3. Desgaste por deslizamiento

Se presenta cuando dos superficies están en movimiento relativo una contra la otra. Los tipos de daños varían en las dos superficies si existe o no una pequeña lubricación. El desgaste por deslizamiento ocurre por uno o más de tres mecanismos. En el primer mecanismo el óxido de control en el proceso de desgaste por deslizamiento se presenta cuando la superficie alcanza altas temperaturas, ya sea por medio de la temperatura ambiental o por fricción.

3.1.1.3.1. Mecanismos de desgaste por deslizamiento

Generalmente ocurre por tres mecanismos.

✓ En el **primer mecanismo**, se presenta a altas temperaturas, ya sea ambiental o por medio de la fricción. Esto se presenta porque el óxido crece a tasas de incremento con la temperatura, hay momentos en que los restos de óxido se quedan atrapados en forma de partículas discretas o escamas entre las caras de deslizamiento, causando un desgaste abrasivo. La combinación del desgaste por deslizamiento abrasivo es conocido como fretting, (Davis, 2000).

3.1.1.3. MECANISMOS DE DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

✓ El **segundo mecanismo** de desgaste por deslizamiento está asociado con el contacto de altos esfuerzos, causando rompimiento en películas de óxido en el contacto metal con metal, como ejemplo se puede citar la soldadura en frío en la cual se fracturan pequeños fragmentos denominados escorias. (Davis, 2000)

✓ El **tercer mecanismo** de desgaste por deslizamiento, está asociado con ciclos de esfuerzos, causados por materiales periódicamente prensados uno contra el otro, el material es perdido a causa de una profunda grieta fatigada. (Davis, 2000)

3.1.1.4. Desgaste por reacción triboquímica

El desgaste por reacciones triboquímicas puede ser caracterizado por el frotamiento entre dos superficies solidas que reaccionan con el ambiente, el ambiente corrosivo puede ser gaseoso o líquido, (Zum Gahr, 1987).

3.1.1.4.1. Mecanismos de desgaste triboquímico

Los mecanismos de desgaste triboquímicos son ilustrados en la figura 9, se tienen los siguientes mecanismos de desgaste.

a) El contacto metálico entre las asperezas superficiales que conducen a la eliminación de metal debido a la adherencia de pequeñas partículas de desgaste metálico producido.

3.1.1.4.1. MECANISMOS DE DESGASTE TRIBOQUÍMICO

b) Las reacciones químicas de los metales con el ambiente crean capas superficiales protectoras que reducen el contacto metálico.

c) El agrietamiento de capas superficiales protectoras es causado por altas presiones a nivel local por las partículas de desgaste.

d) Las partículas metálicas y no metálicas de desgaste abrasivo pueden actuar abrasivamente y colocar áspero el contacto entre las superficies. La formación de capas superficiales protectoras puede suavizar el contacto nuevamente.

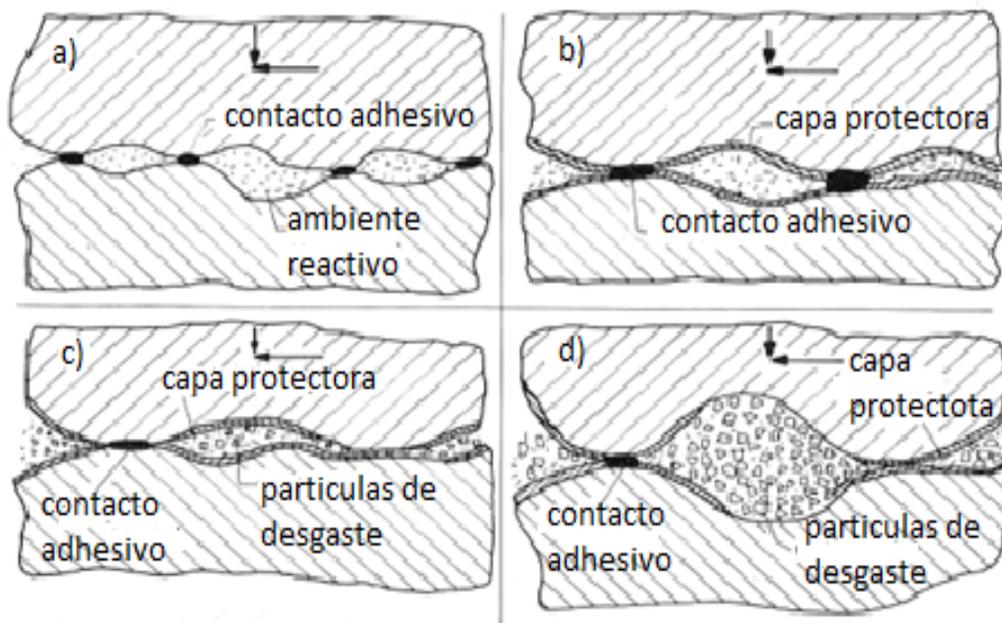


Figura 9. Mecanismos de desgaste involucrados en triboquímica.

Fuente. Adaptado de (Zum Gahr, 1987).

3.2.RECUBRIMIENTOS DUROS APLICADO POR SOLDADURA

Una alternativa para mejorar la resistencia de componentes sometidos a desgaste abrasivo se presenta a partir de recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica. Este proceso conocido como soldadura de recargue, hardfacing, surfacing o recargues duros, (Venkatesh, Sriker, & Prabhakar, 2015) es un método de creciente utilización en componentes de máquinas sometidos a desgaste severo, corrosión u oxidación, (Giachino & Weeks, 2007).

3.2.1. GENERALIDADES.

La aplicación de recubrimientos duros por soldadura eléctrica es un método de bajo costo donde se aplica un material resistente al desgaste en superficies o componentes metálicos para extender su vida útil. Aunque se utiliza principalmente para restaurar piezas desgastadas por condiciones de uso por medio de recargue, se aplica también a nuevos componentes antes de ponerse a funcionar. La figura 10 muestra una ilustración de un depósito de un recubrimiento duro aplicado por soldadura, en el cual se observan 4 capas de aleación y la vista transversal de una muestra.

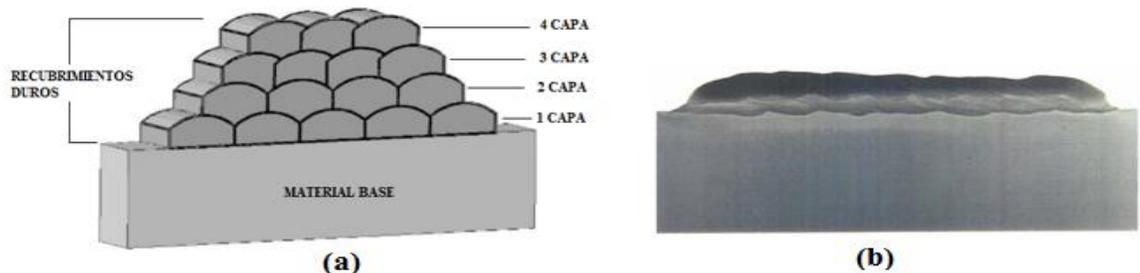


Figura 10. (a) Ilustración de depósito de recubrimientos duros aplicado por soldadura, (b) vista transversal de una pieza recargada.

3.2.1. GENERALIDADES

Fuente. Adaptado de Gualco et al. (2010)

El recargue duro por soldadura se caracteriza por aumentar de forma considerable la vida de partes críticas en ensamblajes de máquinas y mecanismos. Este tipo de deposición debe su gran aplicación, en gran medida, al hecho de que las piezas obtenidas son más económicas que las piezas semejantes macizas de acero de alta aleación o aleaciones especiales, ya que la relación entre la masa del recargue y la masa total de piezas es pequeña, Morral et al. (1985).

Existe una clasificación para recubrimientos duros aplicados por soldaduras (Crook & Farmer, 1992). Esta clasificación divide las aleaciones empleadas en los siguientes cinco grupos: aleaciones de reconstrucción, aleaciones para desgaste metal – metal, carburos de tungsteno, aleaciones no ferrosas y aleaciones metal – tierra.

3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES.

Behavior (2010) menciona que las aleaciones para desgaste metal – tierra, presentan depósitos con composiciones químicas similares a las de fundiciones blancas de alto cromo (25 – 28% Cr), en las cuales se forman carburos durante la solidificación, obteniendo excelente resistencia al desgaste. Este tipo de fundiciones se caracteriza por los carburos eutécticos M_7C_3 duros, relativamente discontinuos, presente en su estructura, al contrario de los carburos eutécticos M_3C más suaves y continuos presentes en las fundiciones aleadas que poseen menos cromo. Su resistencia al desgaste se da por las

3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES

características de los carburos presentes y por el tipo de matriz entre las que se encuentran: austenítica, perlítica o martensítica.

Varios autores han evaluado la resistencia al desgaste abrasivo de diferentes recubrimientos duros aplicados por soldadura eléctrica. Gil et al (2004) mencionan que los recubrimientos duros se aplican con el objetivo de mejorar la resistencia al desgaste de una pieza o componente y para extender su vida de servicio. Son empleados principalmente en operaciones de reparación y reconstrucción para evitar así el costoso remplazo de la pieza.

Kotecki & Ogborn. (1995) Realizaron un estudio de numerosas aleaciones de recubrimientos duros (200 composiciones) aplicados mediante tres procesos de soldadura: SMAW (Shielded Metal Arc Welding o soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido), FCAW (Flux Cored Arc Welding o Soldadura por arco con núcleo de fundente) Y SAW (Surface Acoustic Wave o soldadura por arco sumergido); en una dos y cuatro capas para evaluar cuantitativamente la resistencia a la abrasión en función de la composición y dureza. El método utilizado para el estudio fue siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM G65. Los autores relacionaron la resistencia a la abrasión con dureza, contenido de cromo, contenido de carbono y microestructura. Concluyeron que la microestructura es el factor determinante más importante para alcanzar elevada resistencia abrasiva, siendo el contenido de carbono un mejor indicador que la dureza.

La figura 11 muestra el desgaste siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM G65 en función del contenido de carbono para las siguientes microestructuras: ferrita/bainita (**FB**), martensita (**MS**); mezcla de martensita y austenita (**MA**); austenita rica en

3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES

manganeso (AM); austenita primaria con austenita-carburo eutéctico (PA); austenita-carburo cercano al eutéctico (NE); carburos primarios con austenita-carburo eutéctico (PC).

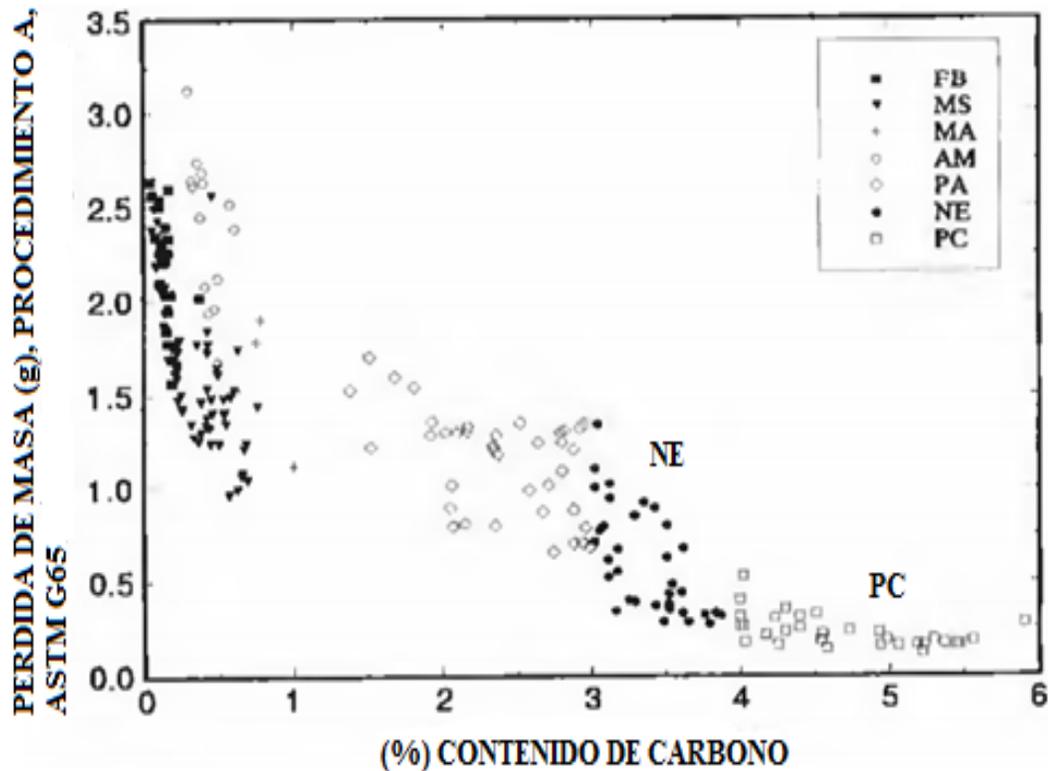


Figura 11. Desgaste de microestructuras con diferentes contenidos de carbono siguiendo el procedimiento A de la norma ASTM G65.

Fuente. Adaptado de (Kotecki & Ogborn, 1995).

El menor desgaste fue para recubrimientos duros con contenidos de carbono entre el 4 % y 5 % en peso y con una microestructura de carburos primario con austenita – carburo eutéctico (PC) seguido de aleaciones con microestructura austenita-carburo cercano al eutéctico (NE), con 3 % - 4 % de carbono.

3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES

Bálsamo et al. (1995) Mostraron que altos porcentajes de carbono y cromo promueven la formación de microestructuras hipereutéticas con carburos grandes y de sección hexagonal, con contenidos desde 4 % de C y 16 % de Cr, hasta 6 % de C y 35 % de Cr, mientras que contenidos bajos a medios de carbono y cromo favorecen microestructuras hipoeutéticas y eutéticas, con contenidos de C hasta de 4 %. Estas últimas son menos resistentes a la abrasión, pero ofrecen mayor tenacidad y por lo tanto, más resistencia al impacto. Ejemplos de microestructuras hipoeutéticas, eutética e hipereutética se muestran en la figura 12.

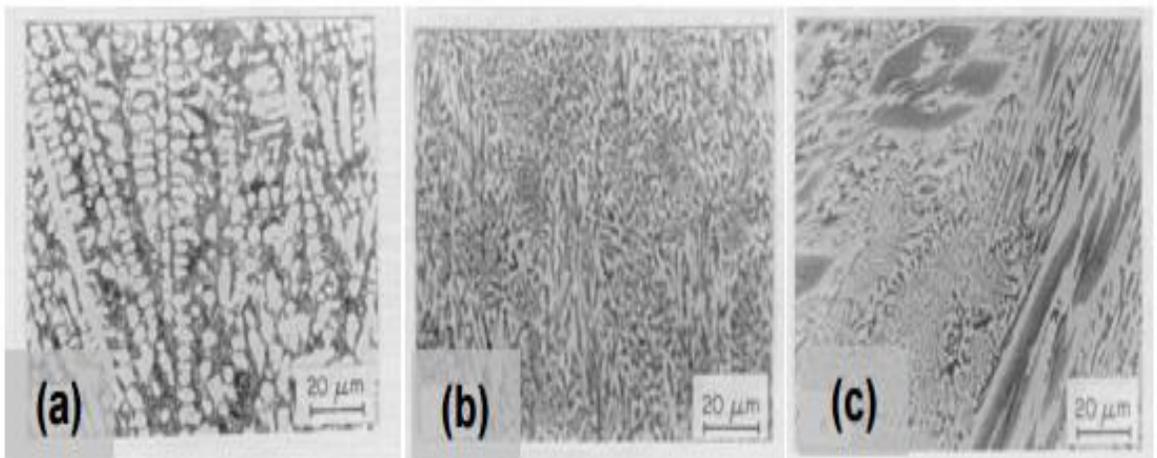


Figura 12. Imágenes de microestructuras típicas de recubrimientos duros con diferentes composición, (a) Hipoeutectica, (b) eutética, (c) hipereutética con bloques hexagonales grandes.

Fuente. Adaptado de (Bálsamo, Scotti, & Biasoli de Mello, 1995).

Toro et al. (2004) Realizaron una evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo usando ensayo normalizado de arena seca y rueda de caucho de dos recubrimientos duros con alto contenido de Cr y W para aplicaciones en la industria minera, aplicando los

3.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL EN MATERIALES ANTIDESGASTE SEGÚN AUTORES

recubrimientos en una sola capa sobre un sustrato de acero ASTM A36 mediante soldadura eléctrica de arco revestido (SMAW). Fue concluido que la dureza no es un parámetro concluyente al momento de evaluar la resistencia al desgaste abrasivo, puesto que pequeñas variaciones en dureza llevaron a cambios grandes en pérdidas de masa por abrasión. Además encontraron que al usar una sola capa de recubrimiento por proceso SMAW se obtiene mucha dilución del material base dentro del recubrimiento y por ende dicho recubrimiento presenta características heterogéneas, estimulándose la formación de austenita pro-eutéctica y reduciendo la resistencia al desgaste abrasivo. En la figura 13 se observan carburos primarios con amplia variedad de tamaños y matriz eutéctica. Este recubrimiento presentó la mejor resistencia al desgaste abrasivo de todas las superficies que fueron ensayadas en el estudio.

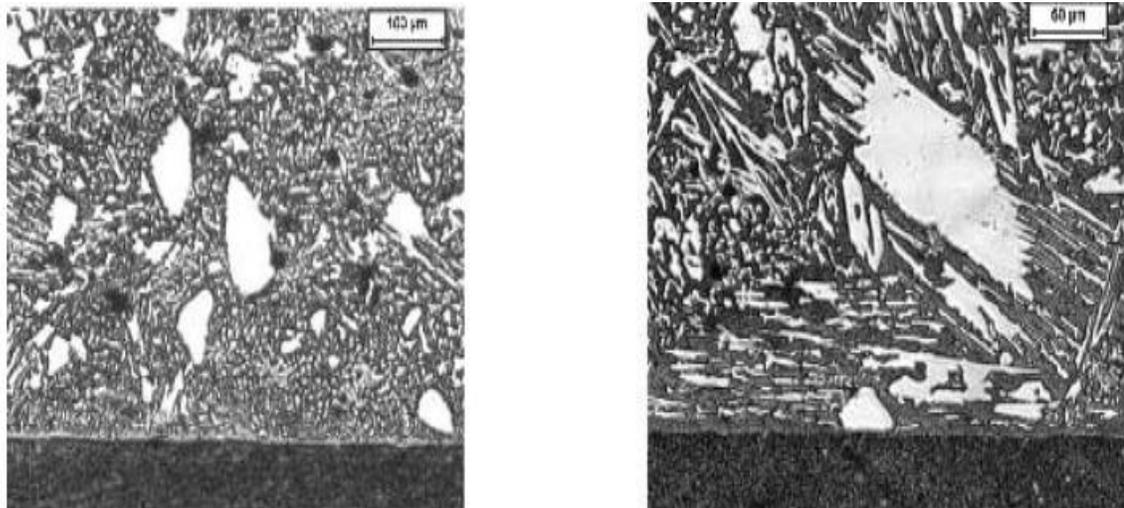


Figura 13. Microestructura de uno de los recubrimientos ensayos en el estudio (RFeCr-A) con una sola capa.

Fuente. Toro et al. (2004)

3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X es la principal herramienta para investigar la estructura a escala de dimensiones atómicas. Con esta técnica mediante la aplicación de ciertas leyes de la física se demostró que la longitud de onda de la radiación electromagnética debe ser del orden del tamaño del detalle que se va a investigar, lo cual traduce que si se va a investigar dimensiones atómicas del orden de 0.5 a 50 Å, se requiere una radiación electromagnética cuya energía es característica de la de los rayos X. Los rayos X, fueron descubiertos en el siglo XIX, luego, Von Laue y Bragg desarrollaron la teoría de la difracción de rayos X a principios del siglo XX. Es una técnica relativamente sencilla, pero que puede proporcionar informaciones exactas acerca de los espacios entre los planos y de las posiciones entre los átomos, (Goldstein et al., 2003).

Repasaremos el mecanismo de interacción ondulatoria, llamado interferencia, que se ilustra en la figura 14. Se basa en la observación de las múltiples amplitudes de onda que se interfieren y se suman, formando la amplitud de una onda compuesta.

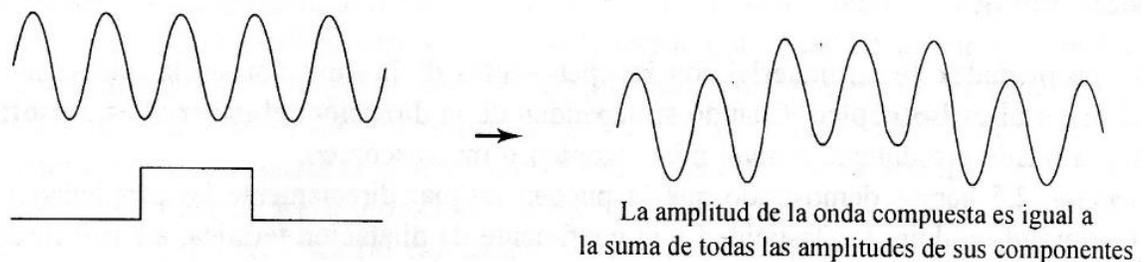


Figura 14. Caso general de fenómeno de interferência de ondas

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Cuando las ondas de igual amplitud están en fase, sus máximos y sus mínimos están alineados, y la amplitud de onda compuesta es el doble de la de sus componentes, como es ilustrado en la figura 15. Esto se llama interferencia constructiva.

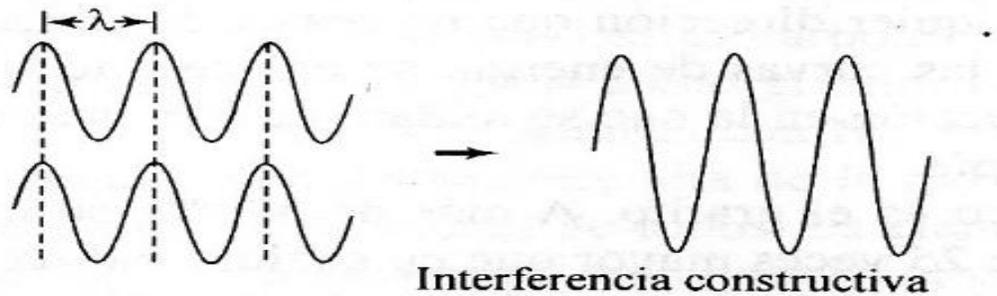


Figura 15. Fenómeno de interferencia de ondas: Interferencia constructiva.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

Sin embargo, si una de las dos ondas está desplazada una distancia igual a media longitud de onda, la amplitud de onda compuesta es igual a cero en todos los puntos. Este fenómeno se llama interferencia destructiva, como se ve en la siguiente figura 16.

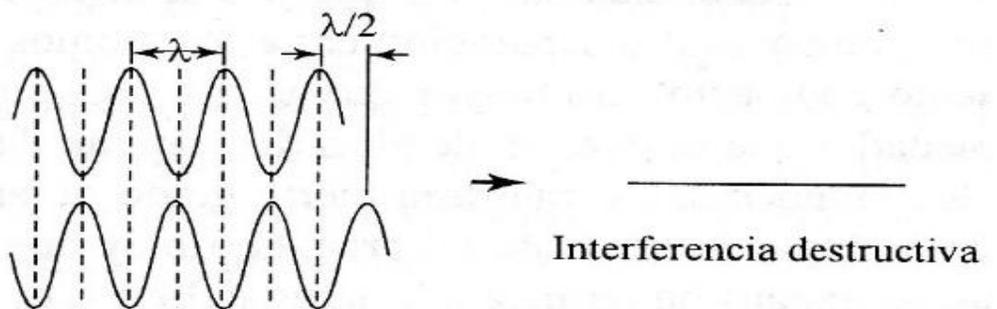
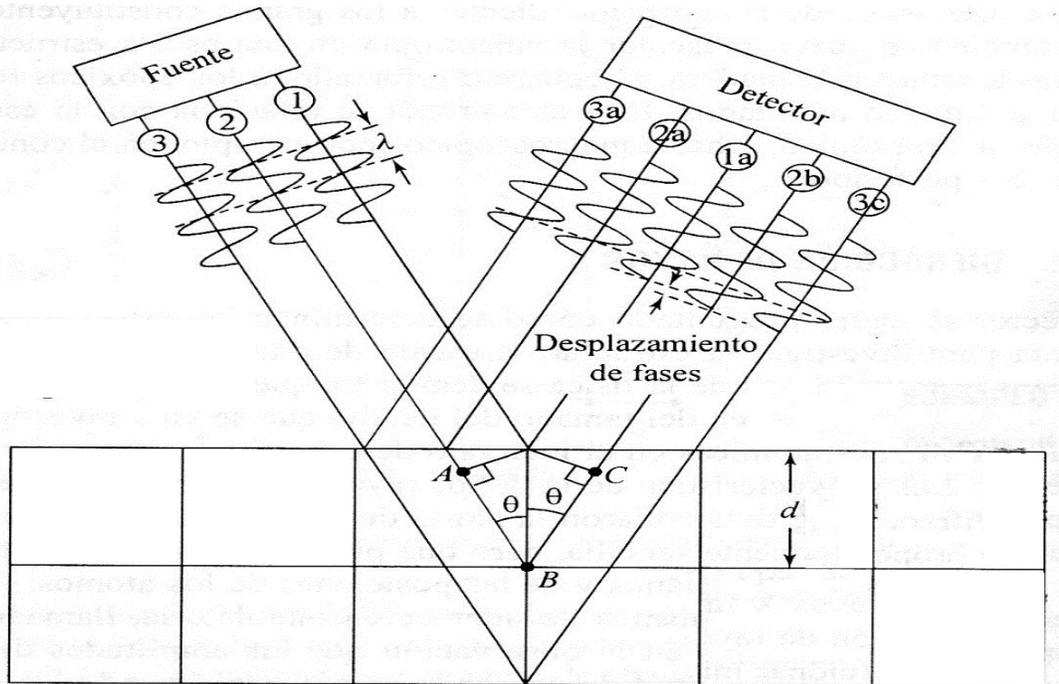


Figura 16. Fenómeno de interferencia de ondas: Interferencia destructiva.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El fenómeno de interferencia es fundamental para comprender la interacción de los rayos X con los cristales. Imaginemos un haz de rayos X paralelo que llegan a la superficie de un cristal. Para el haz de rayos X, la red cristalina se parece un conjunto de átomos ubicados en planos, como se ve en la siguiente figura 17.



Longitud de trayectoria del rayo (2a) – Longitud de trayectoria del rayo (1a) = 0

Longitud de trayectoria del rayo (2b) – Longitud de trayectoria del rayo (1a) = AB + BC

Longitud de trayectoria del rayo (3c) – Longitud de trayectoria del rayo (1a) = 2 (AB + BC)

Figura 17. Esquema de la geometría de los rayos reflejados en los planos atómicos paralelos de un material.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

Véase que cuando $AB + BC = 2d \cos(\theta)$ se presenta interferencia constructiva si y solo si $2d \cos(\theta) = n * \lambda$. La longitud de onda de la radiación es λ , el ángulo de

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

incidencia es Θ , y la d es distancia perpendicular es entre los planos paralelos; que es el espacio o distancia interplanar.

Examinaremos lo que sucede con dos ondas paralelas de rayos X. La primera onda es reflejada en el plano superior de los átomos, y la segunda en el siguiente hacia abajo. Son las ondas 1a y 2b. La diferencia en la distancia recorrida, desde la fuente hasta el detector, para los rayos X 1a y 2b, se determinan mediante la siguiente ecuación

$$AB + BC = 2d \cos \theta \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo AB y BC las longitudes de los segmentos de recta entre los puntos indicados. Debido a esta diferencia de longitudes de trayectorias habrá un desplazamiento de fases entre los rayos X cuando lleguen al detector. Las dos ondas se interfieren constructivamente solo si la diferencia entre sus trayectorias es un múltiplo entero de la longitud de onda del rayo X. cuando se presenta interferencia constructiva en un experimento con rayos X, se llama difracción. La condición para la difracción es:

$$2d \cos(\theta) = n * \lambda \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo n un número entero. Esta ecuación se llama ley de Bragg, y es la ecuación fundamental de la difracción. Establece que la diferencia se presenta a valores específicos de Θ , y Θ se determina por la longitud de onda de la radiación y por el espacio entre los planos. Por consiguiente, si se conoce λ y se mide la intensidad del haz difractado dentro de un intervalo de Θ , entonces se podrá calcular d , el valor de n en la ecuación 2 se determina el orden de la reflexión; cuando $n=1$, es una reflexión de primer orden; con $n=2$ es de segundo orden, y con $n=i$, es i -ésimo orden. Se puede determinar los parámetros de

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

red con gran exactitud, usando la difracción de rayos X: en angstroms, con 4 o 5 cifras a la derecha del punto decimal.

Literalmente, hay docenas de técnicas que se usan en la difracción de rayos X. Quizás el método que se comprende con más facilidad es el de difracción de polvos. Se muele una muestra transformándola en polvo, y se mezcla con un aglomerante no cristalino. El polvo y el aglomerante se someten a una fuente monocromática (de una sola longitud de onda) de radiación X coherente, (que está en fase). Se mide la intensidad difractada en función de Θ , con un instrumento llamado difractómetro. En la figura 18 se ven los resultados de un experimento en difractómetro con cloruro de sodio. Los máximos de intensidad representan condiciones en las que se satisface la ley de Bragg, para cierto plano en uno de los muchos fragmentos cristalinos molidos.

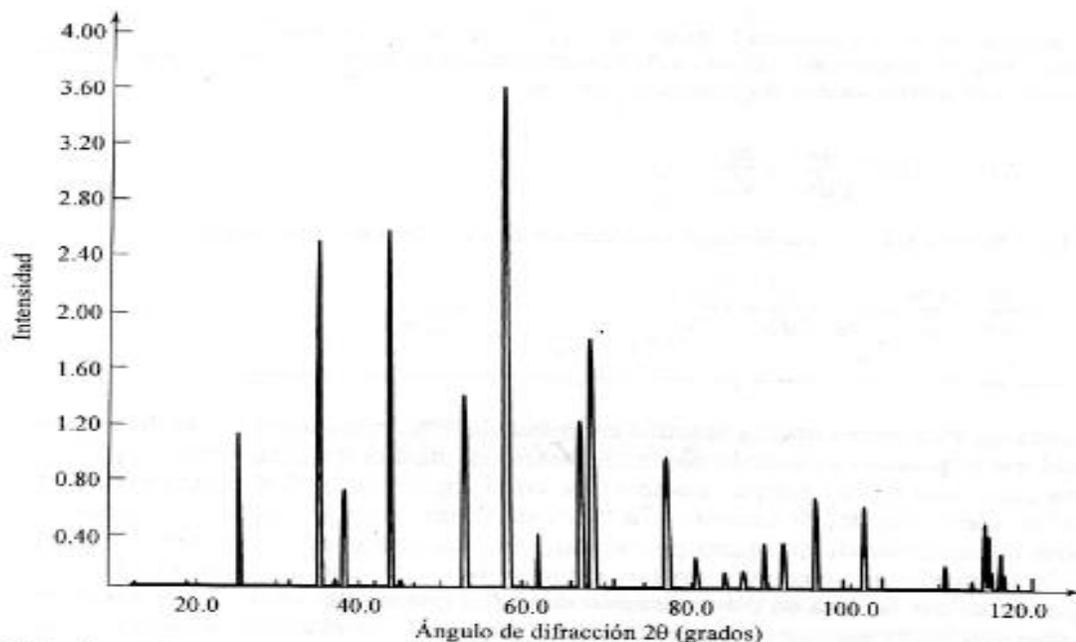


Figura 18. Resultados de un experimento en difractómetro con cloruro de sodio.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Hay muchas familias de planos en un cristal, por ejemplo $\{1\ 0\ 0\}$, $\{1\ 1\ 0\}$, $\{1\ 1\ 1\}$, $\{2\ 0\ 0\}$, $\{2\ 1\ 0\}$, $\{2\ 1\ 1\}$, $\{2\ 2\ 0\}$, $\{2\ 2\ 1\}$, $\{2\ 2\ 2\}$, y así sucesivamente. Se debe identificar, o indexar, cada pico según el plano y el espaciamiento d que produce la difracción. Una vez determinado todos los espaciamientos d , se puede asignar la estructura cristalina.

Cuando el cristal es conocido, se puede determinar geoméricamente el espaciamiento d o el espaciamiento interplanar de cristales. Por ejemplo, el espaciamiento entre los planos para $(1\ 1\ 1)$ en un cristal CCC se puede determinar por inspección de la figura 19.

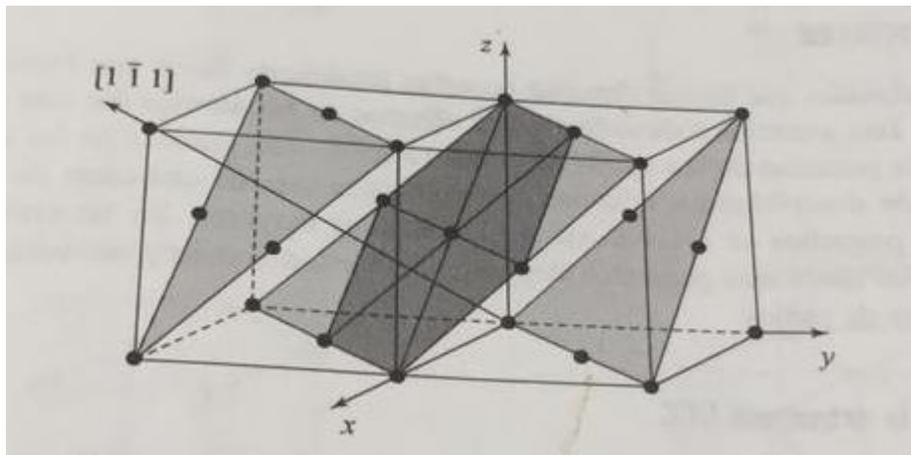


Figura 19. Resultados de un experimento en difractor con cloruro de sodio.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

La normal del plano interseca tres miembros paralelos de la familia $\{1\ 1\ 1\}$ de planos por celda unitaria. Por consiguiente, el desplazamiento interplanar es:

$$d(1\ 1\ 1) = a_0 * \frac{\sqrt{3}}{3} \quad \text{Ec. 3}$$

En donde, en esta notación $a_0 = d(1\ 0\ 0)$. En los sistemas cúbicos se pueden expresar las relaciones geométricas de una manera relativamente sencilla:

3.3.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

$$d(h k l) = \frac{a_0}{(h^2 + k^2 + l^2)^{0.5}} \quad \text{Ec. 4}$$

En donde $d(h k l)$ es el espaciamiento d para el plano $(h k l)$. Para otros sistemas cristalinos se han deducido ecuaciones más complicadas.

3.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM Y EDS)

La microscopia electrónica de barrido (SEM), permite la observación y caracterización de organismos heterogéneos y materiales inorgánicos en escala nanométrica (nm) y también micrométrica (μm). La característica más resaltante de la microscopia electrónica de barrido es la capacidad para obtener excelentes imágenes en tres dimensiones de las superficies de una variedad de materiales, otra importante característica es la obtención de imágenes topográficas en el rango de 10-100000X. La figura 20 muestra una imagen de alta resolución de microscopia electrónica de barrido tomada con un voltaje de 9 keV de un dispositivo semiconductor (membrana microporosa) con sección transversal recubierta con una capa muy delgada de platino, esta imagen tiene una resolución espacial medida de 0,9 nm y representa el estado actual de la técnica en la formación de imágenes de alta resolución.

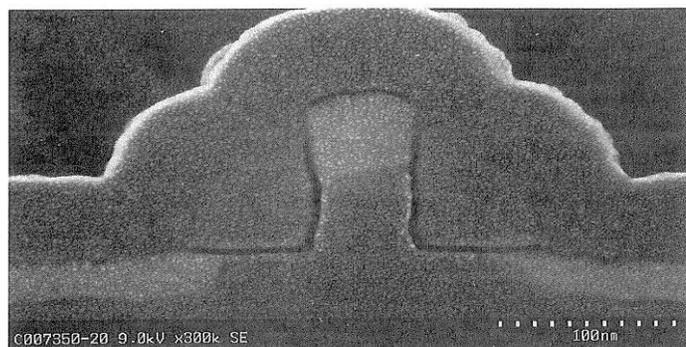


Figura 20. Imagen característica tomada mediante microscopia electrónica de barrido.

3.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM Y EDS)

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

En el SEM, el área es analizada mediante la irradiación con un haz de electrones que es enfocado finamente, que puede ser barrido a través de la superficie para generar imágenes o puede ser estático para obtener análisis de una posición. Los tipos de señales producidas a partir de la interacción del haz de electrones con la muestra incluyen electrones secundarios, electrones retrodispersados, rayos X característicos y otros fotones de varias energías. Estas señales se obtienen a partir de volúmenes de emisiones específicos dentro de la muestra y se pueden utilizar para examinar muchas características de la muestra. Las señales de mayor interés son los electrones secundarios y retrodispersados, porque estos varían principalmente como resultado de las diferencias en la topografía de la superficie.

La emisión de electrones secundarios, confinado a un volumen muy pequeño cerca de la zona de impacto del haz para ciertas emisiones de energía del haz, permite que las imágenes se obtengan con una resolución que se aproxima al tamaño del haz de electrones enfocado. El análisis de las características de los rayos X emitidos por las muestras puede producir tanto la identificación cualitativa como cuantitativa, información elemental de las regiones en la muestra de un 1µm de diámetro y 1µm en profundidad en condiciones de operación.

3.3.2.1.Capacidad de imágenes

El microscopio electrónico de barrido es uno de los más versátiles instrumentos disponibles para la observación y análisis de las características micro estructurales de los

3.3.2.1. CAPACIDAD DE IMÁGENES

materiales sólidos. Una de las principales utilidades de este instrumento es su alta resolución, del orden de 1-5nm (10-50Å). Una característica resaltante en esta técnica es su apariencia tridimensional en la imagen de la muestra gracias a su gran profundidad de foco, (entre 100 y 1000 > que el microscopio óptico), así como el efecto de sombra de alivio del contraste de electrones secundarios y retrodispersados.

3.3.2.2. Estructura de análisis

Uno de los avances más importantes en el desarrollo del (SEM), es la capacidad para determinar la estructura cristalina y el grado de orientación en los cristales en la superficie de las muestras preparadas. Esta capacidad hace uso de la difracción de electrones retrodispersados que salen de la muestra en la superficie tomando el nombre de electrones retrodispersados. Para recoger el máximo de intensidad en la difracción, la superficie de la muestra se inclina bruscamente a un ángulo típicamente de 70° desde la horizontal.

3.3.2.3. Análisis elemental

El microscopio electrónico de barrido también puede ser utilizado para obtener la información composicional de los elementos a través de los rayos característicos. La mayoría de los microscopios electrónicos de barrido están equipados con el sistema EDS, que ofrece un medio para evaluar rápidamente los constituyentes elementales de una muestra en estudio.

3.3.2.3. ANÁLISIS ELEMENTAL

Otra importante característica de la microscopía electrónica de barrido con EDS, es su capacidad de mapeo composicional usando rayos X característicos. En la figura 21, se muestra la distribución de Fe, Ni, y P, entre las fases principales de un meteorito de hierro de Goose Lake. El campo de visión es de 0,5 X 0,5 mm. Todas las regiones de metal con contenido de níquel menos del 10 % son de color negro en el mapa composicional.

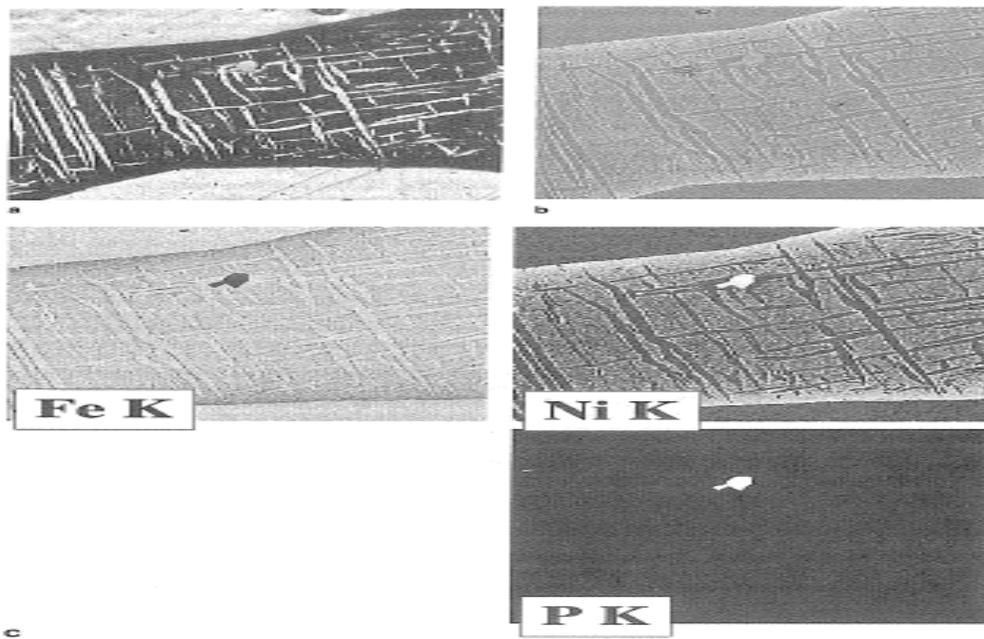


Figura 21. Distribución de Fe, Ni y P entre las fases principales en un meteorito de hierro.

Fuente. (Goldstein et al., 2003)

3.3.2.4. Componentes del microscopio electrónico de barrido

La figura 22 muestra esquemáticamente las partes de un microscopio electrónico de barrido. Los dos componentes básicos de este instrumento son la columna electrónica y la consola de control. La columna electrónica es un arma electrónica con dos o más lentes

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

electrónicas que direccionan en la trayectoria del haz de electrones. La columna electrónica se encuentra a una presión de vacío de 10^{-4} Pa, que es unas mil millonésimas partes de la presión atmosférica. La consola de control es consta de un tubo de rayos catódicos (CRT) de pantalla de visualización y los botones, teclado y ordenador que consta del haz de electrones.

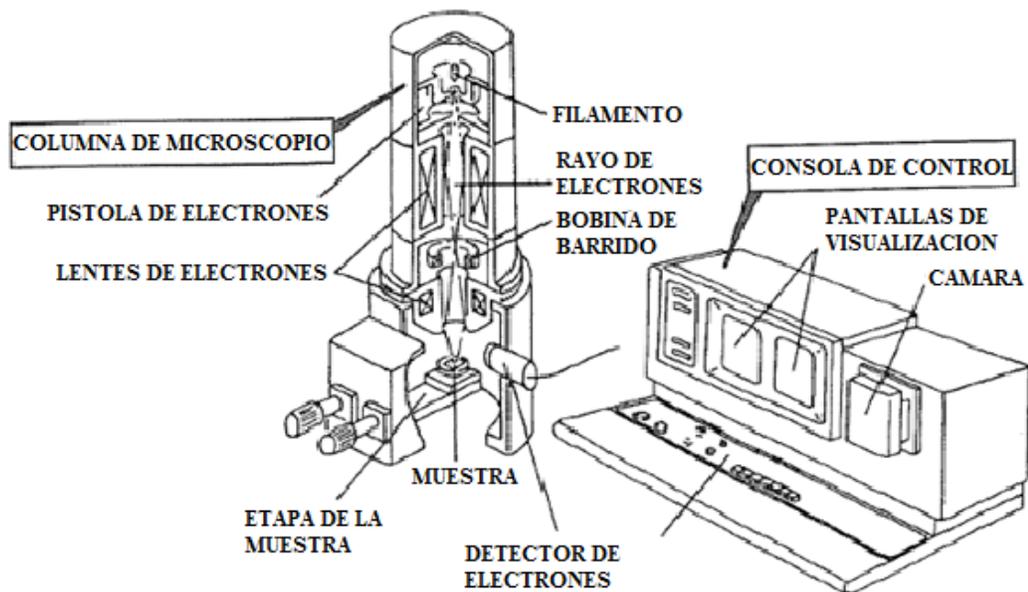


Figura 22. Imagen esquemática de un microscopio electrónico de barrido.

Fuente. Adaptado (Goldstein et al., 2003)

✓ **Cañón de electrones y lentes para producir haz de electrones pequeños**

El cañón genera electrones y los acelera a energía en el rango de energía de 0,1-30 KeV (100-30.000 electrón voltio), las lentes son usadas para focalizar el haz de electrones en la muestra en estudio, como es descrito en la figura 23. El haz interactúa con la muestra a una profundidad de aproximadamente $1\mu\text{m}$ con un tamaño inferior a 10nm (100\AA), contiene suficiente corriente para formar imágenes aceptables.

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

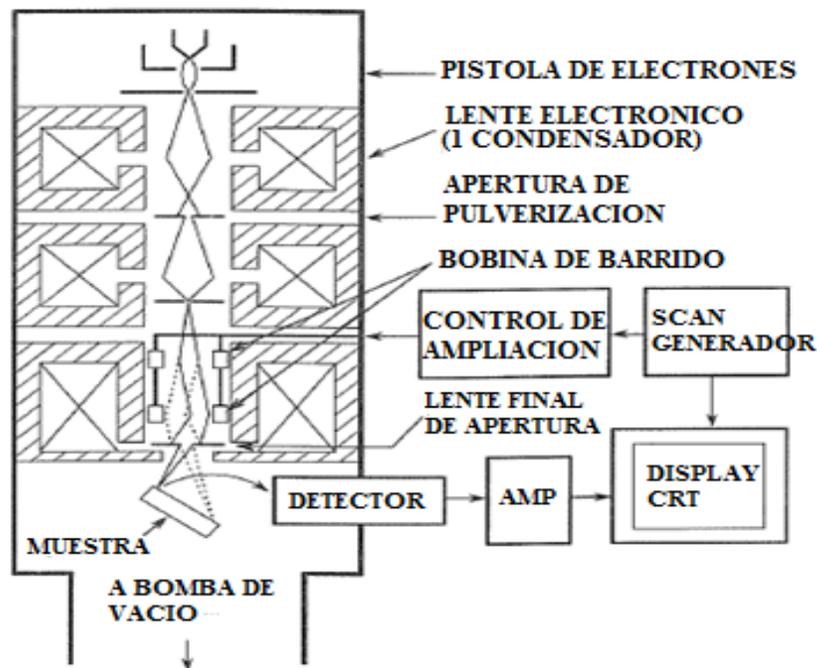


Figura 23. Imagen esquemática de la columna del cañón de electrones en un microscopio electrónico de barrido.

Fuente. Adaptado (Goldstein et al., 2003)

La anterior figura esquemática muestra la columna electrónica donde se pueden identificar el cañón de electrones, las lentes, los sistemas de detección, y los detectores electrónicos.

✓ Sistema de deflexión y controles de ampliación

La imagen se forma mediante un proceso de escaneo en la superficie; punto a punto. El sistema de deflexión hace que el haz se mueva en una serie de posiciones discretas a lo largo de una línea, y en continuación se realice el proceso mencionado por debajo de la primera línea, y así de forma sucesiva hasta que es formada un área rectangular en la

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

muestra. De forma paralela se crea en la pantalla en la pantalla de visualización el área rectangular en estudio.

✓ **Detector de electrones recoge señal**

El contraste de las imágenes se presenta cuando la señal es recogida, a partir de la interacción de la muestra con el haz, que es variante de un lugar a otro. Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra se presentan tres tipos de señales; cualquier de estos tipos pueden ser mostrados como una imagen. La electrónica del sistema de detectores convierte la señales a punto por punto la intensidad cambia en la visualización de la pantalla y produce una imagen. Las dos señales más utilizadas para producir las imágenes en SEM, son los electrones secundarios (SE) y los electrones retrodispersados (BSE). El (E-T) detector Everhart- Thornley, recoge las señales de los electrones secundarios como de los electrones retrodispersados, como es mostrado en la figura 24.

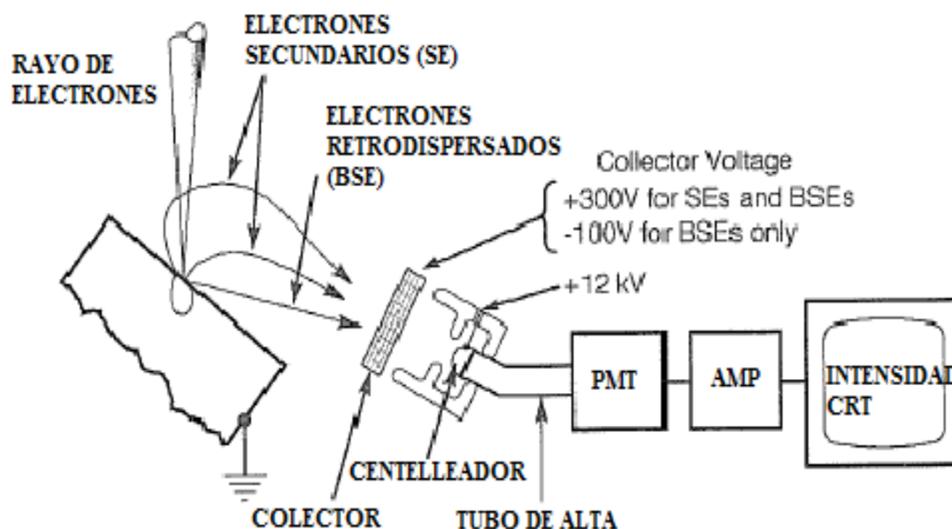


Figura 24. Imagen esquemática de un microscopio electrónico de barrido.

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Fuente. Adaptado (Goldstein et al., 2003)

Ambas señales SE y BSE son recogidas cuando es aplicada una tensión una tensión positiva a la pantalla del colector en frente del detector. Con un voltaje negativo en la pantalla del colector, una señal pura de la EEB es capturado porque los PE de baja energía son repelidos. Los electrones capturados por el centellador/fotomultiplicador se amplifican para su visualización en el CRT de visualización.

✓ Cámara o registros de computadora (imagen).

El microscopio electrónico de barrido cuenta con un CRT; que es el encargado de separar la grabación de la exploración lenta de una imagen sobre una película lenta fotográfica, o alternativamente una impresora de video para producir una copia impresa de una imagen CRT. Los SEM modernos almacenan sus imágenes en forma digita en un ordenador para el procesamiento e impresión posterior de la información.

✓ Elementos de control

Los primeros controles que debe dominar un operador son los que controlan la creación de haz de electrones: el voltaje de aceleración y la emisión de la corriente. Seguidamente están los controles de las lentes: el control de la lente de objetivo que permite que el haz se enfoque de tal forma que la de diámetro menor se encuentre en la superficie de la muestra. Por último, a consecuencia de que algunos partes en la superficie de la muestra pueden parecer demasiadas claras o demasiado oscuras, controles de señal, nivel de oscuridad y brillo, están previstos para recortar o ampliar la intensidad en la pantalla hasta que una imagen razonable y entendible sea mostrada en la pantalla.

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

✓ Formación e interpretación de imágenes

Uno de los aspectos más importantes del (SEM), es la aparente facilidad con la que imágenes de objetos tridimensionales pueden ser interpretados por cualquier observador, sin previo conocimiento de esta técnica de microscopía. Es posible apreciar la topografía de la muestra sin ningún conocimiento especial sobre el origen de la imagen, el proceso de formación de imágenes debe imitar la experiencia natural de los observadores, en el SEM los electrones se enfocan en una viga, que se explora a través de una superficie de la muestra en estudio.

La compleja interacción de los electrones del haz con los átomos de la muestra producen una amplia variedad de productos de la radiación: electrones retrodispersados, electrones secundarios, la muestra de radiación es tomada por un detector EVERHART-THORNLEY, luego es mostrada en un tubo de rayos catódicos (CRT) o en una pantalla de televisión, que esta sincronizada con el explorador sobre la muestra. La clase de objetos analizados que pueden ser descritos como topografía en tres dimensiones son vistos en aumentos intermedios hasta 10.000X.

✓ Acción de escaneo

La microscopía electrónica de barrido es una de las técnicas más versátiles disponible para el análisis superficial y microestructural de los materiales sólidos. La característica más resaltante es su alta resolución del orden de 2 a 5nm (20 a 50 Å). Cita. Su alta resolución se muestra en la siguiente figura.

3.3.2.4. COMPONENTES DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

✓ Construcción de imágenes

El flujo de información que proporciona el microscopio electrónico de barrido resulta de la exploración en X-Y, espacio y un conjunto correspondiente de intensidades entre el conjunto de detectores (dispersión inversa de electrones, electrones secundarios, entre otros), que monitorean las interacciones haz espécimen, todos los cuales pueden ser controlados en paralelo. La información es mostrada al observador de dos formas: Exploración de líneas y exploraciones de zonas

En el modo de exploración de líneas, el haz se escanea a lo largo de un vector en el espécimen, por ejemplo, en la dirección X, la misma señal de generador de análisis se utiliza para concluir la exploración horizontal en un espacio de pantalla o CRT. En esta exploración lineal, la posición horizontal se relaciona con la distancia a lo largo de una línea particular sobre la muestra que se estudia. El factor de ampliación M entre el espacio de la muestra y el espacio de pantalla (CRT), se da mediante las relaciones de longitud de las exploraciones.

$$M = \frac{L_{CRT}}{L_{muestra}} \quad Ec. 5.$$

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo bajo norma ASTM G65 de un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido. El recubrimiento duro se caracterizó química y microestructuralmente por medio de ensayos de microdureza, microscopía óptica, difracción de rayos x y microscopía electrónica de barrido. Además, se realizaron ensayos de desgaste abrasivo con el fin de establecer relaciones entre microestructura y resistencia del recubrimiento cuando es sometido a este tipo de desgaste.

4.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROESTRUCTURAL DEL RECUBRIMIENTO DURO APLICADO POR SOLDADURA ELÉCTRICA DE ARCO REVESTIDO.

4.1.1. SELECCIÓN DEL ACERO.

Teniendo en cuenta los aceros más utilizados típicamente en la fabricación de componentes de máquinas, se escogió como material base para la aplicación del recubrimiento tres barras de acero ASTM A36 con sección cuadrada de 25,4 mm y 76,2 mm de largo. La tabla 3 muestra la composición química nominal de este acero según norma ASTM A36.

Tabla 3. Composición química nominal en porcentaje en peso del acero ASTM A36.

C	P	S	Si	Cu
0,26	0,04	0,05	0,40	0,20

Fuente. Adaptado de (ASTM A36, 2005)

4.1.2. SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DURO

La selección del recubrimiento duro se realizó comparando los diferentes recubrimientos sugeridos en el catálogo (Rode, 2014) y de acuerdo a los siguientes parámetros: disponibilidad en el mercado, literatura y recomendaciones del fabricante. El tipo de recubrimiento duro utilizado fue el WEST HARD 70 con dimensión 4,8x350 mm (5/32") del fabricante West Rode (Rode, 2014). La composición química nominal del recubrimiento se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química nominal en porcentaje en peso del recubrimiento duro WEST HARD 70.

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
3,1	1,4	0,9	25	1,2	1,2

Fuente. Catálogo de soldaduras especiales (Rode, 2014).

La aplicación del recubrimiento fue realizada a las tres placas de acero ASTM A36 en la empresa LA GRANJA INDUSTRIA, utilizando un equipo de arco eléctrico (Miller XMT 450). Con el fin de obtener la mínima disolución de recubrimiento se depositaron tres capas de soldadura en cada cupón de acero. La primera capa del recubrimiento se obtuvo con dos cordones sucesivos y las dos capas siguientes con un cordón de soldadura, estos cordones aplicados con una velocidad promedio de 0,8 cm/s. La tabla 5 muestra los parámetros de aplicación utilizados para las capas de recubrimiento acorde a las recomendaciones del fabricante. La velocidad de aplicación del recubrimiento se verificó con un cronómetro de mano garantizando un rango de tiempo de 9 a 10 segundos por cada capa de recubrimiento.

4.1.2. SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DURO

Tabla 5. Parámetros de aplicación de recubrimiento en las muestras.

NÚMERO DE CAPAS	AMPERAJES (A)	VELOCIDAD DE AVANCE (cm/s)
1 CAPA	160	
2 CAPA	200	0.8
3 CAPA	200	

Fuente. Autores.

Los amperajes utilizados para la aplicación del recubrimiento duro que se muestran en la tabla anterior fueron obtenidos teniendo en cuenta el catálogo WEST RODE (Rode, 2014). La tabla 6 muestra los amperajes recomendados para la dimensión del recubrimiento duro según bibliografía.

Tabla 6. Amperajes recomendados para la aplicación del recubrimiento.

AMPERAJES RECOMENDADOS	
DIMENSIÓN	AMPERAJES
3,2x350 mm (1/8")	90 - 140 A
4,0x350 mm (5/32")	140 - 190 A
4,8x350 mm (5/32")	160 - 350 A

Fuente. Catalogo WEST - RODE (2011)

4.1.3. CORTE DE PROBETAS

Teniendo en cuenta la dimensión que exige la norma ASTM G65, se realizaron cortes de dos probetas con dimensión 25,4x76,2x12,7 mm para realizar ensayos de abrasión y una probeta con dimensiones de 10x10x12,7 mm para ensayos de metalografía, medidas de microdureza, difracción de rayos X. La figura 25 muestra las probetas luego del corte realizado.

4.1.3. CORTE DE PROBETAS



Figura 25. Probetas preparadas para realizar ensayos de caracterización y abrasión según norma ASTM G65.

Fuente. Autores.

4.1.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.

Una de las muestras se cortó de forma transversal en sentido del avance de los cordones de soldadura, esta superficie cortada y la superficie superior del recubrimiento duro en la muestra se preparó metalográficamente mediante pulido, usando papeles de lija número ASTM 120, 240, 360, 600 y 1000 y su microestructura se reveló usando ataque químico con kalling's #2; ataque número 94 de la norma ASTM E407. Esta muestra fue observada en un microscopio óptico Olympus PME3B de donde se obtuvieron imágenes de estas dos partes de la muestra. Se realizaron medidas de microdureza en la matriz y en los carburos de una de las muestra utilizando un micro-durómetro SHIMADZU en la escala vickers con valores de carga de 0,1 Kgf y un tiempo de sostenimiento de 10 s. Adicionalmente, de esta misma muestra la microestructura se evaluó utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM 5910LV con detector de electrones retroproyectados (BSE)

4.1.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

y se realizó análisis químico cualitativo a través de mapas composicionales utilizando una sonda EDS acoplada al microscopio electrónico de barrido (SEM).

Las fases presentes en el recubrimiento se identificaron a partir de difracción de rayos X utilizando configuración Bragg – Brentano $\theta - 2\theta$, con tubo de cobre de radiación $\text{Cu-K}\alpha$ de longitud de onda de $\lambda = 1.5406$. Estos ensayos fueron realizados en los laboratorios de microscopía avanzada y de metalografía y ensayo de materiales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. La indexación de los patrones obtenidos se realizó utilizando el software versión libre Match! En el laboratorio de materiales y procesos de la universidad de córdoba.

4.2. ENSAYOS DE DESGASTE ABRASIVO AL RECUBRIMIENTO DURO BAJO CONDICIONES CONTROLADAS DE LABORATORIO ACORDE A LA NORMA ASTM G65.

Para el estudio se realizaron dos ensayos a dos de las muestras recubiertas con soldadura WEST HARD 70 seleccionadas siguiendo el procedimiento A establecido en la norma ASTM G65 (ver tabla 2), en el laboratorio de metalografía y ensayo de materiales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Para este procedimiento se utilizó una fuerza de apoyo entre los cuerpos de 130 N y arena con granulometría 50/70 como medio de interface entre la muestra y la rueda de goma. Cada ensayo tardó 30 minutos en los que se obtuvo unas revoluciones totales aproximadas de la rueda de 6000 revoluciones. Las dos muestras fueron pesadas antes y después de los ensayos en una balanza con resolución 0,0001 mg y se obtuvo de acuerdo

4.2. ENSAYO DE DESGASTE ABRASIVO AL RECUBRIMIENTO DURO

a esto, gráficas de pérdida de masa en función del tiempo de ensayo, para cada muestra. Estos resultados se compararon con el resultado obtenido para un acero de herramienta.

4.3. RELACIÓN ENTRE MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DEL MATERIAL ENSAYADO.

Se realizó dos ensayos de desgaste abrasivo a las probetas recubiertas y un ensayo al acero de herramienta AISI D2 utilizado típicamente en trabajos abrasivos. La resistencia al desgaste abrasivo fue discutida a partir de relaciones de pérdida de masa y microestructura, comparándolo con la pérdida de masa del acero herramienta AISI D2.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL.

5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

La Figura 26 muestra imágenes de microscopía óptica de un corte transversal de la muestra de soldadura, éste corte transversal es perpendicular al avance del cordón de soldadura.

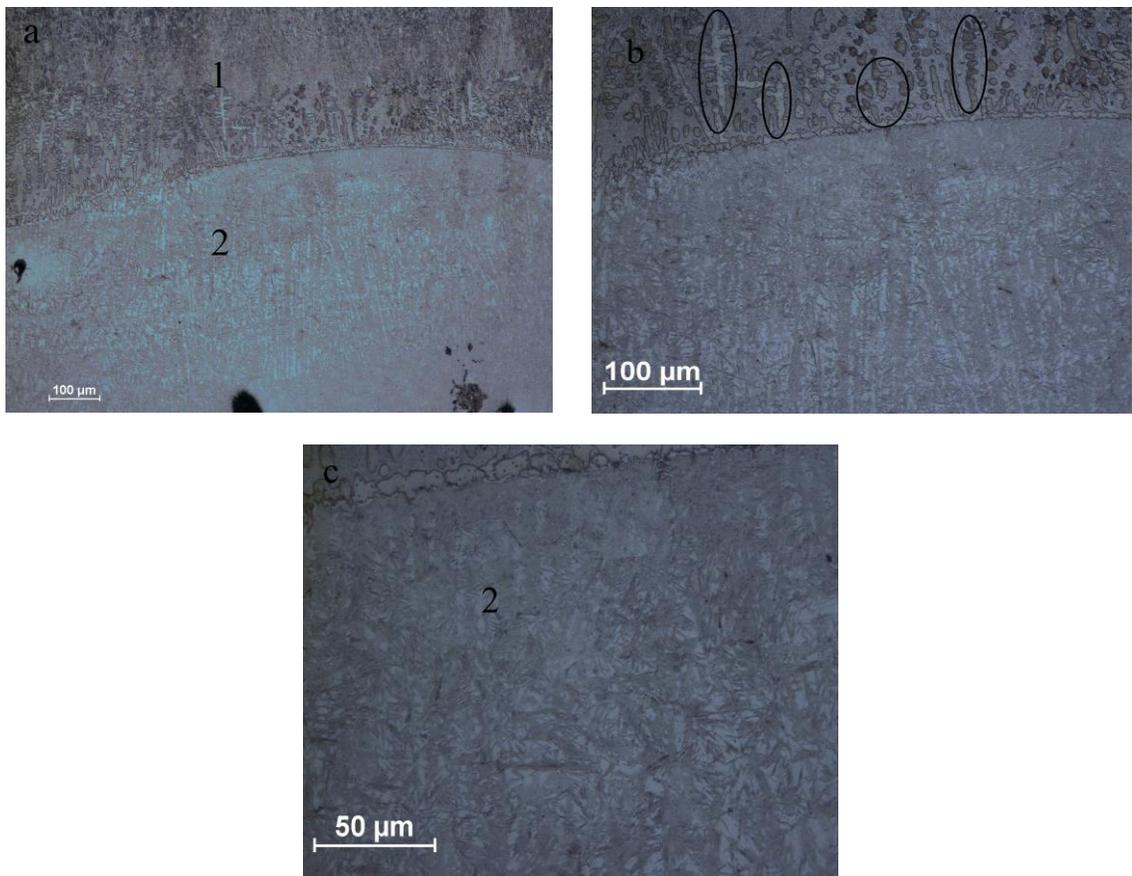


Figura 26. Imágenes de microscopía óptica de la sección transversal de la muestra evidenciando la interfaz del recubrimiento con el sustrato. a) Magnificación 100x de la interfaz entre el recubrimiento duro [1] y el sustrato de acero [2], b) magnificación 200x y c) magnificación 500x del sustrato.

5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

Fuente. Autores.

En dicha interfaz, se observó un crecimiento dendrítico causado por el enfriamiento rápido cuando éste se sobre enfría por debajo del punto de solidificación, Lo cual trae consigo la formación de estructuras con ramificaciones repetitivas llamadas dendritas, como se muestra en la figura 26. La figura 27 muestra imágenes de la primera capa de la muestra de soldadura con diferentes aumentos.

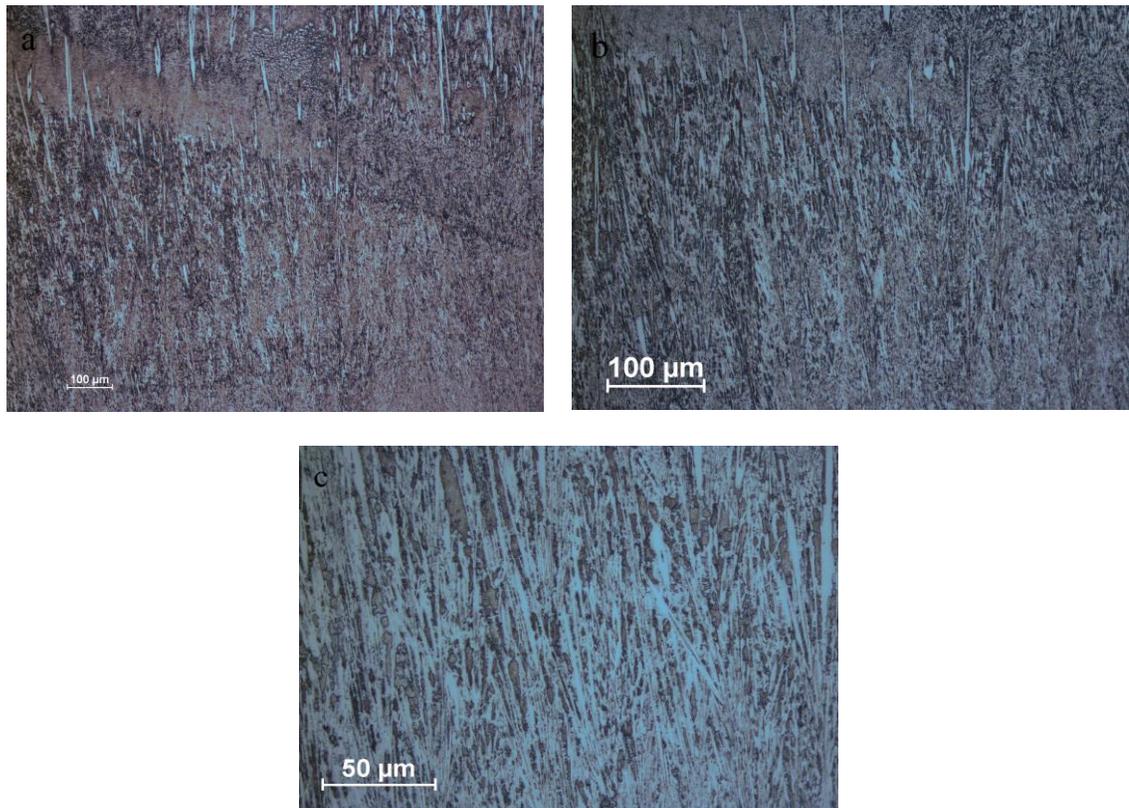


Figura 27. Imágenes de microscopía óptica de la primera capa de la muestra de soldadura. a) Magnificación 100x, b) magnificación 200x y c) magnificación 500x.

Fuente. Autores.

En esta imagen anterior que corresponde a la primera capa de recubrimiento no se observaron dendritas. La solidificación del líquido fue en la misma dirección de extracción

5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

de calor produciendo una estructura ramificada tridimensional como consecuencia de la redistribución de los átomos. La figura 28 muestra imágenes de la segunda capa de la muestra de recubrimiento.

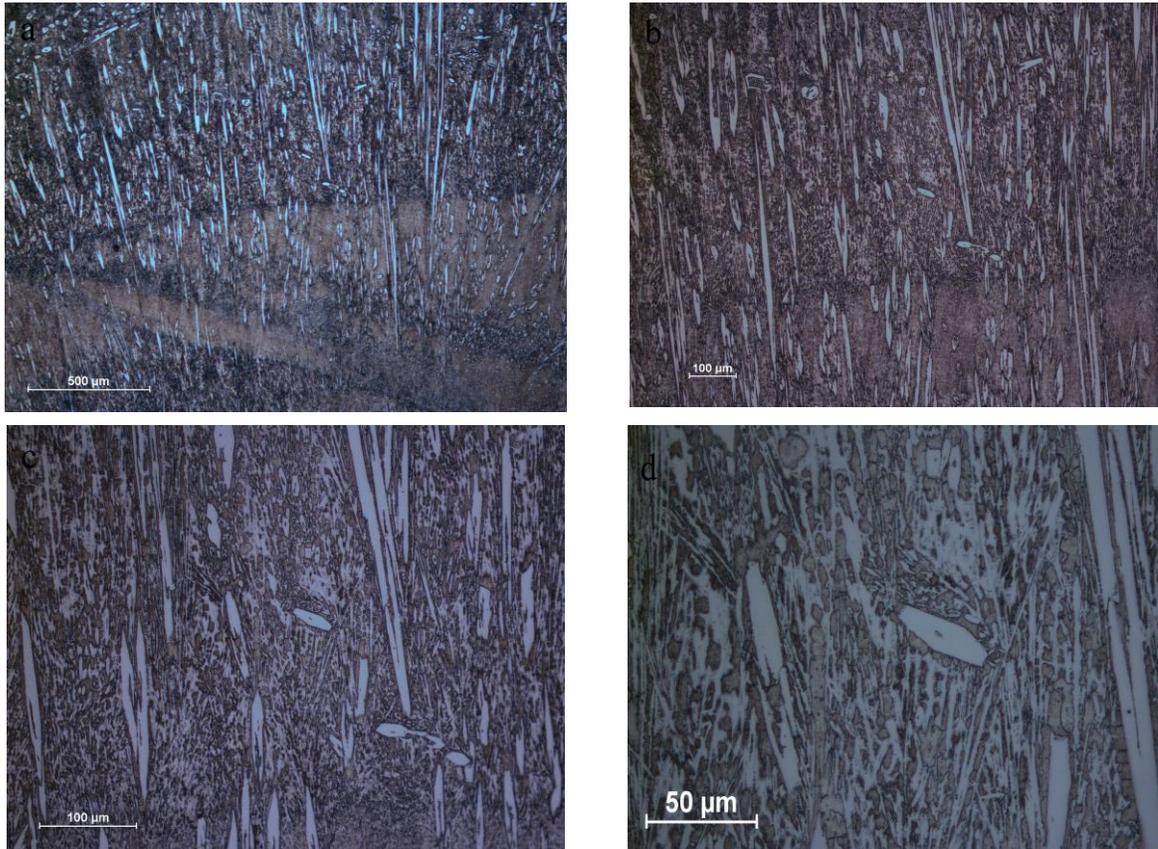


Figura 28. Imágenes de microscopía óptica de la segunda capa de la muestra de soldadura. a) Magnificación 50X, b) Magnificación 100X, c) Magnificación 200X, c) Magnificación 500X.

Fuente: Autores.

En esta segunda capa se pueden diferenciar fases diferentes, es decir, es posible observar una matriz y una fase con forma alargada que puede corresponder a la fase cerámica llamada carburos constituida por carbono y elementos metálicos. En la tercera

5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

capa del recubrimiento o capa de la superficie del recubrimiento se observa con mayor claridad la presencia de la matriz y de los carburos como se muestra en la figura 29. En adición a los carburos alargados, es posible observar otros carburos con forma hexagonal.

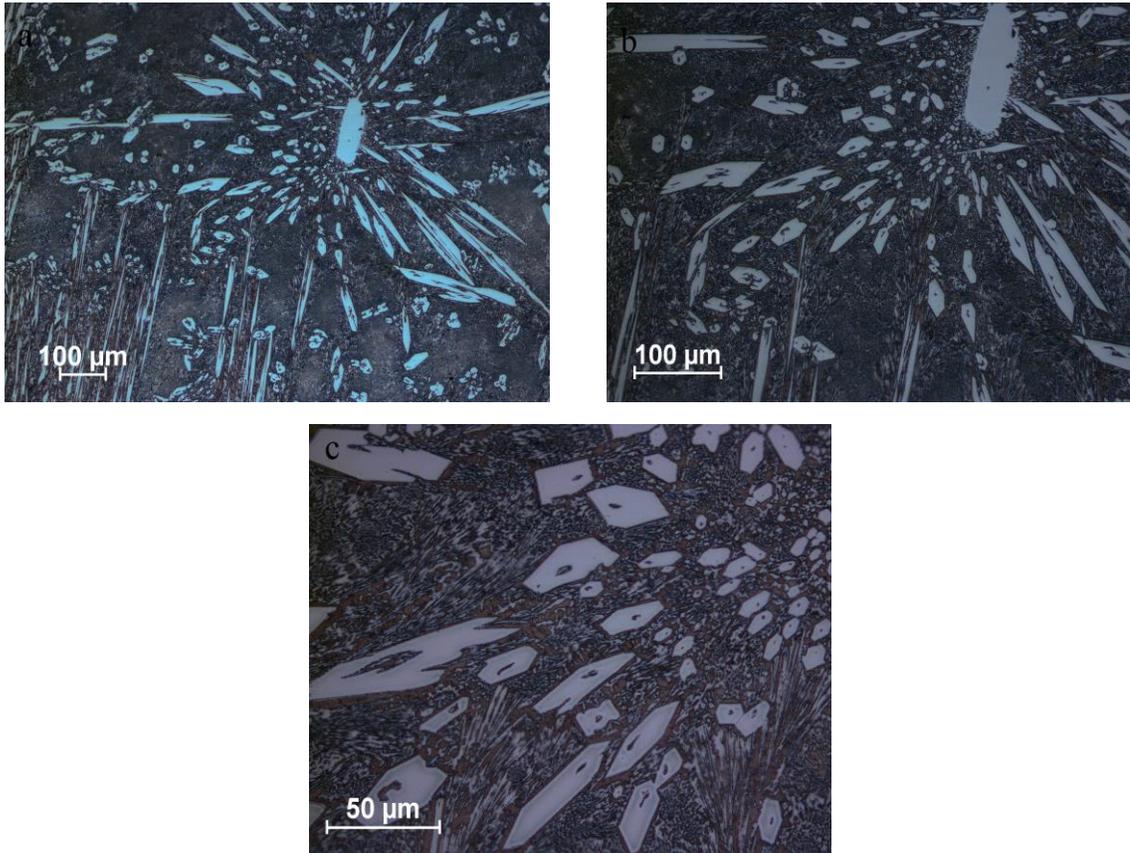


Figura 29. Imágenes de microscopía óptica de la superficie de la muestra de soldadura. a) Magnificación 50X, b) Magnificación 100X, c) Magnificación 200X, d) Magnificación 500X.

Fuente. Autores.

La figura 29 muestra imágenes de la superficie del recubrimiento donde se evidencian la matriz, los carburos alargados y hexagonales. Acorde a la microestructura observada en la superficie, se podría inferir que el recubrimiento es una aleación hipereutética

5.1.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

constituida por las fases γ y β , siendo esta última la fase proeutéctica. El enfriamiento desde el líquido puede tomar el camino que se muestra en la figura 30. La primera solidificación es de β y cuando alcanza la temperatura eutéctica el líquido remanente transforma a γ y β . La fase β corresponde a los carburos.

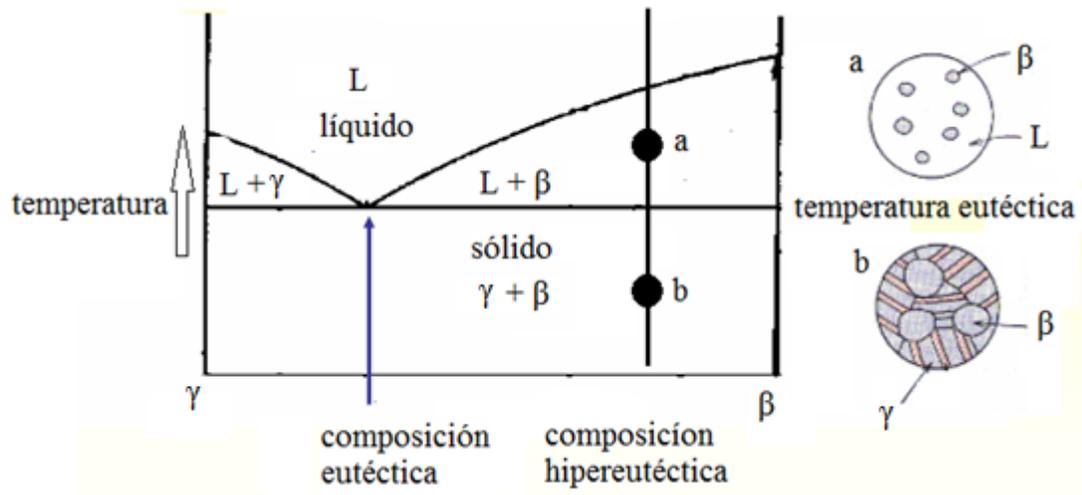


Figura 30. Representación esquemática de la formación de fases en la soldadura a partir del enfriamiento del líquido.

Fuente. Adaptado de (Godfrey, 1980)

5.1.2. MEDIDAS DE MICRODUREZA

Se tomaron medidas de microdureza en cada una de las fases presentes en el recubrimiento, tomando 3 medidas representativas para cada una de las tres fases presentes, tal como se muestra en la figura 31. Así por tanto se obtuvo medidas de microdureza en escala Vickers en cada una de estas fases como se muestra en la tabla 7.

5.1.2. MEDIDAS DE MICRODUREZA

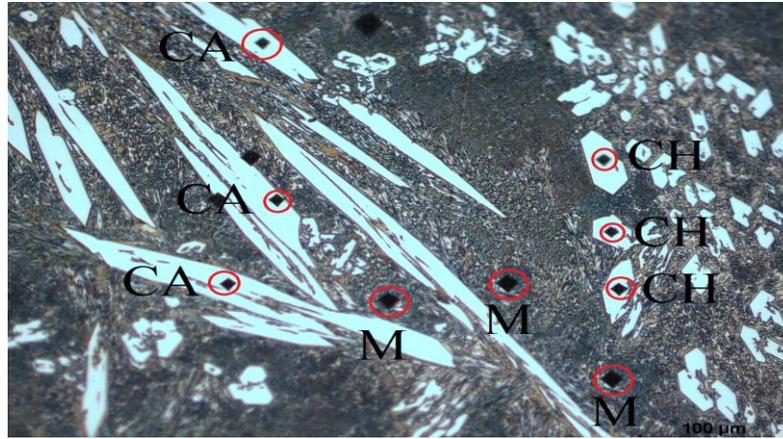


Figura 31. Imagen de microscopía óptica de la superficie del recubrimiento donde se observa las Indentaciones realizadas en cada una de las fases: Matriz (M), carburos hexagonales (CH), carburos alargados (CA).

Fuente. Autores.

Tabla 7. Medidas de microdureza en escala vickers para cada una de las fases presentes en la superficie del recubrimiento.

MEDIDAS DE MICRODUREZA VICKERS	
Fase del recubrimiento	valor (HV _{25gf})
Carburos hexagonales	1482,334 ± 183,757
Carburos alargados	1421,663 ± 43,542
Matriz	699,554 ± 38,596

Fuente: Autores

El menor valor de microdureza de 699,554±38,596 HV_{25gf} fue presentado por la matriz y los carburos hexagonales y alargados tienen valores muy cercanos entre ellos de 1482,334 ±183,757 HV_{25gf} y 1421,663±43,542 HV_{25gf} respectivamente, lo que podría indicar que son la misma fase.

5.2. ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS

5.2.1. ANÁLISIS DE LA MATRIZ

Se obtuvo un mapa composicional de la matriz del recubrimiento por medio de EDS el cual permite diferenciar de manera cualitativa los elementos constitutivos de la matriz, tal como lo muestra la figura 32.

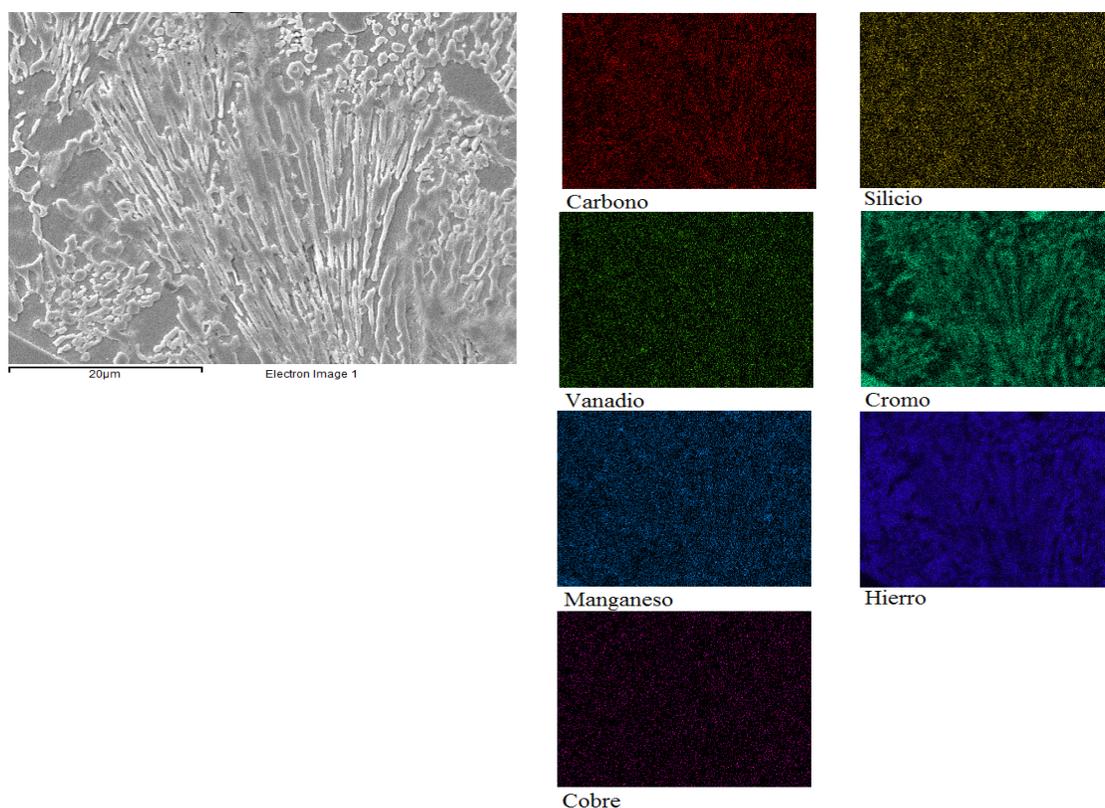


Figura 32. Mapa composicional de la matriz del recubrimiento depositado en la muestra.

Fuente. Autores.

Véase en la figura 32 que de acuerdo a los mapas composicionales la matriz analizada del recubrimiento tiene presencia principalmente de los elementos como Cromo, Hierro, Carbono.

5.2.2. ANÁLISIS DE LA MATRIZ

En la figura 33 se realizó microanálisis químico puntual en los carburos de la matriz, se pudo verificar que los elementos con más presencia son Cromo 25.79 %, Hierro 59 %, Carbono 8.32% .La tabla 8 muestra de forma cualitativa el porcentaje en peso de los elementos presentes en los carburos del recubrimiento. El cromo y el hierro presentaron los mayores porcentajes en peso.

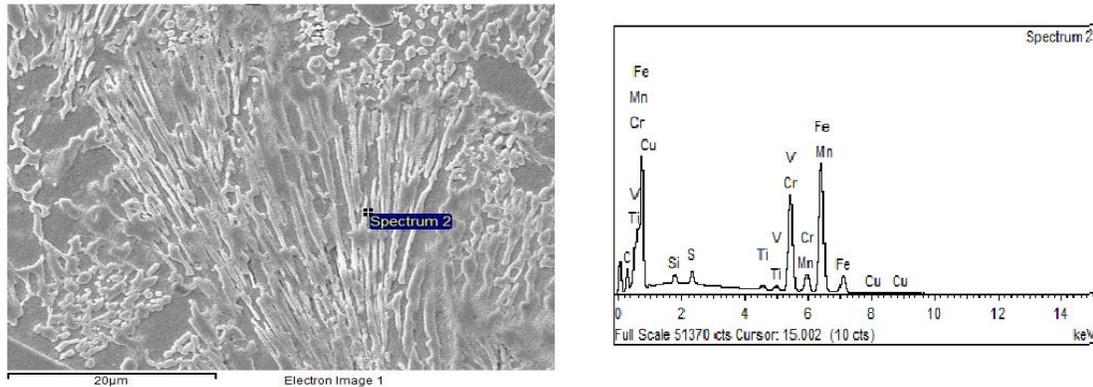


Figura 33. Espectro EDS tomado en la matriz de la muestra de recubrimiento duro para el punto 2.

Fuente. Autores.

Tabla 8. Porcentaje en peso de elementos en los carburos de la muestra de soldadura para el punto 2.

N°	ELEMENTO	%PESO	% ATÓMICO
1	C K	8.32	28.94
2	Si K	0.67	1.00
3	S K	0.99	1.29
4	Ti K	0.61	0.54
5	V K	0.80	0.65
6	Cr K	25.79	20.71
7	Mn K	2.17	1.65
8	Fe K	59.00	44.13
9	Cu L	1.64	1.08
TOTAL		100.00	

5.2.2. ANÁLISIS DE LA MATRIZ

Fuente: Autores

La figura 34 muestra los resultados de la medición por EDS realizada en la fase γ de la matriz. Los elementos encontrados fueron: Carbono, Silicio, Vanadio, Cromo, Manganeso, Hierro y Cobre. La tabla 9 muestra de forma cualitativa el porcentaje en peso de éstos elementos.

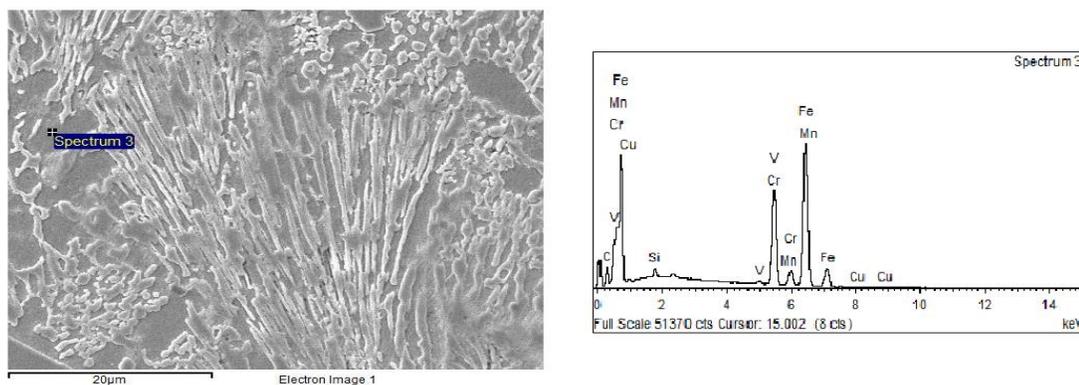


Figura 34. Espectro EDS tomado en la matriz de la muestra de recubrimiento duro para el punto 3.

Fuente. Autores.

Tabla 9. Porcentaje en peso de elementos en la matriz de la muestra de soldadura para el punto 3

N°	ELEMENTO	PESO	% ATÓMICO
1	C K	6.71	24.58
2	Si K	0.70	1.10
3	V K	0.60	0.52
4	Cr K	24.64	20.85
5	Mn K	1.25	1.00
6	Fe K	64.60	50.91
7	Cu L	1.50	1.04
TOTAL		100.00	

Fuente: Autores

5.2.2. ANÁLISIS CARBUROS HEXAGONALES

La figura 35 es un mapa composicional donde se pueden diferenciar los elementos e indirectamente también las fases que componen la muestra de soldadura.

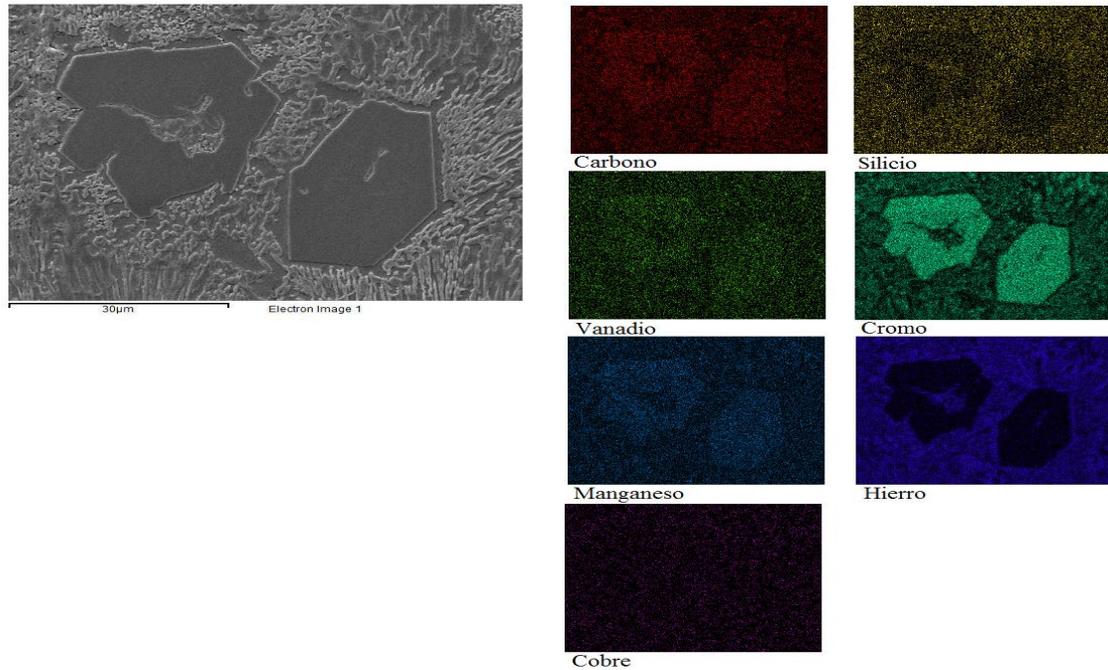


Figura 35. Mapa composicional para el análisis químico de los carburos hexagonales presentes.

Fuente. Autores.

La figura 35 muestra la presencia de dos carburos hexagonales que fueron formados durante el proceso de enfriamiento del material, el microanálisis cualitativo revela la riqueza del carburo en Cromo y Hierro. Los resultados del microanálisis químico mediante espectroscopia de dispersión por energía EDS se muestran la figura 36. De igual manera, la tabla 10 muestra de forma cualitativa el porcentaje en peso de los elementos presentes en el carburo hexagonal en el recubrimiento.

5.2.2. ANÁLISIS CARBUROS HEXAGONALES

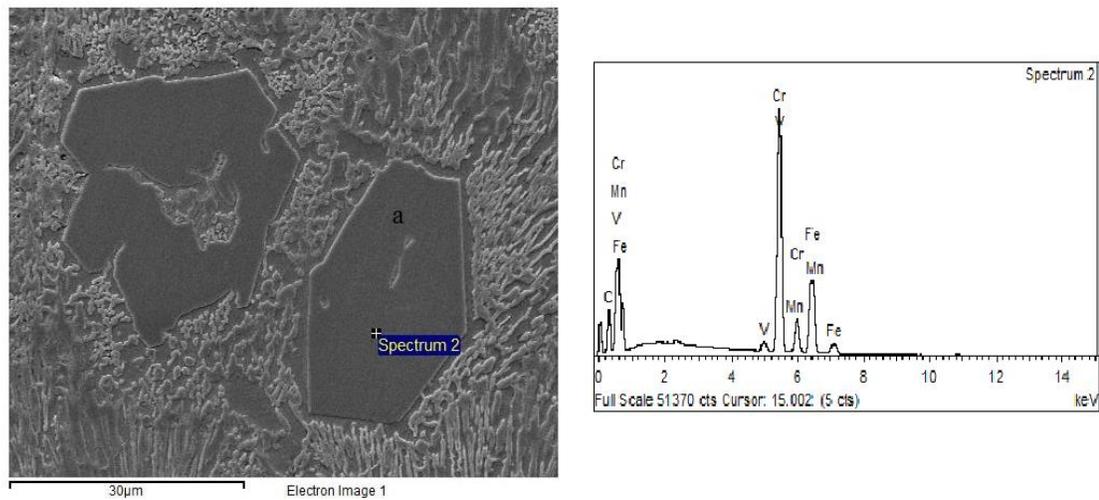


Figura 36. Espectro EDS tomado en el carburo hexagonal a de la muestra de soldadura.

Fuente. Autores.

Tabla 10. Porcentaje en peso de elementos en el carburo hexagonal a de la muestra de soldadura.

N°	ELEMENTO	%PESO	% ATÓMICO
1	C K	11.12	35.66
2	V K	1.87	1.41
3	Cr K	56.49	41.85
4	Mn K	1.23	0.86
5	Fe K	29.29	20.21
TOTAL		100.00	

Fuente. Autores.

El microanálisis químico realizado revela que el carburo hexagonal (a) en la muestra de soldadura está conformado principalmente por Cromo (~57%), Hierro (~30%), Carbono (~11%).

5.2.3. ANÁLISIS CARBUROS ALARGADOS

La figura 37 es un mapa composicional donde se pueden diferenciar los elementos e indirectamente también las fases que componen la muestra de soldadura.

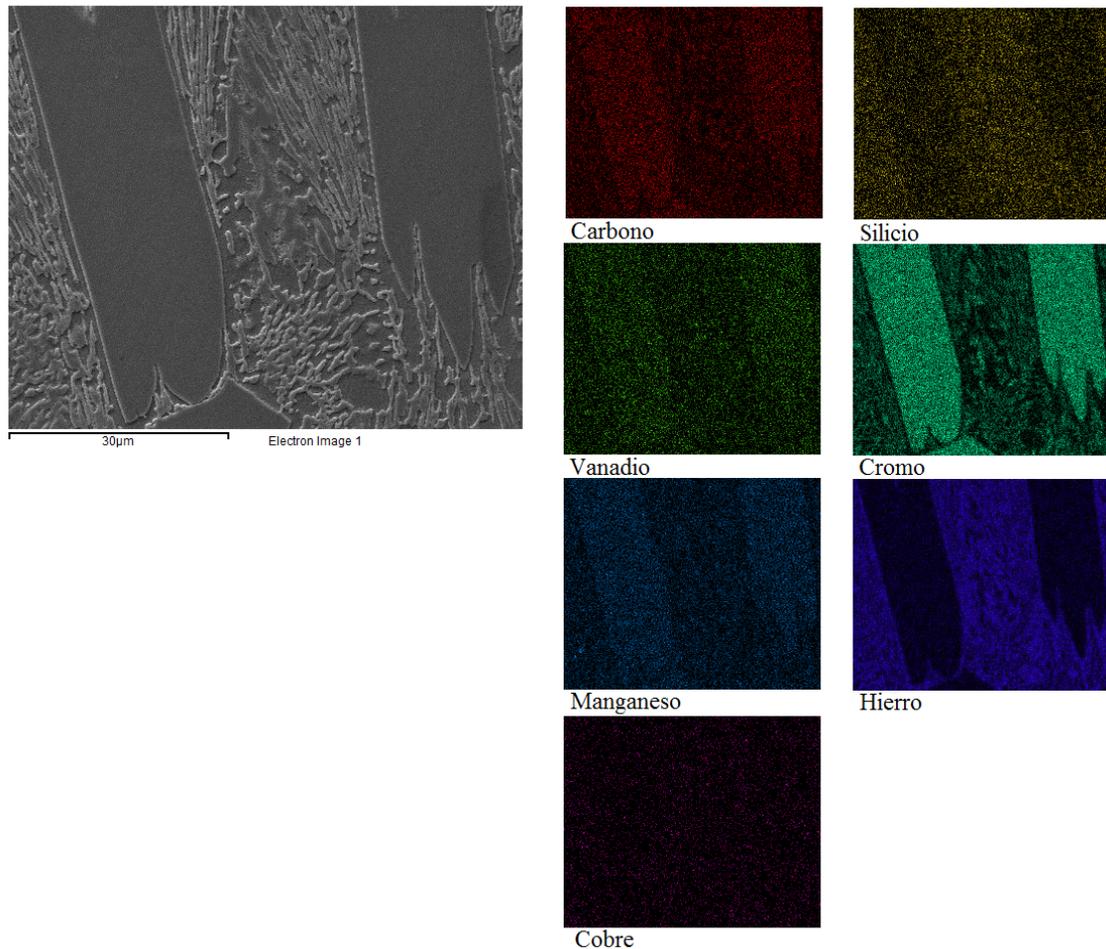


Figura 37. Mapa composicional de dos carburos alargados en la matriz que se presentaron en la muestra de soldadura luego de pasar por el proceso de enfriamiento.

Fuente: Autores

La figura 37 muestra la presencia de dos carburos alargados en la matriz que fueron formados durante el proceso de enfriamiento del material, el microanálisis cualitativo revela la presencia de los siguientes elementos: Cromo, Hierro, Carbono, Vanadio,

5.2.3. ANÁLISIS CARBUROS ALARGADOS

Manganeso. Los resultados del microanálisis químico mediante espectroscopia de dispersión por energía EDS realizado en el carburo a se muestran en la figura 38.

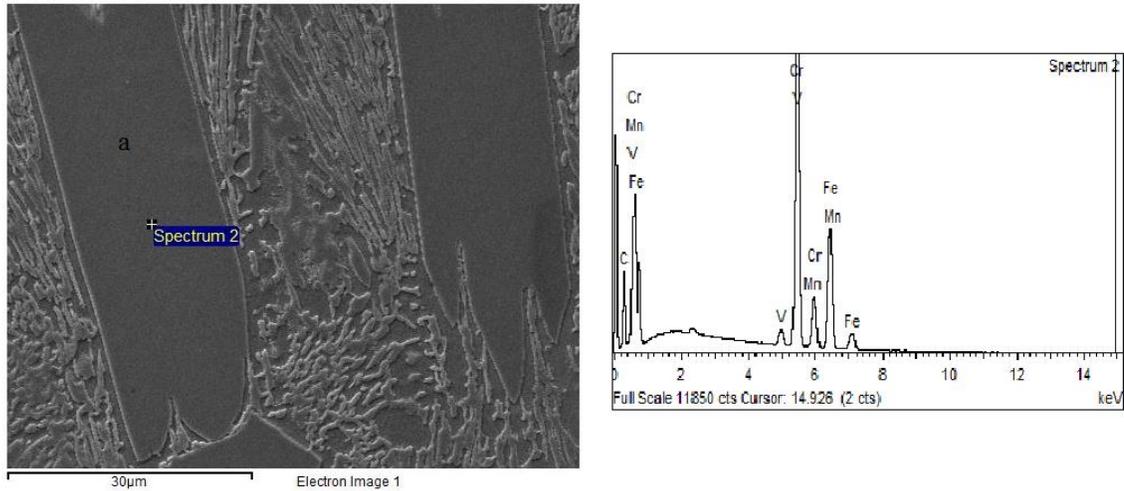


Figura 38. Espectro EDS tomado en el carburo alargado a presente en la muestra de soldadura.

Fuente: Autores

Tabla 11. Porcentaje en peso de elementos en el carburo alargado a presente en la muestra de soldadura.

N°	ELEMENTO	PESO	% ATÓMICO
1	C K	11.80	37.22
2	V K	1.86	1.38
3	Cr K	55.58	40.51
4	Mn K	1.14	0.79
5	Fe K	29.62	20.10
TOTAL		100.00	

Fuente: Autores

El microanálisis químico realizado revela que el carburo alargado (a) en la muestra de soldadura está formada por Cromo (~56%), Hierro (~30%), Carbono (~11%).

5.2.3. ANÁLISIS CARBUROS ALARGADOS

El microanálisis de cualitativo de rayos X de energía dispersiva permite la evaluación de la muestra mediante la aplicación de un haz de energía durante un corto tiempo determinado. Dado que el detector EDS tiene prácticamente una eficiencia constante (cerca a 100%) del rango de 3 a 10 keV, las alturas relativas de los picos observadas para las familias de las líneas de rayos X están próximas a los valores esperados para la señal a medida que se emite de la muestra.

Por otra parte la resolución lateral en los espectros EDS es baja, lo que conduce a frecuentes problemas de interferencia espectral. Particularmente cuando se consideran picos de baja intensidad relativa. Para ayudar en la identificación de incógnitas, es útil considerar la aparición de las familias K, L y M en los espectros EDS como una función de la posición en el rango de energía 0.1-10 keV. Los pesos de información de las líneas de una familia proporcionan importantes elementos de identificación. La familia K consta de dos líneas reconocibles, K_{α} y K_{β} . Donde K_{α} es la energía emitida (rayos X) por un átomo de la muestra al pasar de una capa intermedia a una más cercana al núcleo, y K_{β} es la energía emitida el mismo átomo de la muestra al pasar de una capa externa a una más cercana al núcleo.

Tabla 12. *Energía emitida teórica (rayos X), por los átomos de la muestra de soldadura.*

ELEMENTOS	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
ENERGÍA KL3 ($K_{\alpha 1}$) keV	N.A.	5.898	1.741	5.413	17.479	4.951
ENERGÍA KM3 ($K_{\beta 1}$) keV	N.A.	6.492	N.A.	5.947	19.607	5.431

Fuente: (Joseph I. Goldstein, 1992)

5.3. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

La figura 39 muestra el difractograma obtenido para el recubrimiento.

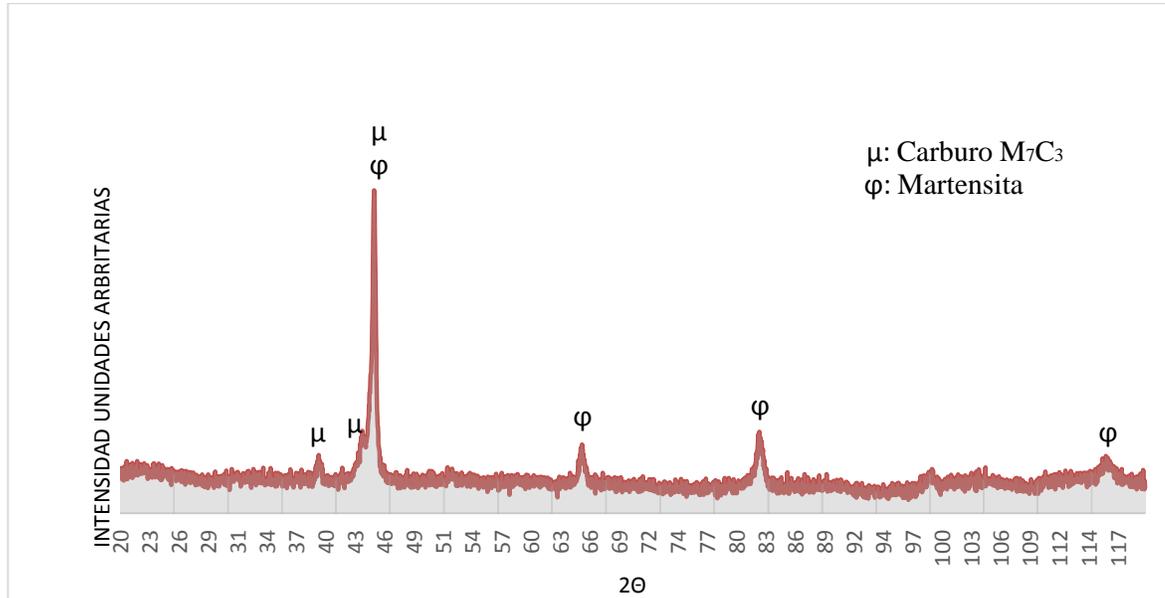


Figura 39. Difractograma del recubrimiento duro West Hard 70.

Véase que el difractograma muestra los picos característicos de la Martensita con estructura cúbica de cuerpo centrado localizados aproximadamente en los ángulos 2θ de 44° , 64° , e 82° . La ficha utilizada para esta indexación fue la ICDD #00-006-0696. Adicionalmente, se encontraron picos correspondientes al carburo tipo M_7C_3 localizados en los ángulos 2θ de 40° , 44° y 45° . La letra M corresponde a los elementos metálicos hierro y cromo y las fichas utilizadas en la indexación fueron ICDD 00 017 0333 y ICDD 00 036 1482 respectivamente ICDD.

Acorde a estos resultados y la microestructura observada, se puede concluir que el recubrimiento es una aleación hipereutéctica constituida por una matriz de Martensita y carburos eutécticos y por carburos hexagonales proeutécticos. Ambos carburos son tipo

5.3. ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

M₇C₃. Durante el proceso de solidificación, la primera fase que aparece son los carburos hexagonales tipo M₇C₃. Posteriormente, se dio la transformación eutéctica creando la matriz del recubrimiento. Inicialmente, la matriz estuvo constituida por Austenita y carburos, sin embargo, como el proceso se dio por un enfriamiento rápido esta fase Austenítica transformó a Martensita. En el difractograma no se observaron picos de Austenita, lo que podría indicar que no hay Austenita retenida o que su presencia es mínima, por tanto, no se detectó en la difracción de rayos X. Estos resultados son compatibles con los reportados por otros autores como por ejemplo Bálamo et al. (1995), quienes mostraron que contenidos desde (4 % - 6 %) de Carbono y (16 % - 35 %) Cromo promueven la formación de microestructuras hipereutécticas con carburos grandes y de secciones hexagonales.

5.4.RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESGASTE ABRASIVO.

Realizando dos ensayos a la probeta recubierta con WEST HARD 70 y un ensayo al acero de herramienta AISI D2 se obtuvo:

Tabla 13. Pérdida de masa del recubrimiento duro y el acero de herramienta AISI D2.

Ensayo	Δm (g)	Resistencia relativa al desgaste
1	0,286	3,2
2	0,298	3,0
AISI D2	0,915	

Fuente. Autores.

5.4. RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESGASTE ABRASIVO

Resistencia relativa al desgaste calculado como el cociente entre la pérdida de masa del material de referencia (AISI D2) y la pérdida de masa del recubrimiento WEST HARD 70.

6. RECOMENDACIONES

Observar las superficies de los recubrimientos después de los ensayos de abrasión utilizando microscopía electrónica de barrido con el objetivo de identificar los mecanismos de desgaste actuantes.

Realizar ensayos de resistencia al desgaste abrasivo a recubrimientos utilizados usualmente en aplicaciones de desgaste en la ciudad Montería.

7. CONCLUSIONES

Se obtuvo un recubrimiento hipereutético a partir del proceso de soldadura eléctrica de arco revestido. El recubrimiento está formado por una matriz constituida por una matriz bifásica de martensita y carburos alargados eutéticos junto con carburos hexagonales proeutéticos. Ambos carburos son tipo M_7C_3 . Los resultados de difracción de rayos X no mostraron picos de Austenita, indicando que no hay Austenita retenida o que su presencia es mínima.

Las medidas de microdureza en la matriz y en los carburos proeutéticos hexagonales y alargados fueron de 700 ± 30 HV_{25gf} s, 1482 ± 30 HV_{25gf} y 1421 ± 30 HV_{25gf} respectivamente.

Los resultados de EDS mostraron que los principales elementos constitutivos de la matriz fueron Hierro 59 %, Cromo 26 %, Carbono 8 % en la Martensita y Carbono 12 %, Vanadio 2 %, Cromo 56 %, Manganeso 1 %, Hierro 30 %, en los carburos alargados. En los carburos hexagonales se encontraron los elementos Carbono 11 %, Vanadio 2 %, Cromo 57 %, Manganeso 1 %, Hierro 29 %.

El recubrimiento duro fue en promedio 3,1 veces más resistente que el acero de herramienta AISI D2.

8. BIBLIOGRAFÍA

ASTM A36 - 05. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Carbon Structural Steel., **Annual book of ASTM Standards**, 2005

ASTM G40. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion., **Annual book of ASTM Standards**, 2013.

ASTM G65. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. **Annual book of ASTM Standards**, 2004.

Bálsamo, P., Scotti, A., & Biasoli de Mello, J. (1995). Interpretación de la microestructura de recargues duros depositados por soldadura utilizando la superficie de liquidus de diagramas Fe-Cr-C. Revista de Soldadura. CENIM, 25, 199 – 207.

Bhushan, B., 2013. introduction to tribology. USA: WILEY .

Burwell , J. T. & Strang , C. D. On the empirical law of adhesive wear. Journal of Applied Physics, 23(1), pp. 18-28, 1952.

Crook, P., & Farmer, H. (1992). Friction, Lubrication, and Wear Technology. In Friction and wear of hardfacing alloys (pp. 759 –765). ASM International, Volumen 18.

8. BIBLIOGRAFÍA

Davis, J. R., 2000. ASM Specialty Handbook Nickel, cobalt, and their alloys. United States of America : Copyright.

DIN 50320. Wear-Term-Systems analysis of wear processes-Classification of the field of wear. Deutsches Institut für Normung, 1979 - 2012.

Giachino, J. W. & Weeks, W. Técnica y práctica de la soldadura. primera ed. Barcelona, España: EDITORIAL REVERTÉ, 2007.

Gil, M., Iván, H., Herrera, M., Alejandro, D., Barrada, G., Enrique, J., ... Gil, M. (2004). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614416>. *Dyna*, 71(144), 151 – 163.

Godfrey, D. Diagnosis of wear mechanisms. Wear Control Handbook, pp. 283-311, 1980.

González Hernández, A. G. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno, Medellin, Antioquia: Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia, 2008.

Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., ...

Michael, J. R. (2003). Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis (Vol. 44).

8. BIBLIOGRAFÍA

Gualco, A., Svoboda, H. G., Surian, E. S., & Vedia, L. a De. (2010). Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit.

Materials and Design, 31(9), 4165–4173. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.026>

Jahanmir, S. On the wear mechanisms and the wear equations. Fundamentals of Tribology, pp. 455-467, 1980.

Joseph I. Goldstein, Dale E. Newbury, Patrick Echlinn, David C. Joy, A. D. Romig,

Charles E. Lyman, Charles Fiori, Eric Lifshin.(1992). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.

Kato, K. Abrasive wear of metals. Tribology International, 30(5), pp. 333-338, 1997.

Kotecki, D. J., & Ogborn, J. S. (1995). Abrasion Resistance of Iron-Based Hardfacing Alloys. Welding Journal, 74(8), S269–S278.

Martínez Pérez, F. LA TRIBOLOGÍA ciencia y técnica para el mantenimiento. Segunda ed. México DF, México: EDITORIAL LIMUSA, 2002.

Morral, F. R., Jimeno, E. & Molera, P. METALURGIA GENERAL. primera ed. Barcelona, España: EDITORIAL REVERTÉ, 1985.

Neale, M. & Gee, M. Guide to Wear Problems and Testing for Industry. Primera ed. New York, Estados Unidos: PUBLICACIONES WILLIAM ANDREW, 2001.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ludema, K. C., 1996. FRICTION, WEAR, LUBRICATION. London New York: CRC PRESS.

Rice , S. L. A review of wear mechanisms and related topics. Ibid, pp. 469-476, 1980.

Rode, W. (2014). Soldaduras especiales. In ESAB (Ed.), (5th ed., pp. 13 – 23).

Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (1993). Engineering Tribology (24th ed.). Australia: ELSEVIER.

Toro, A., Mesa Grajales , D. H., León Sevilla, L. M. & Gutiérrez, J. C.
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO EN
RECUBRIMIENTOS DUROS PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA MINERA.
Scientia et Technica, 10(25), pp. 149-154, 2004.

Venkatesh, B., Sriker, K., & Prabhakar, V. S. V. (2015). Wear Characteristics of
Hardfacing Alloys: State-of-the-art. Procedia Materials Science, 10(Cnt 2014), 527–532.
<http://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.002>

Zum Gahr, K. H. MICROSTRUCTURE AND WEAR OF MATERIALS. segunda ed.
Amsterdam, North Holland: ELSEVIER SCIENCIE PUBLISHERS, 1987.