	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): DANNA LIZBETH APELLIDOS: CONTRERAS MEZA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA INDUSTRIAL

DIRECTOR:

NOMBRE(S): GABRIEL APELLIDOS: PEÑA RODRIGUEZ

NOMBRE(S): MARTHA YASMID APELLIDOS: FERRER PACHECO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA

DEPOSITADO MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES


TECNOLÓGICAS DE TABLETAS DE ARCILLA ROJA.

En el proyecto se determinó la influencia del recubrimiento de magnetita depositado mediante proyección térmica en las propiedades tecnológicas (mecánicas, morfológicas, térmicas y estéticas) de tabletas de arcilla roja. Para ello se aplicaron recubrimientos de Fe₃O₄, con 5, y 10 pases de proyección sobre el sustrato. Se analizó la morfología, composición química y estructura usando las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS) y difracción de rayos X (DRX), el desgaste por abrasión profunda y la resistencia mecánica a la flexión fueron determinados usando las normas NTC 4321-6 Y NTC 4321-4 respectivamente, la caracterización térmica se llevó a cabo bajo los lineamientos de las Normas: ASTM D5334 – 14 y se determinaron las propiedades estéticas mediante inspección visual. Se compararon los resultados obtenidos para las tabletas recubiertas con los de las tabletas sin recubrir, se evidenció una óptima adherencia del recubrimiento debido a la rugosidad que caracteriza al sustrato, se obtuvieron resultados mejorando las propiedades tribológicas, mecánicas, térmicas y estéticas, especialmente en los recubrimientos elaborados con diez pases de proyección. Se concluye que los recubrimientos de Fe₃O₄ son buenos candidatos para ser usados en diversas aplicaciones tecnológicas propias conferidas por las propiedades de la magnetita.

PALABRAS CLAVES: magnetita, proyección térmica por llama, desgaste por abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, conductividad térmica.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 122 PLANOS: ILUSTRACIONES: 51 CD ROOM:

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): YULIZAK SULVEY APELLIDOS: GELVES MORENO

FACULTAD: INGENIERIA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR:

NOMBRE(S): GABRIEL APELLIDOS: PEÑA RODRÍGUEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): "INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTÉTICAS DE TABLETAS DE ARCILLA ROJA"

En el proyecto se determinó la influencia del recubrimiento de magnetita depositado mediante proyección térmica en las propiedades mecánicas, morfológicas, térmicas y estéticas de tabletas de arcilla roja. Para ello se aplicaron recubrimientos de Fe_3O_4 , con 5, y 10 pases de proyección sobre el sustrato. Se analizó la morfología, composición química y estructura usando las técnicas de Microscopía Electrónica de barrido (MEB), Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) y difracción de rayos X (DRX), el desgaste por abrasión profunda y la resistencia mecánica a la flexión fueron determinados usando las normas NTC 4321-6 Y NTC 4321-4 respectivamente, la caracterización térmica se llevó a cabo bajo los lineamientos de las Normas: ASTM D5334 – 14 y se determinaron las propiedades estéticas mediante inspección visual. Se compararon los resultados obtenidos para las tabletas recubiertas con los de las tabletas sin recubrir, se evidenció una óptima adherencia del recubrimiento debido la rugosidad que caracteriza al sustrato, se obtuvieron resultados mejorando las propiedades tribológicas, mecánicas, térmicas y estéticas, especialmente en los recubrimientos elaborados con diez pases de proyección. Se concluye que los recubrimientos de Fe_3O_4 son buenos candidatos para ser usados en diversas aplicaciones tecnológicas propias conferidas por las propiedades de la magnetita.

PALABRAS CLAVES: magnetita, proyección térmica por llama, desgaste por abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, conductividad térmica.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 122 PLANOS: ILUSTRACIONES: 51 CD ROOM:

****Copia No Controlada****

INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE
PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE TABLETAS DE
ARCILLA ROJA

DANNA LIZBETH CONTRERAS MEZA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE
PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTÉTICAS DE
TABLETAS DE ARCILLA ROJA

YULIZAK SULVEY GELVES MORENO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE
PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE TABLETAS DE
ARCILLA ROJA

DANNA LIZBETH CONTRERAS MEZA

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de “ingeniero industrial”

Director.

Gabriel Peña Rodríguez. PhD. Ingeniería de Materiales

(GIFIMAC-UFPS)

Codirector.

Martha Yasmid Ferrer Pacheco. PhD. Ingeniería de Materiales

(GIFIMAC-UFPS)

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE
PROYECCIÓN TÉRMICA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTÉTICAS DE
TABLETAS DE ARCILLA ROJA

YULIZAK SULVEY GELVES MORENO

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de “ingeniero civil”

Director.

Gabriel Peña Rodríguez. PhD. Ingeniería de Materiales

(GIFIMAC-UFPS)

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 06 de mayo, 2022
HORA: 02:00 p.m.
LUGAR: SALON SC 302
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL

TÍTULO DE LA TESIS: "INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE PROYECCIÓN TERMICA EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE TABLETAS DE ARCILLA ROJA."

JURADOS: CARLOS ALBERTO ARARAT BERMUDEZ
LEONARDO CELY ILLERA

DIRECTOR: GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ
CODIRECTOR: MARTHA YASMID FERRER PACHECO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CÓDIGO	CALIFICACIÓN LETRA	NÚMERO
DANNA LIZBETH CONTRERAS MEZA	1192141	cinco con cero	5,0

LAUREADA



CARLOS ALBERTO ARARAT BERMUDEZ



LEONARDO CELY ILLERA



Vo.Bo ÓSCAR MAYORGA TORRES
Director Plan de Estudios
Ingeniería Industrial
Magda M.

ACTA DE SUSTENTACION DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 30 DE ABRIL DE 2022 HORA: 9:00 a. m.

LUGAR: FU-303 UFPS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA CIVIL

TITULO DE LA TESIS: "INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO DE MAGNETITA DEPOSITADO MEDIANTE PROYECCION TERMICA EN LAS PROPIEDADES MECANICAS Y ESTETICAS DE TABLETAS DE ARCILLA ROJA".

JURADOS: ING. MsC. CLAUDIA LILIANA CASADIEGO PERALTA
ING. MsC. JOSE RAFAEL CACERES RUBIO

DIRECTOR: GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ.

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTES:	CODIGO	CALIFICACION
YULIZAK SULVEY GELVES MORENO	1112807	NUMERO 5,0 LETRA CINCO, CERO

LAUREADA


ING. MsC. CLAUDIA LILIANA CASADIEGO PERALTA


ING. MsC. JOSE RAFAEL CACERES RUBIO


Vo. Bo. _____
JAVIER ALFONSO CARDENAS GUTIERREZ
Coordinador Comité Curricular

Betty M.

Agradecimientos

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales – GIPIMME, de la Universidad de Antioquia por la colaboración en la elaboración de los recubrimientos.

Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada-GIFIMAC de la UFPS, por su colaboración en la elaboración de los recubrimientos y para la toma de datos de la caracterización térmica con el equipo C-therm.

Grupo de Investigación en Diseño Mecánico, Materiales y Procesos - GIDIMA. de la UFPS, por su colaboración en la toma de imágenes con microscopía óptica

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Problema	21
1.1 Titulo	21
1.2 Planteamiento del problema	21
1.3 Formulación de la pregunta problema	24
1.4 Justificación	24
1.4.1 A nivel del grupo de Investigación	24
1.4.2 A nivel del estudiante	25
1.5 Objetivos	25
1.5.1 Objetivo general	25
1.5.2 Objetivos específicos	25
1.6 Alcances y limitaciones	26
1.6.1 Alcances	26
1.6.2 Limitaciones	27
2. Marco referencial	28
2.1 Antecedentes y estado del arte	28
2.1.1 Antecedentes internacionales	28
2.1.2 Antecedentes nacionales	31
2.2 Marco teórico	35
2.2.1 Magnetita	35
2.2.2 Proyección térmica por llama	38
2.2.3 Microscopia electrónica de barrido	46
2.2.4 Difracción de rayos X	48
2.2.5 Ensayo de resistencia mecánica a la flexión	49
2.2.6 Ensayo de resistencia a la abrasión profunda	50
2.2.7 Funcionamiento del C-Therm TCI	51
2.2.8 Propiedades Estéticas	52
2.2.9. Conductividad eléctrica	52
2.3 Marco conceptual	53
2.4 Marco contextual	54
2.5 Marco legal	54

3. Diseño metodológico	56
3.1 Tipo de investigación	56
3.2 Población y muestra	58
3.2.1 Población	58
3.2.2 Muestra	59
3.3. Instrumentos para la recolección de la información	59
3.3.1 Fuentes Primarias	59
3.3.2 Fuentes Secundarias	59
3.4 Análisis de la información	60
4. Materiales y métodos	61
4.1 Obtención de la materia prima	61
4.1.1 Sustrato	61
4.1.2 Polvos de partida del recubrimiento	62
4.2 Elaboración de los recubrimientos mediante proyección térmica por llama	63
4.3 Caracterización estructural	66
4.3.1 Difracción de rayos X (DRX)	66
4.4 Caracterización morfológica	67
4.4.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	67
4.4.2 Microscopia óptica	70
4.4.3 Determinación del tamaño de partícula	71
4.5 Caracterización química	72
4.5.1 Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS)	72
4.6 Caracterización estética	73
4.6.1. Propiedades sensoriales	73
4.7 Caracterización tribológica	75
4.7.1 Resistencia la abrasión profunda	75
4.8 Caracterización mecánica	77
4.8.1 Resistencia a la flexión	77
4.9 Caracterización térmica	79
4.9.1 Conductividad térmica y efusividad	79
4.10. Caracterización eléctrica	82
4.10.1 Conductividad eléctrica	82
5. Resultados y análisis	83
5.1 Resultados y análisis de la caracterización de la materia prima	83

5.1.1	Análisis Estructural de los polvos de partida	83
5.1.2	Análisis Morfológico de los polvos de partida	84
5.1.3	Composición química de los polvos de partida	86
5.1.4	Análisis morfológico y químico del sustrato	87
5.2	Resultados y análisis de la caracterización estructural, morfológica y química del recubrimiento	87
5.2.1	Análisis estructural del recubrimiento	87
5.2.2	Análisis Morfológico del recubrimiento	90
5.2.3	Análisis de la composición química del recubrimiento	94
5.3	Resultados y análisis de la caracterización Estética	95
5.3.1	Propiedades sensoriales del sustrato y recubrimientos	95
5.4.	Resultados y análisis de la caracterización tribológica	98
5.4.1.	Evaluación de la resistencia a la abrasión profunda del sustrato y recubrimientos	98
5.5.	Resultados y análisis de la caracterización mecánica	99
5.5.1.	Evaluación de la resistencia a la flexión del sustrato y recubrimientos	99
5.6	Resultados y análisis de la caracterización térmica	101
5.6.1.	Evaluación de las propiedades térmicas de las muestras con y sin recubrimiento	101
5.7	Resultados y análisis de la caracterización eléctrica	104
5.7.1	Conductividad eléctrica del recubrimiento	104
5.8	Tratamiento estadístico	105
5.9	Socialización de los resultados	107
6.	Conclusiones	109
7.	Recomendaciones	111
8.	Lista de referencias	112
	Anexos	121

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas, químicas y cristalográficas de la Magnetita	37
Tabla 2. Parámetros utilizados para la proyección térmica de los polvos de magnetita	66
Tabla 3. Guía para describir las propiedades estéticas de las muestras	74
Tabla 4. Fases identificadas, cuantificación de la parte cristalina y parámetros de red	89
Tabla 5. Propiedades visuales del sustrato y el recubrimiento	96
Tabla 6. Propiedades táctiles del sustrato y el recubrimiento	97
Tabla 7. Resultados de la abrasión profunda en las muestras	99
Tabla 8. Resultados de la resistencia mecánica a la flexión de las muestras sin y con los recubrimientos	100
Tabla 9. Efusividad y conductividad térmica de los sustratos	102
Tabla 10. Efusividad y conductividad térmica de los recubrimientos para cinco ciclos	102
Tabla 11. Efusividad y conductividad térmica de los recubrimientos para diez ciclos	102
Tabla 12. Resultados de la resistividad y a la conductividad eléctrica del recubrimiento	104
Tabla 13. módulo de ruptura por flexión, volumen medio de huella por abrasión profunda, del sustrato y de los dos recubrimientos de magnetita	107

Lista de Figuras

Figura 1. Estructura cristalográfica de la magnetita	36
Figura 2. Estructura de magnetita, sistema de cristal isométrico	38
Figura 3. Esquema de los diferentes pasos involucrados en el proceso de proyección térmica	40
Figura 4. Diagrama experimental del proceso de proyección térmica	41
Figura 5. a) Comportamiento térmico de las llamas de combustión entre el oxígeno y el acetileno distribución de temperatura en las zonas de la llama, b) Tipos de llama	42
Figura 6. Sección transversal de un recubrimiento por proyección térmica oxiacetilénica	43
Figura 7. Equipamiento de proyección térmica por llama utilizando (a) de manejo manual y (b) automatizado	44
Figura 8 Esquema de una antorcha de llama	45
Figura 9. a) Componentes más importantes del microscopio electrónico de barrido b) las interacciones que se dan entre el haz de electrones y la muestra analizada	47
Figura 10. Espectros EDS simulados de Monte-Carlo de una nanopartícula esférica de 100 y 500 nm de SiO ₂ sobre un sustrato de titanio, excitada a una tensión de haz de 5 y 20 kV	47
Figura 11. Ley de Bragg	49
Figura 12. Representación esquemática del ensayo de flexión en tres puntos	50
Figura 13. Diagrama experimental de la prueba de resistencia a la abrasión profunda	50
Figura 14. Principios de Operación del C-therm	51
Figura 15. Etapas del Proyecto	58
Figura 16. Esquema metodológico	61
Figura 17. Sustrato cerámico	62
Figura 18. Polvo de magnetita	62

Figura 19. a) Sistema de tamizado y b) tamices	63
Figura 20. Sistema de proyección térmica de la cámara ARESTE I	64
Figura 21. Imagen de las muestras cerámicas con y sin recubrimiento	65
Figura 22. Equipo de difracción de rayos X marca XPERT-PRO	67
Figura 23. a) Microscopio electrónico de barrido, referencia ZEISS EV0-MA10, UPTC. b) JEOL JSM 6490 LV	68
Figura 24. Proceso de preparación de las muestras. a) Embebido. b) Secado. c). Corte. d) Lijado e inspección. e) Pulido. f) Pulido fino	70
Figura 25. Microscopio Óptico	71
Figura 26. imágenes de MEB a 500X utilizadas para determinar el diámetro de Feret, mediante el software ImageJ	72
Figura 27. Abrasimétero marca Gabbrielli Technology modelo Cap/3	75
Figura 28. Máquina universal EMIC modelo DL2000, utilizada para la caracterización mecánica de las muestras	78
Figura 29. Equipo C-Therm, utilizado para la caracterización térmica de las muestras	80
Figura 30. Agente de contacto, sensor MTPS, montaje del sustrato y de la muestra recubierta	81
Figura 31. Esquema de resultados	83
Figura 32. Patrón de Difracción de rayos X del polvo precursor de magnetita y las fases cristalinas identificadas	84
Figura 33. Polvos micrométricos de magnetita. a) Morfología del polvo de Fe_3O_4 . b) Partícula del polvo de Fe_3O_4	85

Figura 34. Distribución de tamaño de partículas de la magnetita suministrada. a) Frecuencia acumulada del diámetro de las partículas b) Histograma frecuencia de los diámetros de las partículas	86
Figura 35. Espectro de composición química elemental	86
Figura 36. Imagen de MEB, y espectro de dispersión de energías de rayos X (EDS) para el sustrato	87
Figura 37. Patrón de difracción de rayos X, para el recubrimiento, e identificación de las fases cristalinas	88
Figura 38. Refinamiento Rietveld del patrón del recubrimiento de magnetita	89
Figura 39. Micrografías MEB de la superficie de los recubrimientos obtenidos a a) 200X, b) 500X, c) 700X y d) 1000X	90
Figura 40. a) Micrografía MEB de las partes detalladas de la superficie del recubrimiento. b) Micrografía MEB de la sección transversal del recubrimiento	91
Figura 41. Micrografías MEB de la sección transversal de los recubrimientos obtenidos a a) 100X, b) 200X, c) 700X y d) 1000X	92
Figura 42. Sección transversal de los recubrimientos tomada con el microscopio óptico	93
Figura 43. Micrografías de la sección transversal de los recubrimientos. a) Recubrimiento con cinco pases de proyección b) Recubrimiento con diez pases de proyección	93
Figura 44. a) área de análisis de la sección trasversal de la muestra. b) Espectro de energía dispersiva de rayos X (EDS)	94
Figura 45. Imagen de MEB de la superficie del recubrimiento utilizada para el microanálisis elemental del recubrimiento	95
Figura 46. Muestras utilizadas para el análisis de las propiedades sensoriales	96

Figura 47. Imágenes de las huellas de abrasión profunda en las muestras sin y con el recubrimiento	98
Figura 48. Imágenes de las muestras después de someterse al ensayo de flexión	101
Figura 49. Diagrama de cajas y bigotes de las conductividades térmicas del sustrato y de los recubrimientos	104
Figura 50. Relación de la conductividad térmica y de la efusividad en función del tipo de muestra	106
Figura 51. Relación del desgaste por abrasión y la resistencia mecánica a la flexión en función del tipo de muestra	107

Lista de ecuaciones

Ecuación 1.1	Reacción incompleta entre cantidades equimolares de oxígeno y acetileno	41
Ecuación 1.2	Reacción del hidrógeno en contacto con el oxígeno presente en el ambiente	41
Ecuación 1.3	Transformación completa carbono en dióxido de carbono e hidrógeno en agua	41
Ecuación 2	Índice de cristalinidad	49
Ecuación 3.1	Volumen desprendido de material del ensayo de abrasión profunda	76
Ecuación 3.2	Ángulo proyectado en el centro del disco rotario por la huella en grados	76
Ecuación 4.1	Fuerza de rotura	79
Ecuación 4.2	Módulo de rotura	79
Ecuación 5.1	Resistividad eléctrica	82
Ecuación 5.2	Conductividad eléctrica	82

Introducción

Norte de Santander, en el año 2021 se reconoce como el departamento fronterizo con el mayor centro de negocios y logística de la región andina, debido a su desarrollo industrial y competitividad en diversos sectores como en el cerámico, por tanto, la industria cerámica ocupa un lugar importante en la economía de San José de Cúcuta, (Camargo , 2016). Considerando el potencial de las materias primas arcillosas concentradas mayoritariamente en la formación geológica León y el grupo Guayabo, el departamento cuenta con diversas empresas dedicadas a la extracción y transformación de la arcilla en productos cerámicos de construcción (Gelves, Monroy, Sánchez, & Ramirez, 2013). Áreas como Cúcuta, Villa del Rosario, Los Patios, El Zulia y San Cayetano representan el 10% de la expansión del Norte de Santander, y el 6,85% pertenece al territorio ocupado por la industria cerámica (Sánchez Molina, Sarabia Guarín, & Álvarez Rozo, 2016).

El estudio y la aplicación de nuevos materiales de recubrimientos se deben a la relevancia que tiene en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, el objetivo principal de la aplicación de recubrimientos puede ser decorativo, funcional o ambos. Para mejorar las propiedades de una superficie se debe usar un recubrimiento funcional, como alternativa se encuentran los recubrimientos metálicos, que además de otorgarle un aspecto decorativo al sustrato, aportan: protección a la corrosión, al desgaste y al choque térmico. Hoy en día, se aplican varios métodos de recubrimiento para lograr las propiedades funcionales o decorativas deseadas. El proceso de recubrimiento por proyección térmica es uno de los métodos más efectivos y atractivos para preservar un material (Rakesh & Santosh , 2018).

En el proyecto de investigación se determina las propiedades tecnológicas (morfología, resistencia a la abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, propiedades térmicas, propiedades estéticas y conductividad eléctricas) de una tableta de arcilla roja, las cuales son susceptibles de ser mejoradas aplicando un recubrimiento de polvo de magnetita haciendo uso de la técnica de proyección térmica por llama oxiacetilénica, para obtener un recubrimiento que dé un valor agregado a las tabletas de arcilla roja. De esta manera, debido a las nuevas propiedades que aporta la magnetita, se realizarán cerámicas metalizadas que puedan ser usadas en diseños arquitectónicos de fachadas, así como en aplicaciones industriales dadas por las propiedades estructurales del recubrimiento metalizado.

1. Problema

1.1 Título

Influencia del recubrimiento de magnetita depositado mediante proyección térmica en las propiedades tecnológicas de tabletas de arcilla roja

Influencia del recubrimiento de magnetita depositado mediante proyección térmica en las propiedades mecánicas y estéticas de tabletas de arcilla roja

1.2 Planteamiento del problema

Los recubrimientos en la ingeniería de superficies ofrecen la posibilidad de mejorar las propiedades de los materiales buscando un bajo costo y el menor daño ambiental posible con el fin de aumentar el rendimiento del material y su vida útil. (Acuña , Moreno , & Espinosa, 2017). En esta área de estudio se encuentran las cerámicas tecnológicas o funcionales diseñadas para aplicaciones especiales con propiedades tecnológicas, estas son aquellas cerámicas que pueden realizar con éxito diversas funciones en diferentes campos de la ingeniería debido a sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, biológicas o químicas (Ramirez , 1921).

La industria cerámica en Norte de Santander, se limita a la fabricación de productos arcillosos, entre los que destacan los materiales de construcción como: cerámica, tableta vitrificada, tableta esmaltada, tejas, ladrillos, etc (Díaz , Sánchez, & Prato, 2016). Por lo que en la región no existen fábricas que produzcan cerámicas tecnológicas, por ejemplo: que sirvan para procesos fotocatalíticos, para implantación de sensores y otras aplicaciones tecnológicas. Por tanto, en términos de tecnología e innovación, el desarrollo de recubrimientos metálicos sobre sustratos cerámicos representa un factor competitivo en la industria cerámica, ya que actualmente ha sido un campo de lento crecimiento en la región. Lo anterior se debe a que las

empresas tienen vínculos débiles con otras empresas o instituciones científicas y tecnológicas en el avance de sus actividades de investigación y desarrollo (Ramírez Delgado, 2012).

La cerámica es un material clave para la fabricación de revestimientos y componentes de pavimentos y techos (Cruz, Figueiredo, Carvalho, & Campos, 2020). Los revestimientos cerámicos aplicados en la construcción se utilizan habitualmente en el interior de los edificios o el revestimiento exterior de las fachadas, recubrimiento de suelos y piscinas (Winnefeld, Kaufmann, Hack, & Harzer, 2012). Los materiales cerámicos tanto cristalinos como no cristalinos son duros y muy frágiles, particularmente a temperaturas bajas. La fragilidad de los materiales cerámicos se intensifica por la presencia de imperfecciones que habitualmente se introducen durante el proceso de fabricación como pequeñas grietas, porosidad, inclusiones extrañas y fases cristalinas (Salán Ballesteros, 2005).

Las propiedades de los sustratos cerámicos influyen directamente en la eficiencia del sistema de revestimiento de las construcciones (Azevedo, y otros, 2018). La eficacia del uso de los recubrimientos cerámicos y su durabilidad en el tiempo está relacionada con la mayor adherencia promovida por la superficie más rugosa del sustrato que favorece la calidad de los recubrimientos, por lo que se busca tener cerámicas con mayor resistencia al desgaste, menor porosidad y baja absorción de agua, lo cual proporciona una gran durabilidad (Winnefeld, Kaufmann, Hack, & Harzer, 2012).

Con el fin de mejorar algunas propiedades físicas y mecánicas de los cerámicos, para baldosas de pisos y paredes, en la actualidad se ha venido investigando sobre recubrimientos con óxidos por métodos como lo es la proyección térmica. Por esta razón, la técnica de recubrimiento por llama oxiacetilénica se ha convertido en un método confiable para depositar recubrimientos en múltiples materiales y sustratos (Tejero, Rezvani, Hussain, & McDonald, 2019). Estos recubrimientos sirven para mejorar las características mecánicas, físicas y químicas, dando

calidades superiores de funcionamiento a la superficie de los sustratos de tabletas de arcilla roja los cuales son el objeto de estudio. No obstante, en Colombia la utilización de la técnica de proyección térmica ha sido limitada, debido a la poca difusión de la tecnología (Cardona & Vargas, 2019).

La magnetita cuenta con propiedades interesantes debido a la presencia de cationes de hierro en dos estados de valencia, Fe^{2+} y Fe^{3+} , en la estructura de espinela inversa (Soares, y otros, 2016). Debido a las propiedades de las partículas magnéticas químicas y físicas que dependen del tamaño y la morfología de las partículas (Shahid, Phearom, & Choi, 2018), son útiles en gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas de las ciencias, como la ciencia médica, la ciencia a nanoescala y las tecnologías de tratamientos de aguas (Shahid & Choi, 2019). Además, estos recubrimientos de magnetita son una opción favorable para proteger la superficie de sustratos con problemas de desgaste, corrosión a alta temperatura y acuosa, regulación térmica y degradación como lo son las tabletas de arcilla roja (Marulanda Arévalo, Trisancho Reyes, & González B, 2014).

Debido a la problemática planteada, en este trabajo, se pretende mejorar las propiedades de las tabletas de arcilla roja, mediante un recubrimiento de magnetita (Fe_3O_4), utilizando la técnica de proyección térmica por llama oxiacetilénica. Los resultados obtenidos en el proyecto de investigación permitirán conocer la influencia del recubrimiento de magnetita en las propiedades tecnológicas de las tabletas, lo que permitirá evaluar el uso del material en diferentes campos de aplicación y a su vez aportará un valor agregado a la tableta cerámica. El desarrollo de este proyecto contribuirá para futuras investigaciones sobre recubrimientos metálicos en materiales cerámicos.

1.3 Formulación de la pregunta problema

¿Cómo influirá el recubrimiento metálico de polvos de magnetita por la técnica de proyección térmica en las propiedades tecnológicas de tabletas a base de arcillas roja?

1.4 Justificación

1.4.1 A nivel del grupo de Investigación.

La proyección térmica es una técnica de recubrimiento de gran crecimiento en los últimos años, debido a que se caracteriza por ser versátil en cuanto a facilidad para la aplicación de recubrimientos, control de parámetros e infraestructura disponible, proporcionando resultados exitosos, aportándole al sustrato propiedades que no poseía (Cardona & Vargas, 2019). Según lo descrito anteriormente en este proyecto, las tabletas de arcilla roja recubiertas conseguirán un carácter más competitivo e innovador en la región debido a sus aplicaciones tecnológicas. Por otro lado, la materia prima utilizada para el recubrimiento abunda en la naturaleza en muy diversos ambientes ya que la magnetita es uno de los óxidos más comunes de la corteza terrestre, y de fácil adquisición (Posada, 2015).

La magnetita contiene propiedades de gran interés que aportarán valor agregado a las tabletas de arcilla roja, ya que a nivel industrial se busca cada vez más superficies con comportamientos especiales (Freiburga, y otros, 2014) . Además, el avance en las tecnologías de recubrimientos superficiales promueve el desarrollo de propuestas de investigación, en las que se busca mejorar el desempeño de los materiales sometidos a ambientes abrasivos, corrosivos y de tráfico pesado.

Por otra parte, el grupo de investigación GIFIMAC-UFPS, al cual pertenecen tanto el director como el codirector del proyecto, es un grupo categorizado (categoría B) ante el sistema de ciencia y tecnología del país y posee amplia y reconocida experiencia en la temática del

proyecto, además posee colaboraciones con muchas instituciones nacionales y extranjeras, las cuales permitieron el cumplimiento de los objetivos propuestos.

1.4.2 A nivel del estudiante.

El proyecto tuvo como propósito, potenciar los conocimientos teóricos adquiridos en la Universidad Francisco de Paula Santander. Algunos de estos saberes se encuentran vinculados a la línea de materiales; en esta área del conocimiento se aprecian en el pensum académico de ingeniería industrial: la electiva de metales, procesos industriales II, diseños de productos y procesos, y ciencia de los materiales. Así mismo, en el campo de estudio de la ingeniería civil se pueden considerar las siguientes asignaturas del pensum académico: materiales, mecánica de sólidos y construcción. Los conocimientos en estas áreas de la ingeniería mencionados anteriormente fueron primordiales para el desarrollo del proyecto de investigación. Por último, el desarrollo del proyecto de investigación de forma multidisciplinar involucró diferentes perspectivas, lo que proporcionó competencias y habilidades que contribuyeron con la formación integral como profesionales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general.

Determinar la influencia del recubrimiento de polvos de magnetita depositado mediante proyección térmica en las propiedades tecnológicas (mecánicas, morfológicas, térmicas y estéticas) de tabletas a base de arcilla roja.

1.5.2 Objetivos específicos.

Evaluar las propiedades mecánicas, morfológicas, térmicas y estéticas de las tabletas de arcilla roja, así como la morfología y estructura de los polvos de magnetita que serán utilizados como materias primas en la elaboración de las cerámicas metalizadas.

Realizar los recubrimientos de polvos de magnetita sobre las tabletas de arcilla roja mediante proyección térmica por llama oxiacetilénica para la obtención de la cerámica metalizada.

Evaluar las propiedades mecánicas, morfológicas, térmicas y estéticas de las tabletas recubiertas y compararlas con las propiedades de las tabletas sin recubrir.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances.

El alcance de este proyecto de investigación radica en la elaboración de recubrimientos con la variación de un parámetro, el cual corresponde a la cantidad de pases proyectadas y al estudio de las propiedades morfológicas, la resistencia a la abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, propiedades térmicas y la evaluación cualitativa del material de las tabletas recubiertas con polvo de magnetita mediante la técnica de proyección térmica por llama oxiacetilénica, comparándolas con las propiedades de las tabletas sin recubrir, para establecer las mejoras en las propiedades que aporte el recubrimiento al sustrato, así como posibles aplicaciones y condiciones de uso.

La materia prima para la elaboración de la cerámica metalizada está conformada por tabletas de arcillas rojas sin esmaltar prensadas provenientes de Cerámicas Italia S.A que se producen en esta empresa de la ciudad de San José de Cúcuta, y los polvos de magnetita, obtenidos comercialmente por la empresa Minarmol de Colombia S.A.S ubicada en Boyacá. Por otro lado, los parámetros considerados para la realización de los recubrimientos son los siguientes: pases de precalentamiento, pases de proyección, flujo de polvo de magnetita, flujo de oxígeno y el flujo del acetileno que fueron determinados por el grupo GIPIME de la Universidad

de Antioquia y el grupo GIFIMAC de la universidad Francisco de Paula Santander, sin embargo, en el proyecto sólo se varió la cantidad de pases proyectadas.

1.6.2 Limitaciones.

La elaboración de los recubrimientos y la realización de algunos ensayos pertinentes para el desarrollo del proyecto de investigación se llevan a cabo por entidades externas, de manera que se necesita de permisos y requerimientos y por ende tiempo en el acondicionamiento de las muestras. Además, se precisa de la disponibilidad de los laboratorios de la Francisco de Paula Santander y estos establecimientos presentan acceso reducido como medida de bioseguridad tomada a causa de la crisis sanitaria

2. Marco referencial

2.1 Antecedentes y estado del arte

Para el desarrollo del proyecto se han consultado y estudiado los siguientes antecedentes, que han sido aprovechados con el fin de brindar un apoyo teórico.

2.1.1 Antecedentes internacionales.

Moraes Santana, E., & Lipinski, S. (2018). Estudo de revestimentos metálicos depositados por projeção térmica contra corrosão marinha. Trabalho de Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba.

Este proyecto compara las características micro-estructurales y electroquímicas de seis diferentes recubrimientos anódicos de aluminio (Al) y zinc (Zn) depositados sobre sustrato de acero al carbono, con el fin de determinar su resistencia a la corrosión en agua sintética marina y selecciona el mejor recubrimiento para su aplicación a escala industrial. Para ello, se realizaron ensayos para medir espesor, dureza, rugosidad, contenido de poros y óxidos, monitoreando el potencial de corrosión y polarización potenciodinámica anódica. Los especímenes de Al fueron producidos por los procesos FS y AS (comparación entre procesos) y los especímenes de Zn por el proceso FS (comparación entre materiales), variando el parámetro de presión del aire comprimido. Los resultados indicaron que el recubrimiento que presentó las mejores características de protección del acero contra la corrosión fue el de zinc rociado por el proceso convencional de llama.

Este trabajo hace parte de los antecedentes ya que se encuentra información sobre el proceso de proyección térmica por llama, metodología para la caracterización de materiales, así como los efectos y aplicaciones de recubrimientos metálicos sobre un sustrato para su valor

agregado. Por otra parte, evidencia el manejo de los parámetros para mejorar los resultados del proceso.

Sunday, K., Hanejkob, F., & Taheria, M. (2017). Magnetic and microstructural properties of Fe₃O₄-coated Fe powder soft magnetic composites. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 423, 164-170.

En este trabajo el polvo de hierro se recubre con partículas de Fe₃O₄, mediante fresado mecánico, después se compacta y cura en un entorno con gas inerte. En esta investigación se encontró que la densidad y la coercitividad mejoran con el aumento de la temperatura; sin embargo, la pérdida de núcleo aumenta en gran medida, lo que se atribuye a la formación de una fase de óxido de hierro más conductora y un volumen de Fe menos resistivo. Lo anterior evidencia las cualidades únicas y el potencial de los revestimientos basados en ferrita que utilizan técnicas tradicionales de pulvimetalurgia y temperaturas de curado más altas para los dispositivos electromagnéticos.

Los compuestos magnéticos blandos (SMC) formados por polvo ferroso recubierto de ferrita permiten obtener capacidades de flujo magnético isotrópico, menores pérdidas en el núcleo y diseños complejos mediante el uso de técnicas pulvimetalúrgicas tradicionales. Los recubrimientos a base de ferrita son ferrimagnéticos, altamente resistivos y poseen altas temperaturas de fusión, por lo que proporcionan barreras eléctricas adecuadas entre las partículas metálicas.

Esta investigación se toma como referencia ya que se presenta la metodología de un trabajo científico relacionado al valor agregado que aporta la magnetita como recubrimiento en un material, se evidencia la capacidad de este material de mejorar aspectos, ya que puede ser un método para reducir las pérdidas en el núcleo de los componentes de los compuestos magnéticos blandos. Por otro lado, en este trabajo se observan herramientas de caracterización que serán

utilizarán en el trabajo, lo que aporta información sobre el funcionamiento y la importancia de estas en la caracterización de materiales.

Verona Gomes, M. N. (2016). Desenvolvimento do compósito de $Fe_3Al-\kappa$ nanométrico em matriz de alumínio para revestimento depositado por aspersão térmica chama a pó . Tese doctoral, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba.

En esta investigación se desarrolló un compuesto de Al/ $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$ con partículas de tamaño micro y nanométrico para verificar la viabilidad de depositar este compuesto mediante el proceso Flame to Powder (FSp) sobre un sustrato de acero para formar un recubrimiento protector. La producción del revestimiento compuesto se estructuró en cuatro pasos principales: primero, la obtención de $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$ ($Fe_3Al-\kappa$) mediante la técnica de procesamiento reactivo de líquidos; en segundo lugar, la reducción de $Fe_3Al-\kappa$ a escala nanométrica mediante molienda de alta energía; tercer paso, producción del compuesto mezclando el $Fe_3Al-\kappa$ nanométrico y micrométrico en diferentes proporciones con aluminio micrométrico, mediante un proceso de mezcla rápida (MR) y; cuarto, la deposición del compuesto por FSp variando la temperatura de precalentamiento del sustrato y la distancia de aplicación.

El compuesto Al/ $Fe_3Al-\kappa$ obtenido se depositó con éxito por FSp con precalentamiento del sustrato a temperaturas de 120°C y 200°C y una distancia de aplicación de 150 mm y 200 mm. El revestimiento que se obtuvo en el sustrato de acero muestra un espesor de capa de hasta 600 μm , una adhesión al sustrato superior al 14 MPa, porosidad inferior al 2%, dureza entre 150 y 200 HV y resistencia a la corrosión superior que el revestimiento de aluminio.

Este proyecto se toma como antecedente, porque exhibe los aspectos teóricos sobre el proceso de proyección térmica por llama, ilustrando los fenómenos, las etapas, equipos y los parámetros que influyen en el proceso, así como las características del recubrimiento típicas que

se producen con esta técnica, y las ventajas frente a otros métodos de recubrimiento. Por otro lado, esta tesis facilitará la comprensión de la caracterización del material, ya que se evidencia el uso de gran parte de las herramientas que también se tendrán en cuenta para el desarrollo del actual proyecto.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Hurtado Hurtado, F. M. (2019). Desarrollo de recubrimientos nanoestructurados de Al_2O_3 y $Al_2O_3-TiO_2$ depositados mediante proyección térmica oxiacetilénica, como una posible alternativa para la sustitución del cromoduro. Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia, Departamento de Materiales, Medellín.

En este proyecto se depositan recubrimientos de alúmina y alúmina-titania de estructura bimodal por proyección térmica por llama oxiacetilénica, a partir de polvos aglomerados disponibles comercialmente y nanométricos aglomerados en el Laboratorio de Mineralurgia de la Universidad de Antioquia, mediante secado por aspersión y peletización en tambor rotatorio, buscando encontrar condiciones para producir los recubrimientos de la manera más económica y cumpliendo con las exigencias técnicas suficientes para sustituir al cromoduro.

Los recubrimientos fueron evaluados a nivel estructural, mecánico y a su vez se determinó su desempeño al desgaste por contacto deslizante y su capacidad protectora frente a la corrosión. Los recubrimientos de Al_2O_3 -13 % en peso de TiO_2 elaborados a partir de materias primas comerciales (AT13C) y peletizadas en el laboratorio (AT13P), muestran una alta resistencia al desgaste por contacto deslizante. De igual manera se encontró que su capacidad de protección frente a la corrosión aumenta con el tiempo de exposición de los recubrimientos al electrolito.

Este proyecto es un antecedente ya que la metodología que poseen es útil para el desarrollo del actual trabajo, esta metodología presenta la caracterización de los polvos para usarlos como recubrimiento, contiene información pertinente sobre el proceso de proyección térmica por llama oxiacetilénica, y se presentan los pasos y mecanismos utilizados para la caracterización mecánica y tribológica del material recubierto, así también se evidencia la aplicación y el valor agregado que aporta el recubrimiento mediante la evaluación de los resultados.

Peña Rodríguez, G., Dulce Moreno, J., & Vargas Galvis, F. (2017). Recubrimientos de TiO₂ sobre sustratos de arcilla roja usando proyección térmica oxiacetilénica. 38(1), 2244-7113.

En este trabajo se reporta la estructura, resistencia mecánica a la flexión, resistencia por abrasión profunda, rugosidad Ra y adherencia de recubrimientos de TiO₂ (Sulzer Metco 102) sobre sustratos cerámicos de arcilla roja, mediante la técnica de proyección térmica oxiacetilénica. Los sustratos se elaboraron con polvos de arcilla roja atomizada, usando proceso de prensado uniaxial a 26,2 bares y sinterizados a 1100 °C. Se crecieron recubrimientos de TiO₂, con 5, 9 y 14 pases o ciclos de la llama oxiacetilénica sobre el sustrato. Por otro lado, la estructura se estudió usando Difracción de Rayos X (DRX, Bruker D8 Advance) y microscopia electrónica de barrido (MEB, FEI Quanta FG 650); la resistencia mecánica a la flexión y el desgaste por abrasión profunda fueron determinados usando las norma ISO 10545-4 e ISO10545-6 respectivamente; la adherencia fue medida usando el equipo Elcometer Tipo III según norma ASTM D-4541-02 y la rugosidad media (Ra) se halló según la norma ASTM D7127-13, mediante el rugosímetro Mitutoyo SJ201. Los resultados reportaron que la fase mayoritaria formada del TiO₂ fue Rutilo, con una morfología superficial heterogénea de splats fundidos, con una Ra de $4,7 \pm 1,1 \mu\text{m}$ para el sustrato, la cual aumentó hasta un 22,6 % para la muestra recubierta de mayor espesor.

Este trabajo se toma como antecedente ya que se evidencia la optimización de las propiedades del sustrato de arcilla roja al ser recubierto, así como las posibles aplicaciones que este nuevo material otorga. Además, este trabajo presenta la metodología de una investigación científica en la cual se reportan herramientas, ensayos y normas que se utilizarán para la ejecución del trabajo. Por otro lado, contiene referencias que servirán de apoyo para el desarrollo de la investigación.

Araque, M., Peña, G., & Vargas, F. (2015). Desempeño mecánico y tribológico de baldosas cerámicas de arcilla roja recubiertas por proyección térmica a partir de alúmina. Tecno Lógicas, 18(35), 125-135.

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación y la resistencia a la flexión y al desgaste por abrasión profunda de baldosas cerámicas de arcilla roja con y sin recubrimiento de Al_2O_3 , depositados mediante proyección térmica oxiacetilénica. Las cerámicas se elaboran por prensado uniaxial a 30 bares con posterior tratamiento de sinterización a 1100°C , a partir de polvos atomizados de arcilla roja. Además, los recubrimientos se elaboran a partir de polvos de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ de referencia comercial Sulzer Metco® 105SFP, los cuales se depositan para obtener tres espesores diferentes.

La resistencia a la flexión y a la abrasión profunda se evaluaron de acuerdo con las normas ISO 10545-4 e ISO 10545-6 respectivamente. Finalmente, los resultados indican que la abrasión profunda de las baldosas cerámicas disminuyó al incrementarse el espesor de la capa de alúmina depositada. Por otra parte, los recubrimientos de alúmina incrementaron entre un 5 y un 49% la resistencia mecánica a la flexión de las baldosas de arcilla de acuerdo con el espesor y la adherencia de la capa al sustrato.

Este antecedente presenta la metodología utilizada en un proyecto científico, con enfoque en recubrimientos sobre sustratos cerámicos mediante proyección térmica por llama

oxiacetilénica, en el que los resultados aportan un valor agregado a los cerámicos para ser utilizados en múltiples aplicaciones tecnológicas. Con esta investigación se conocen fundamentos teóricos de la técnica, así como la influencia de los parámetros y de los ciclos de recubrimiento sobre las propiedades mecánicas del material, así también se ilustra la metodología que se lleva a cabo para realizar el ensayo de flexión con el fin de definir mecánicamente el material.

Ferrer , M., Moreno, m., vargas, f., peña, g., vera, e., & pineda, y. (2014). Depósito y caracterización de recubrimientos cerámicos de al_2o_3 sobre acero 1020 por termorrociado. revista colombiana de materiales(5), 317-322.

En esta investigación, se determinaron los parámetros necesarios para la elaboración de recubrimientos de, sobre aceros AISI 1020, utilizando como mecanismo de anclaje entre el sustrato y el cerámico una aleación a base de Ni, los polvos utilizados fueron comerciales y el método de deposición por aspersion con llama oxiacetilénica. Los revestimientos se analizaron por EDS (espectroscopia de dispersión de energías, SEM (microscopía electrónica de barrido), OM (microscopía óptica), la adherencia se cuantificó bajo la norma ASTM C633-08. Los parámetros obtenidos para la proyección de Ni son apropiados ya que producen recubrimientos uniformes con baja porosidad cerrada. Los parámetros para la proyección de la alúmina deben revisarse ya que el recubrimiento obtenido es poco uniforme, poroso y de espesor irregular, esto se debe al alto punto de fusión de la alúmina y a la amplia distribución en la granulometría del polvo. Las pruebas de adhesión dejan ver una buena adhesión entre el sustrato y la aleación de Ni, pero se observa una falla adhesiva entre la alúmina y la capa de Ni.

Este antecedente tiene relevancia para el proyecto de investigación debido a que en su metodología desarrollan recubrimientos mediante la técnica de proyección por llama oxiacetilénica, lo cual aporta información sobre dicho proceso, así como otras metodologías como la de Microscopia electrónica de barrido(MEB) y difracción de rayos X (DRX) utilizadas

para la caracterización de los polvos, lo cual servirá como apoyo para la elaboración de la caracterización morfológica y estructural de los recubrimientos de magnetita en este trabajo de investigación y en la definición de los parámetros de proyección.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Magnetita

La magnetita forma parte de un grupo de minerales llamados óxidos, también se conoce como óxido de hierro negro, mineral de hierro magnético, piedra de carga o ferrita (Cornell & Schwertmann, *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, 2003). El nombre de este mineral proviene de una región griega llamada Magnesia (Lima, 1999).

Generalmente, la magnetita natural se encuentra en rocas sedimentarias como partículas finas con una dureza de 5.5 a 6.5 en la escala de Mohs (Ghazanfari, Kashefi, Shams, Shams, & Jaafari, 2016). Además, se halla diseminada como un mineral asociado con la mayoría de rocas ígneas, así mismo suele estar relacionada con rocas metamórficas cristalinas formadas de rocas sedimentarias ricas en hierro, también como dendritas entre placas de mica y es un contribuyente de las arenas de ríos, lagos y playas oceánicas (Castaño & Arroyave, 1998). Por tanto, es un mineral que abunda en la naturaleza.

La magnetita es un mineral de hierro cuya fórmula química es Fe_3O_4 que pertenece al grupo de las espinelas. Está constituido por un óxido mixto de Fe^{2+} y Fe^{3+} , de tal manera que se puede escribir como FeFe_2O_4 (Besoain, 1985). En la figura 1, se muestra la estructura cristalográfica de la magnetita. La magnetita según Castaño & Arroyave (1998):

De fórmula general AB_2O_4 , es ferrimagnética y semiconductor. El oxígeno forma la red cúbica de caras centradas, deja 32 espacios octaédricos y 64 tetraédricos; los octaédricos están ocupados por Fe^{2+} y Fe^{3+} , y los tetraédricos por Fe^{3+} . El hierro supone el 72,4 % y el

oxígeno el 27,6 % en masa. A temperatura elevada puede cambiar ligeramente debido a que la red puede aceptar un exceso de iones trivalentes. Los iones ferrosos y férricos de las posiciones octaédricas comparten los electrones de valencia, lo que permite que sea un compuesto frecuentemente no estequiométrico y de elevada conductividad eléctrica (pág. 274).

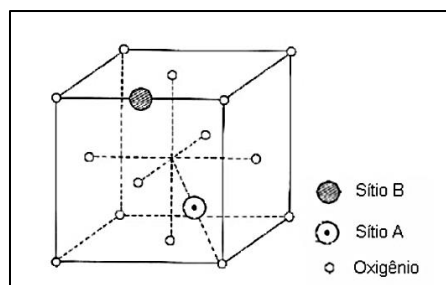


Figura 1. Estructura cristalográfica de la magnetita. Sitio A corresponde de la coordinación de Fe⁺³ Tetraédrico T y el Sitio B a la Simetría de la coordinación Fe⁺³ y Fe⁺² octaédricos (O) coordinados por átomos de oxígeno en la estructura ferrimagnética.

Fuente: Tebble, R., & Craik, D. (1969). *Magnetic Materials*. London: Wiley-Interscience.

La magnetita está caracterizada por dos temperaturas principales, el punto de Curie y la transición de Verwey. Al aumentar la temperatura la magnetización de saturación disminuye gradualmente hasta descender a cero a la llamada temperatura de Curie (T_c) (Posada, 2015). La magnetita es ferrimagnética a temperatura ambiente y tiene una temperatura de Curie de 850 K (Cornell & Schwertmann, *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, 2003). Por encima de la temperatura de Curie el óxido muestra un comportamiento paramagnético. A temperaturas superiores a la temperatura de Verwey ≈ 120 K los electrones en los sitios octaédricos de la magnetita se encuentran térmicamente localizados entre los cationes Fe^{3+} y Fe^{2+} . En comparación con otros óxidos de características similares, esta es la causa del aumento de la conductividad eléctrica y la conductividad térmica. Debido a este hecho, la magnetita es la única ferrita que presenta un comportamiento semimetálico (Noval, Ochoa Puentes, & Carriazo, 2017).

La magnetita se identifica por el magnetismo más fuerte de todos los óxidos de metales de transición, por lo que se considera un mineral con excelentes propiedades magnéticas y mecánicas (Ferrazzo, Bragagnolo, & Korf, 2020). En la tabla 1, se pueden apreciar las propiedades físicas, químicas y cristalográficas de la magnetita. Por otra parte, debido a su estructura de espinela inversa la magnetita presenta una elevada magnetización espontánea de 480 kA/m, la cual hace referencia a la capacidad que tienen los materiales ferro y ferrimagnéticos de poseer una importante magnetización incluso en ausencia de un campo magnético aplicado externo, esta magnetización también se denomina remanente (M_r). Este valor hace de la magnetita el mineral más magnético que se encuentra en la naturaleza, teniendo además los mayores valores de susceptibilidad magnética ($K \approx 1-10$ SI) (Posada, 2015).

Tabla 1.

Propiedades físicas, químicas y cristalográficas de la Magnetita.

Propiedades físicas, químicas y cristalográficas	
Sistema cristalino	Isométrico (Ver figura 2)
Brillo	Metálico
Color	Negro
Dureza (escala de Mohs)	6,0
Fractura	Subconcooidal
Transparencia	Opaca
Densidad	5,18 g/cm ³
Hábito	Cristales generalmente octaédricos, raramente dodecaédricos, también granular sólido, de grueso a fino.
Dash	Negro
Clase	Óxido
Composición	Óxido de Hierro
Formula química	Fe ₃ O ₄ - 69% Fe ₂ O ₃ y 31% FeO
Elementos químicos	hierro (72,40%) y oxígeno (27,60%)

Fuente: Autores, adaptación de (Weschler, Lindsley, & Prewitt, 1984)

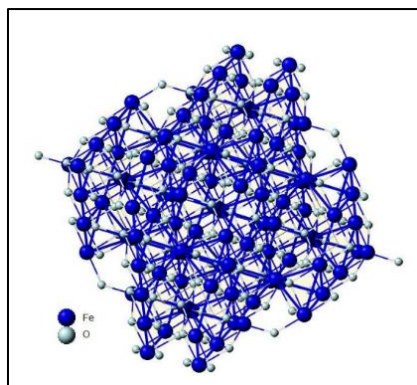


Figura 2. Estructura de magnetita, sistema de cristal isométrico.

Fuente: Weschler, B., Lindsley, D., & Prewitt, C. (1984). Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$) (Vol. 69). American Mineralogist.

Según Gonzales & Fajardo (2017):

Las aplicaciones de la magnetita se dan en varios campos dentro de las cuales se consideran las siguientes: En la medicina, la magnetita es utilizada en la administración de fármacos, tratamientos de hipertermia y la resonancia magnética. En el campo de las aplicaciones tecnológicas la magnetita es utilizada en la fabricación y adecuación de dispositivos de sonido como bocinas, parlantes o elementos que presenten vibración y transformación de impulsos eléctricos en ondas sonoras. También es utilizada en componentes de amortiguamiento de motores, dispositivos de almacenamiento de información, nano-etiquetado y en los ferrofluidos. En la ecología y ciencias medioambientales la magnetita se emplea en la eliminación de los iones pesados tales como el arsénico en los procesos de purificación del agua (pág. 18).

2.2.2 Proyección térmica por llama.

Davis (2004) afirma. “La pulverización térmica ha sido asociada históricamente como el proceso para la aplicación de revestimientos gruesos cuyas propiedades del material a granel permiten que el sustrato funcione de manera superior a las capacidades de su estado sin

recubrimiento” (pág. 29). Este proceso fue patentado por MU Schoop (Zúrich, Suiza) en 1882, cuando intentó modificar el soplete de oxígeno-acetileno, y luego modificó el soplete para que aceptara materiales en polvo (Ružić, Vilotijević, Božić, & Raić, 2012) . Posteriormente, se realizaron mejoras en estos procesos, sin embargo, esto sucedió después de la Segunda Guerra Mundial, especialmente durante el período de 1960 a 1990, cuando comenzó a ser ampliamente utilizado en diversas industrias (Davis J. , 2004).

La diferencia entre los distintos sistemas de proyección térmica se basa en la fuente de energía utilizada y el tipo de pistola empleada (Grainger & Blunt, 1998).

Los procesos de pulverización térmica se diferencian de otros procesos de revestimiento en que no son atómicos; es decir, no depositan material en las superficies como iones, átomos o moléculas individuales. En su lugar, se depositan partículas relativamente masivas sobre una superficie en forma de gotas de líquido o partículas semi líquidas o sólidas (Davis J. , 2004, pág. 44).

La proyección térmica por llama es una de las técnicas que se basa en la proyección de partículas sobre sustratos debidamente preparados, estas partículas son impulsadas por un flujo de aire a través una llama oxiacetilénica que proporciona energía para el proceso (Acuña , Moreno , & Espinosa, 2017). De esta manera, el material de aportación que es en forma de polvo se funde en una llama de Acetileno/Oxígeno y con la ayuda de los gases de combustión en expansión es lanzado sobre la superficie de la pieza a tratar (Abello Linde, 2002). Estos recubrimientos brindan la capacidad de mejorar el rendimiento del material, maximizando así la disponibilidad del servicio (Acuña , Moreno , & Espinosa, 2017).

El combustible que alcanza la temperatura de combustión más alta es el acetileno, el cual se utiliza para producir revestimientos cerámicos, su eficiencia energética, se atribuye a la energía liberada de la reacción durante el proceso de combustión del oxígeno (entalpía, 8714 kJ /

kg por C_2H_2) (Vargas Galvis, 2010). En la figura 3, se presenta un esquema de los diferentes pasos involucrados en el proceso de proyección térmica, donde se aprecia el movimiento de las partículas del material de partida a depositar, en este caso, la energía cinética y la energía térmica aumentan al pasar por la llama, provocando la fusión de las partículas en la superficie del sustrato que se adhieren mecánicamente debido a su rugosidad y porosidad (Davis J. , 2004).

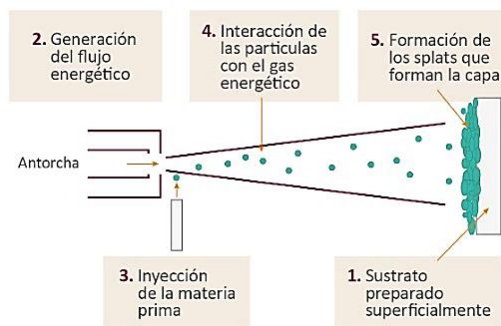


Figura 3. Esquema de los diferentes pasos involucrados en el proceso de proyección térmica.

Fuente: Ferrer Pacheco, M., Moreno Téllez, C., & Vargas Galvis, F. (2018). Recubrimientos de circonita y alúmina por proyección térmica con llama: parámetros para obtener recubrimientos de alto punto de fusión. Tunja: UPTC.

A continuación, se observan algunos elementos principales del proceso (ver figura 4).

El primero es el llamado “fuente de energía”, que corresponde a los gases necesarios para la fusión y el transporte del material que ha de servir como recubrimiento, dichos gases son oxígeno (O_2) y acetileno (C_2H_2); seguidamente se tiene el “material a depositar”, es decir, los micropolvos, los cuales pueden ser metálicos, cerámicos, poliméricos o compuestos; a su vez también se aprecia el “sistema de proyección”, que se encarga de suministrar la energía de la fuente en forma de calor (flama), donde se incorporan y funde el polvo a depositar, y por último el “sustrato”, que corresponde al material donde se aloja el recubrimiento, y el cual debe ser previamente preparado, de forma que permita la adhesión de las partículas del recubrimiento (Manish, 2015).

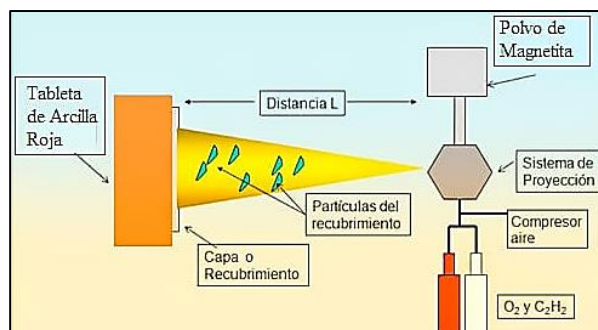
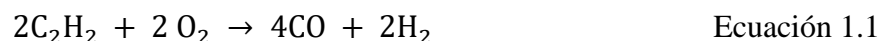


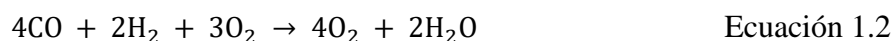
Figura 4. Diagrama experimental del proceso de proyección térmica.

Fuente: Adaptación de Davis, J. (2004). Handbook of Thermal Spray Technology. Ohio: ASM International.

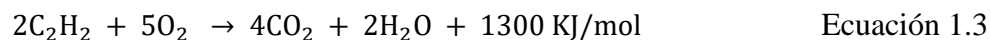
Es importante caracterizar la llama producida por la antorcha en que se realizará el depósito de los recubrimientos, para asegurar las mejores condiciones para cada material, ya que el desempeño del recubrimiento depende del grado de fusión de las partículas (González , 2008). La reacción de combustión entre el acetileno y el oxígeno ocurre en dos etapas. En la primera se produce una reacción incompleta entre cantidades equimolares de oxígeno y acetileno, produciendo monóxido de carbono e hidrógeno, como se indica en la Ecuación 1.1.



La segunda etapa de la reacción ocurre cuando el hidrógeno entra en contacto con el oxígeno del aire presente en el ambiente. Los productos de esta reacción son dióxido de carbono y vapor de agua, como se observa en la Ecuación 1.2.



La reacción total de combustión corresponde entonces a la transformación completa de carbono en dióxido de carbono y de hidrógeno en agua, como se indica en la Ecuación 1.3.



Conforme a lo expuesto anteriormente, en la llama de combustión se pueden identificar tres zonas (Figura 5-5b): la zona de mezcla de gases donde se mezcla el oxígeno con el acetileno y presenta un aspecto de cono incandescente, en esta zona no hay reacción química. Se aprecia en la figura 5-5b con el número 1. En la zona primaria, se produce la reacción primaria de

combustión (Ecuación 1.1) y presenta un cono de color azul con una temperatura aproximada de 3200 °C, siendo la zona más caliente de la llama. Esta se evidencia en la Figura 5-5b con el número 2. Finalmente, la zona secundaria, presenta forma de penacho, producto de la reacción del hidrógeno con el oxígeno circundante a la llama primaria, es la zona más fría de la llama y la menos luminosa. Está representada en la Figura 5-5b con el número 3 (Vargas Galvis, 2010).

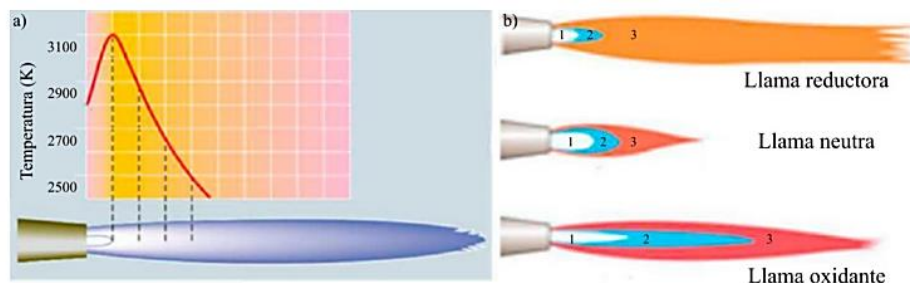


Figura 5. a) Comportamiento térmico de las llamas de combustión entre el oxígeno y el acetileno distribución de temperatura en las zonas de la llama, b) Tipos de llama.

Fuente: Cadavid, E., Parra, C., & Vargas, F. (2017). Estudio termo-físico de llamas oxiacetilénicas utilizadas en la proyección térmica. *Revista Colombiana De Materiales*.

La estructura de los recubrimientos por pulverización térmica es laminar y está formada por "splats", que son partículas aplanadas por el impacto con la superficie y luego enfriadas rápidamente (Davis J. , 2004). En la figura 6, se observa una sección transversal típica de un recubrimiento elaborado por proyección térmica por flama, en la cual se aprecia el sustrato con su rugosidad, luego la formación de los "splats" de partículas fundidas y semi-fundidas, adhiriéndose unas con otras para formar el recubrimiento. En la estructura de los recubrimientos debido a la evaporación de los gases durante el enfriamiento se crean micro-grietas, poros y formación de óxidos (Fauchais, Heberlein, & Boulos , 2014).

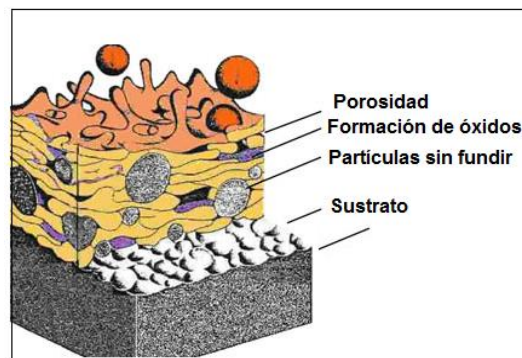


Figura 6. Sección transversal de un recubrimiento por proyección térmica oxiacetilénica.

Fuente: Fauchais, P., Heberlein, J., & Boulos, M. (2014). *Thermal Spray Fundamentals From Powder to Part*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. doi:10.1007/978-0-387-68991-3

La proyección térmica por llama oxiacetilénica contiene diversas ventajas entre las cuales cabe destacar que permite cubrir grandes superficies y diversas formas geométricas, lo cual es un método efectivo y de bajo costo. Es una técnica versátil y de gran disponibilidad de un buen número de materiales a depositar, lo que permite aplicar recubrimientos de composición química variada, sobre sustratos de diferentes tamaño y formas (González, 2008). Además, se obtienen capas finas de recubrimiento y el sustrato no sufre modificaciones en su forma. Los procesos son flexibles en cuanto a su posición de operación y el medio en el que se aplica, de igual forma son fácilmente reproducibles y automatizables (Piedra, 2007).

2.2.2.1 Equipo y parámetros de la proyección térmica por llama.

En la pulverización por llama oxiacetilénica el polvo se alimenta, con una simple tolva de polvo o con un alimentador de polvo más sofisticado, a través de un orificio central de la boquilla donde es calentado por la llama de oxicorte y llevado por el gas portador y el gas caliente al sustrato (Fauchais, Heberlein, & Boulos, 2014). La proyección térmica por llama se puede llevar a cabo de formas, manual o automatizada, como se observa en la figura 7. Según Cárdenas y Fuentes:

El equipo de la proyección por llama consta de una fuente de calor que es una llama proveniente de la mezcla de gas combustible y oxígeno, adicionalmente emplea un alimentador de polvos, éste a su vez es almacenado en una tolva en la parte superior de la antorcha, el cual es proyectado dentro de la llama por una cantidad pequeña de oxígeno, que es separada del suministro de gas (Cardenas Flechas & Fuentes Mojica, 2014, pág. 21).

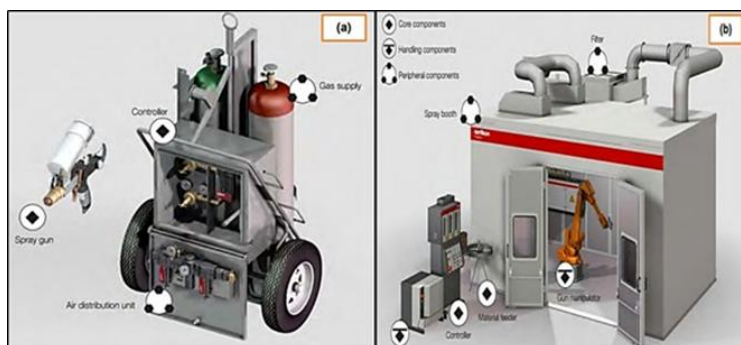


Figura 7. Equipamiento de proyección térmica por llama utilizando (a) de manejo manual y (b) automatizado.

Fuente: Oerlikon Metco. (2014). Thermal Spray Equipment Guide, (october).

El precursor en polvo se inyecta en las proximidades de la boquilla de la pistola de llama, para formar un penacho y luego se expulsa de la llama. Dentro de la llama, las partículas del precursor pueden alcanzar una temperatura lo suficientemente alta como para sufrir transformaciones químicas, estructurales y morfológicas (Saucedo Salazar, Perera Mercado, Rodriguez Ruiz, & Arauza Villareal, 2014). En la figura 8, Se presenta un esquema de una antorcha de llama utilizada en un proceso de proyección térmica por llama oxiacetilénica. “Los sopletes oxiacetilénicos son los más comunes, ya que utilizan acetileno como combustible principal en combinación con oxígeno para generar las mayores temperaturas de combustión” (Davis J. , 2004, pág. 54).

Los recubrimientos obtenidos por proyección térmica por llama dependen de varios factores entre los cuales destacan: la morfología y composición química de los polvos, el tipo de llama y el flujo de alimentación de los polvos (Araque, Peña, & Vargas, 2015). En cuanto a la antorcha, hay que tener en cuenta el diámetro de la boquilla, composición y flujo de los gases.

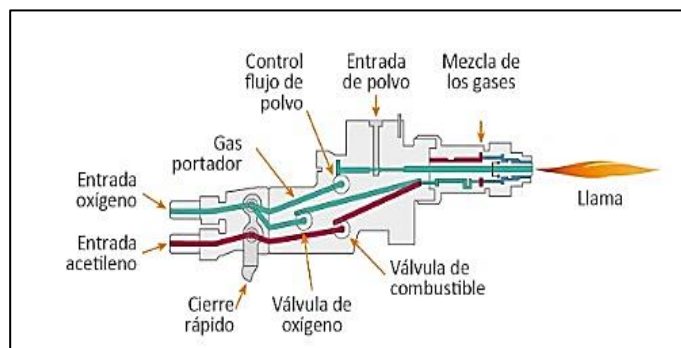


Figura 8 Esquema de una antorcha de llama.

Fuente: Ferrer Pacheco, M., Moreno Téllez, C., & Vargas Galvis, F. (2018). Recubrimientos de circona y alúmina por proyección térmica con llama: parámetros para obtener recubrimientos de alto punto de fusión. Tunja: UPTC.

Respecto al sustrato se deben considerar, la rugosidad, la temperatura de precalentamiento, su coeficiente de dilatación térmica y las propiedades físicas. En cuanto a la corriente de proyección se debe tener en cuenta el perfil de temperatura, velocidad de la corriente, distancia de proyección y el ambiente (González, 2008).

Esta técnica requiere de un control riguroso de las principales variables del proceso de proyección térmica mencionadas anteriormente, de tal forma que se puedan controlar las características del recubrimiento obtenido (Torres, Moreno, Pinto, Cárdenas, & Fuentes, 2016). Algunos de los parámetros generales del proceso están estimados los cuales, Pawlowski (2008) afirma que:

La relación oxígeno-combustible puede variar de 1:1 a 1,1:1, lo que da lugar a una atmósfera carburante u oxidante respectivamente. Las temperaturas de la llama oscilan

entre 3000 y 3350 K. La velocidad de la llama oscila entre 80 y 100 m/s. Los caudales y presiones de los gases de trabajo dependen del tipo de soplete. (pág. 71).

2.2.3 Microscopia electrónica de barrido.

“La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una técnica de obtención de imágenes ampliamente utilizada en investigación de materiales debido a su alta resolución y capacidades de analizar características morfológicas, estructurales y químicas de las muestras bajo estudio” (Clavijo, 2013, pág. 133). Además de determinar la composición química, es posible conocer las características más detalladas de un material, el microscopio electrónico de barrido proporciona información valiosa sobre la morfología de las partículas, se basa en el uso de un haz de electrones que incide sobre una muestra que al entrar en contacto se emitirán diferentes señales que son: electrones secundarios, electrones retro-dispersados, ambas proporcionan la imagen de la muestra (Ordóñez & Sánchez, 2018).

En términos generales, el equipo MEB puede tomar "imágenes" de la muestra, aunque en realidad detecta la respuesta del material al impacto de un haz de electrones en lugar de registrar fotones propiamente dichos (como un microscopio óptico). Cuando es golpeada por un haz de electrones de alta energía, la muestra genera una serie de señales, que se registran en diferentes detectores del dispositivo, cada uno de los cuales proporciona de forma independiente información sobre la morfología, composición e incluso conductividad de la muestra (Clavijo, 2013). El funcionamiento de dispositivos de este tipo, se basa en hacer incidir un barrido de electrones sobre una muestra a analizar (Gonzalez Cano & Fajardo Tolosa, 2017). (Ver Figura 9).

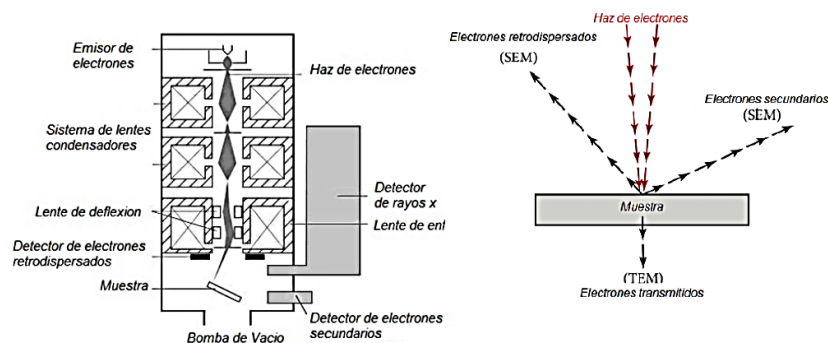


Figura 9. a) Componentes más importantes del microscopio electrónico de barrido b) las interacciones que se dan entre el haz de electrones y la muestra analizada.

Fuente: Heiman, R. (2010). *Classic and Advanced Ceramics*. Weinheim, Germany: Wiley - VCH Verlag.

2.2.3.1 Espectro de Dispersión de Energía (EDS).

La espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS), es uno de los métodos analíticos más utilizados para analizar la composición elemental de materiales sólidos, el cual ha adquirido importancia recientemente en su aplicación al análisis químico de nanopartículas, especialmente en combinación con el uso de un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Hodoroaba, 2019). En la figura 10, se aprecia un ejemplo del resultado de las simulaciones de Monte-Carlo de los espectros EDS realizados para una partícula esférica de SiO_2 de dos tamaños, 100 y 500 nm, situada en un sustrato de sustrato de titanio.

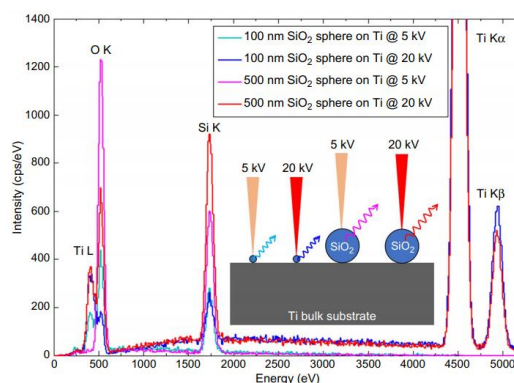


Figura 10. Espectros EDS simulados de Monte-Carlo de una nanopartícula esférica de 100 y 500 nm de SiO_2 sobre un sustrato de titanio, excitada a una tensión de haz de 5 y 20 kV

Fuente: Hodoroaba, V. (2019). *Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS). Caracterización de nanopartículas: procesos de medición de nanopartículas*, 397–417.

Los rayos X son fotones de alta energía, que se generan por las transiciones electrónicas en los átomos de un sólido objetivo por un haz de electrones acelerado incidente. Generalmente, los electrones incidentes chocan con los átomos de la muestra y eliminan un electrón de la capa K del metal (capa $n=1$), dejando un vacío o un agujero en la capa. Si un electrón de otra capa llena la vacante (transición electrónica), se emiten rayos X. La transición electrónica que llega a la capa K ($n=1$) se llama rayos KX las de la capa L ($n=2$) son rayos LX y las de la capa M ($n=3$) son los rayos MX. Estas transiciones son características de cada elemento químico y ésta es la razón principal que ha llevado al desarrollo de los sistemas de detección EDS en microscopía electrónica ampliando sus aplicaciones en la caracterización de la microestructura de materiales (Girão, Caputo, & Ferro, 2017).

2.2.4 Difracción de rayos X.

Esta técnica experimental hace uso del fenómeno de difracción de rayos X, que penetra en materiales cristalinos sin destruirlos, para obtener información estructural de estos (Gonzalez Cano & Fajardo Tolosa, 2017). Esta técnica analiza las intensidades de los picos obtenidos en un difractograma y les asigna un ángulo de rotación a cada uno de ellos, determinando así las características estructurales del sólido, la disposición de los átomos en la red cristalina y las distancias entre los planos de la red (Rodriguez, 2011).

Las estructuras cristalinas de sólidos cristalinos pueden determinarse mediante análisis de difracción de rayos X utilizando difractómetros. Los rayos X son difractados por los cristales cuando se cumplen las condiciones de la ley de Bragg (Cañon, 2015). La difracción es un fenómeno de dispersión, los átomos dispersan la radiación incidente en todas las direcciones, y en algunas direcciones los rayos dispersados están completamente en fase y se refuerzan mutuamente, lo que genera este fenómeno de difracción, obteniendo rayos difractados según la

composición de la red cristalina y la separación entre planos de átomos (Ver figura 11). Cuando la diferencia de fase es igual a un número entero de n longitudes de onda, los rayos dispersados estarán completamente en fase. Esta relación se conoce como ley de Bragg, y se establece por medio de la Ecuación 2:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde n es el índice de refracción del material, λ es la longitud de onda característica para un elemento atómico. (Rodríguez, 2011).

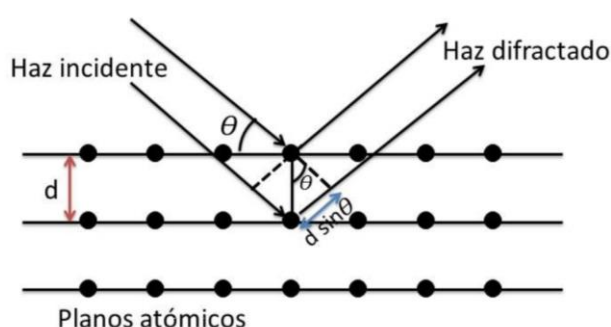


Figura 11. Ley de Bragg.

Fuente: Cornelis, K., & Cornelius, S. (1996). Manual de mineralogía (cuarta edición ed., Vol. 1). reverté.

2.2.5 Ensayo de resistencia mecánica a la flexión.

“Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras” (Facultad Tecnológica laboratorios y talleres de mecánica, 2016, pág. 1). El ensayo de flexión se aplica a una fuerza una fuerza estática que se incrementa hasta la fractura, La resistencia a la flexión de los materiales cerámicos puede medirse mediante el ensayo de flexión en tres puntos o el ensayo de flexión biaxial, se carga simétricamente entre dichos apoyos el cuerpo de ensayo con un punzón. La zona de estrés en el cuerpo de ensayo no es homogénea, sino que presenta un máximo directamente bajo el punzón (Fischer, Stawarczyk, & Hämmerle, 2009). (ver figura 12).

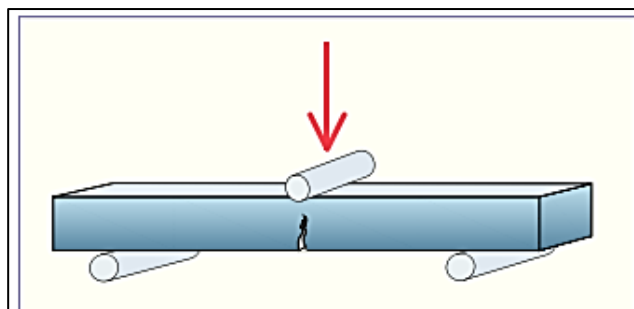


Figura 12. Representación esquemática del ensayo de flexión en tres puntos.

Fuente: Fischer, J., Stawarczyk, B., & Hämmerle, C. (2009). Investigación. Cerámicas de recubrimiento. *Quintessence técnica*, 20(8), 446-453.

2.2.6 Ensayo de resistencia a la abrasión profunda.

El ensayo de resistencia a la abrasión profunda se realiza bajo la norma NTC. 4321-6, en el cual se determina la resistencia a la abrasión de baldosas no esmaltadas, mediante la rotación de una carga abrasiva. En la Figura 13 se presenta un esquema de dicho proceso, el cual se basa en realizar huellas a la superficie de la muestra con un disco de acero ($d=200,0$ mm de diámetro, $h=10,0$ mm de espesor, 75,0 rpm), y polvo abrasivo de alúmina grado F80, el cual cae a razón de 1 gramo por vuelta, durante 2 minutos. Finalmente, se mide la longitud (L) de la huella y se determina el volumen (V) en mm^3 del material desprendido usando las expresiones que se muestran en la Figura 13 (Araque, Peña, & Vargas, 2015).

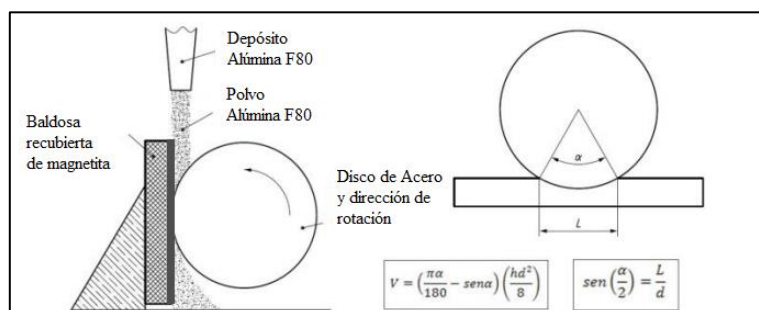


Figura 13. Diagrama experimental de la prueba de resistencia a la abrasión profunda.

Fuente: Autores, adaptación Araque, M., Peña, G., & Vargas, F. (2015). Desempeño mecánico y tribológico de baldosas cerámicas de arcilla roja recubiertas por proyección térmica a partir de alúmina. *Tecno Lógicas*, 18(35), 125-135.

2.2.7 Funcionamiento del C-Therm TCI.

El C-therm TCI se fundamenta en la técnica de fuente de plano transitorio modificado (MTPS). Utiliza un sensor de calor interfacial unilateral que emplea una fuente de calor constante momentáneamente a la muestra. La conductividad y la efusividad térmicas se miden directamente, proporcionando detalles de las características térmicas del material. Por otra parte, para que existan mediciones precisas se requiere que la superficie del sensor y el material probado tenga calidad en el contacto (C-therm Technologies).

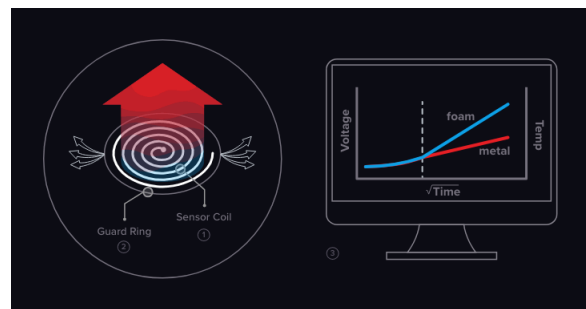


Figura 14. Principios de Operación del C-therm.

Fuente: C-Therm Technologies Ltd. (2021). Tridente. 1 instrumento, 3 métodos de conductividad térmica. Recuperado el 2 de mayo de 2021, de C-therm: <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/trident/>

El principio de operación es el siguiente.

1. Se aplica una corriente determinada al elemento calefactor en espiral del sensor, para que se genere una pequeña cantidad de calor.
2. Un anillo de protección rodea la bobina del sensor para soportar una transferencia de calor unidimensional en la muestra. La corriente aplicada genera un aumento de temperatura en la interfaz entre el sensor y la muestra, lo que produce un cambio en la caída de voltaje del elemento sensor.
3. La tasa de aumento del voltaje del sensor se utiliza para definir las propiedades térmicas de la muestra. La conductividad térmica es inversamente proporcional a la tasa de

aumento de la temperatura en el punto de contacto entre el sensor y la muestra. (C-Therm Technologies Ltd, 2021).

2.2.8 Propiedades Estéticas.

Las propiedades estéticas y agradables de un producto son de gran importancia para crear motivación e interés para el cliente, puesto que existen productos competentes que pueden cumplir las mismas funciones básicas requeridas (Rosen, Eriksson, & Bergman, 2016). Las propiedades estéticas son un valor elusivo y difícilmente cuantificable por lo que no se puede objetivar, sin embargo, la calidad estética ha de ser compatible con el resto de requerimientos, como lo son las funcionalidad, economía, durabilidad, seguridad y respeto ambiental del producto (Quixal, 2005).

Las propiedades estéticas pueden definirse como la apariencia visual, la cual es el resultado de la interacción entre el objeto y la luz sobre él, estas son: el color, el cual es el resultado de la reflexión y absorción de la luz por parte del pigmento, el brillo que se produce por el reflejo de la luz en la superficie y por último, la textura que es un complemento de la apariencia visual debe tenerse en cuenta en la funcionalidad del material (Rosen, Eriksson, & Bergman, 2016).

2.2.9. Conductividad eléctrica.

Con las propiedades eléctricas es posible comprender el comportamiento fundamental de la materia y conocerlas es importante desde la perspectiva tecnológica, con el fin de desarrollar nuevos materiales. Por tanto, determinar la conductividad, es importante para explorar posibles aplicaciones (Girrotto & Santos, 2002), la conductividad eléctrica es la capacidad de permitir el paso de corriente eléctrica a través de sí, el flujo de electricidad a través de un conductor se debe a un transporte de electrones. De acuerdo a la ley de Ohm, cuando se mantiene

una diferencia de potencial, entre dos puntos de un conductor, por éste circula una corriente eléctrica directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia del conductor. (Conductividad eléctrica aspectos teóricos, 2014)

2.3 Marco conceptual

Abrasión. (1) Rechazo o arañazo. (2) Desgaste o molienda mediante el uso de abrasivos.

Acetileno. (C_2H_2). Gas hidrocarburo alifático no saturado que se utiliza como combustible en la pulverización de gases de combustión.

Estructura Cristalina. Ordenación periódica de sus átomos o iones a lo largo de las tres direcciones del espacio

Conductividad térmica. Es la propiedad física de cualquier material, que mide la capacidad de conducción del calor a través del mismo. Este es un mecanismo molecular de transferencia de calor, que se genera por la excitación de las moléculas. Se presenta en todos los estados de la materia, con predominancia en los sólidos. En mayor o menor medida, todos los materiales oponen resistencia al paso del calor a través de ellos (Davis J. , 2004).

Morfología. La forma característica, la textura de la superficie o los contornos de los revestimientos, los cristales, los granos o las partículas de un material, generalmente a escala microscópica (Davis J. , 2004).

Porosidad. Agujeros o poros finos dentro de un recubrimiento resultante de aire atrapado o encogimiento (Davis J. , 2004).

Resistencia a la abrasión. La capacidad de un material para resistir el desgaste superficial (Davis J. , 2004).

Resistividad térmica. La resistencia térmica es una propiedad del calor y una medida de la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material resiste un flujo de calor (Connor, 2020).

2.4 Marco contextual

El contexto de este proyecto de investigación se sitúa en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander, ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta, capital del Departamento Norte de Santander, Colombia. Cúcuta se encuentra en la parte centro oriental del departamento, en la Cordillera Oriental, limita por el Norte con el municipio de Tibú; por el Occidente con los municipios del Zulia y San Cayetano; por el Sur con los municipios de Villa del Rosario, Bochalema y Los Patios y por el Oriente la República de Venezuela y el municipio de Puerto Santander. El área del municipio de Cúcuta es de 1.176 km², que representan el 5,65% del departamento (Cámara de comercio de Cúcuta, s.f.).

Además, Cúcuta cuenta con una población de 749.197 habitantes, dato del año 2019 revelado en un informe por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Dane) (La Opinión, 2020). La Ciudad de Cúcuta junto con los demás municipios que conforman el área metropolitana, produce el 66% del producto Interno Bruto del Departamento. Existen empresas de manufactura (su fuerte son las confecciones, de cuero y de calzado) que representan el 85,35%, la Agrícola el 30% y la comercial el 90%. Así mismo, en el campo de la minería, la arcilla es un producto reconocido por su potencialidad en el municipio y la región (Corporación Nueva Sociedad de la Región Nororiental de Colombia, 2010).

2.5 Marco legal

NTC 4321-6:2015. Ingeniería civil y arquitectura. baldosas cerámicas. parte 6. método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión profunda en baldosa no esmaltadas.

Comité de normalización: 043 cerámicos, refractarios y piedras naturales no estructurales para uso en construcción

NTC 4321-4:2015: Ingeniería civil y arquitectura. Baldosas cerámicas. Parte 4: método de ensayo para determinar el módulo de rotura y la resistencia a la flexión. Define un método de ensayo para determinar el módulo de rotura y la resistencia a la flexión de todas las baldosas cerámicas.

Comité de normalización: 043 cerámicos, refractarios y piedras naturales no estructurales para uso en construcción.

NTC 4321-2:1998: Ingeniería civil y arquitectura. Baldosas cerámicas. Parte 2. Método de ensayo para determinar las dimensiones y la calidad superficial. Define métodos para determinar las características dimensionales (longitud, ancho, espesor, rectilinidad de los lados, ortogonalidad, planaria superficial) y la calidad superficial de las baldosas cerámicas.

Comité de normalización: 043 cerámicos, refractarios y piedras naturales no estructurales para uso en construcción.

Normas: ASTM D5334 – 14 y IEEE 442-1981, caracterización térmica con el equipo c-Therm.

3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

La investigación experimental consiste en someter a un grupo de individuos u objetos a variables independientes con el fin de observar las variables dependientes o las respuestas que se generan. Sólo cuando el investigador confirma que un cambio en la variable dependiente es atribuible a la manipulación de la variable independiente se considera exitosa. Por consiguiente, establecer la causa y efecto de un fenómeno es primordial en la investigación experimental (Guevara Alban, Verdesoto Arguello, & Castro Molina, 2020).

Según el diseño, el trabajo correspondió a una investigación exploratoria, debido a que se definieron las variables independientes o parámetros para la elaboración de los recubrimientos de magnetita mediante la técnica de proyección térmica por llama oxiacetilénica y de acuerdo a la variación de estos parámetros se evidenciaron los cambios en las propiedades de las tabletas metalizadas.

En la figura 15, se presenta el diagrama de bloque de las etapas del proyecto en el que se observan las cuatro etapas que se definen a continuación:

ETAPA I. Obtención de la materia prima y su caracterización. En esta primera etapa se desarrollaron las siguientes actividades: la obtención de las tabletas cerámicas sin recubrir, adquiridas de industrias de la región y los polvos de magnetita suministrados por la empresa Minarmol de Colombia S.A.S ubicada en Boyacá. Los polvos se tamizaron y se utilizó el retenido en tamiz No 400 para los ensayos y la elaboración de los recubrimientos, la caracterización morfológica de los polvos se realizó mediante Microscopia Electrónica de barrido (MEB) y Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS) y su caracterización estructural mediante

difracción de rayos X (DRX). Además, se caracterizaron morfológicamente las tabletas sin recubrir y se realizaron los ensayos de resistencia a la abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, y conductividad térmica.

ETAPA II. Realización de los recubrimientos. El proceso se llevó a cabo mediante la cámara de proyección térmica ubicada en la Universidad de Antioquia, en esta fase se elaboraron los recubrimientos a partir de los polvos de partida obtenidos en la etapa I, los cuales fueron proyectados usando antorcha de proyección térmica oxiacetilénica, conforme a los parámetros de proyección que se obtuvieron de las pruebas piloto realizadas.

ETAPA III. Caracterización de los sustratos recubiertos. En esta etapa se realizó la caracterización morfológica mediante Microscopia Electrónica de barrido (MEB), los ensayos de resistencia a la abrasión profunda, resistencia mecánica a la flexión, y conductividad térmica, y se determinó las propiedades estéticas mediante inspección visual de los sustratos recubiertos.

ETAPA IV. Análisis discusión y socialización de los resultados. Se compararon los resultados obtenidos para las tabletas recubiertas con los resultados de las tabletas sin recubrir y con los reportados en la literatura, adicionalmente se socializaron los resultados en congresos y participaciones del semillero GIFIMAC.

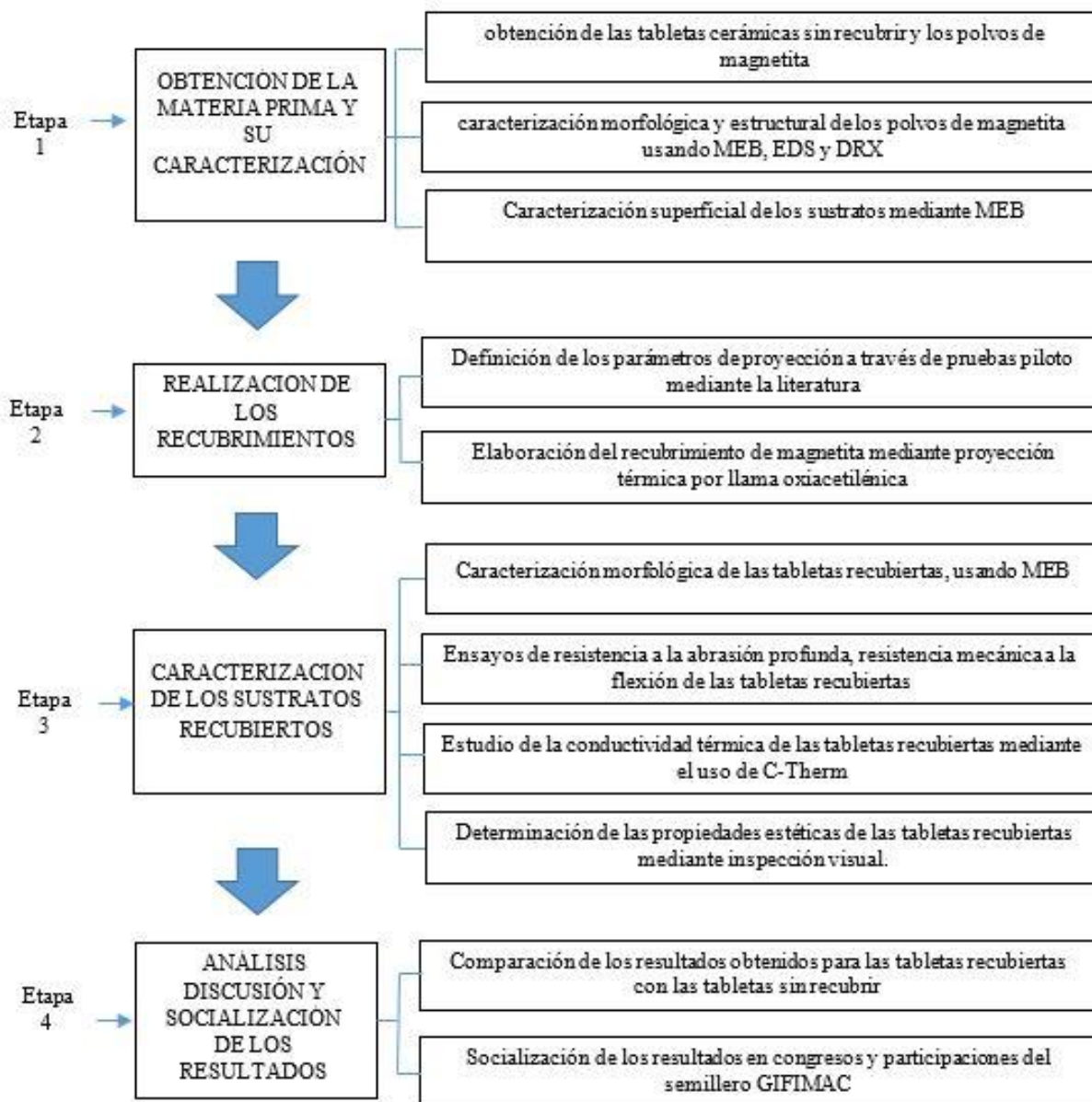


Figura 15. Etapas del Proyecto.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población.

Se consideró como población todos los recubrimientos metálicos sobre materiales cerámicos, realizados por diferentes técnicas.

3.2.2 Muestra.

La muestra se obtuvo a partir de los recubrimientos metálicos de polvo de magnetita elaborados mediante la técnica de proyección térmica por llama oxiacetilénica sobre sustratos de tabletas de arcilla roja sin recubrir.

Se seleccionaron 40 tabletas recubiertas con polvo de magnetita, 20 de ellas con cinco pases de proyección y las otra 20 con diez pases de proyección de polvo de magnetita, la cantidad de tabletas para la realización de los ensayos pertinentes para la caracterización de las cerámicas recubiertas se escogieron según las indicaciones de las normas.

3.3. Instrumentos para la recolección de la información

3.3.1 Fuentes Primarias.

Se tuvieron en cuenta los parámetros utilizados en el proceso del recubrimiento de las tabletas de arcilla roja con polvos de magnetita como fuente primaria, así como los datos obtenidos a través de las siguientes herramientas:

Dispersión de energías (EDS), para la caracterización química de los polvos de magnetita, microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos x (DRX) para la caracterización estructural y morfológica de los polvos de magnetita, así como para la caracterización morfológica de las tabletas recubiertas. Además, los ensayos de conductividad térmica, resistencia mecánica a la flexión y desgaste por abrasión profunda para la evaluación del comportamiento, térmico, mecánico y tribológico de las tabletas recubiertas.

3.3.2 Fuentes Secundarias.

Como fuentes secundarias se recopiló información complementaria sobre temáticas relacionadas con técnicas de recubrimientos por llama oxiacetilénica, artículos científicos y de

revisión provenientes de revistas, páginas web, entre otros. Así mismo, información secundaria, proveniente de los conocimientos transmitidos por el director y codirector del proyecto.

3.4 Análisis de la información.

Para el análisis de la información se utilizó el software de office-Excel y el Software libre ImageJ para el análisis de las imágenes de la microscopía electrónica de barrido. El efecto del número de pases se determinó mediante las variables respuesta, las cuales dependen de las propiedades que se determinaron, en este caso la abrasión profunda, resistencia a la flexión, conductividad térmica, y espesor de los recubrimientos. A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis comparativo para determinar la influencia de los recubrimientos de los polvos de magnetita en las propiedades tecnológicas de los sustratos cerámicos.

4. Materiales y métodos

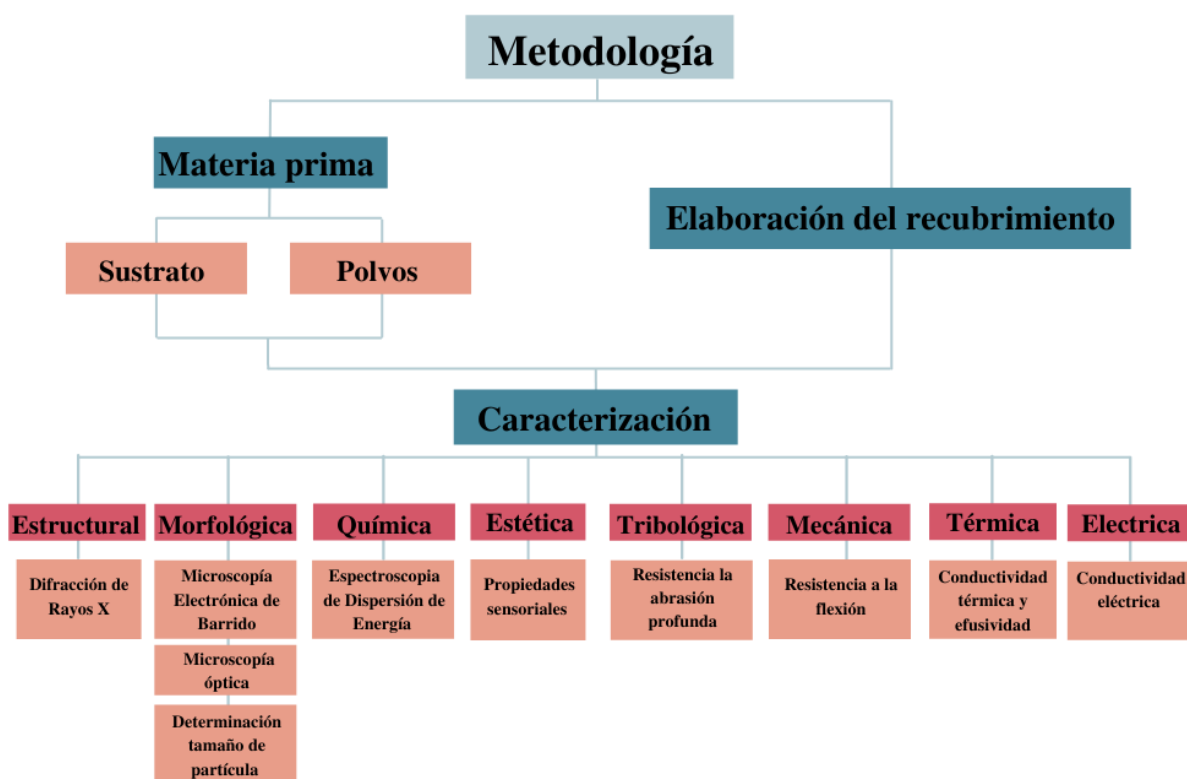


Figura 16. Esquema metodológico

4.1 Obtención de la materia prima

4.1.1 Sustrato.

El sustrato utilizado como se aprecia en la Figura 17, son tabletas cerámicas con dimensiones de 14 cm de largo, 5,5 cm de ancho y 0,7 cm de altura, suministradas por una empresa de la ciudad de Cúcuta, las cuales se elaboraron mediante el proceso de prensado a partir de pastas cerámicas atomizadas, y son usadas para la fabricación de cerámicas esmaltadas para piso o paredes.



Figura 17. Sustrato cerámico

4.1.2 Polvos de partida del recubrimiento.

La materia prima para la elaboración del recubrimiento de las tabletas corresponde al polvo de magnetita (Fe_3O_4), este mineral también se le conoce como óxido de hierro y se puede apreciar a simple vista como partículas sueltas muy finas de color negro el cual se muestra en la Figura 18, estos polvos fueron suministrados a través de la empresa Minarmol de Colombia S.A.S ubicada en Boyacá.



Figura 18. Polvo de magnetita

El proceso de tamizado se llevó a cabo usando el usando el sistema que se presenta en la Figura 19 a), donde se aprecia la base vibratoria y los respectivos tamices en la Figura 19 b), lo anterior se encuentra soportado por la norma ASTM C 117 – 95 y ASTM E-11-09. Para llevar a cabo el recubrimiento de magnetita se definió un tamaño de partícula menor a ($<45 \mu\text{m}$) con el

fin de evitar la presencia de aglomerados gruesos y la obtención de un recubrimiento con partículas parcialmente fundidas y con porosidades mayores, ya que las partículas mayores a 60 μm en la proyección térmica tienen mayor dificultad de fundirse en la llama (Davis J. , 2004). Por lo anterior, se utilizó para el recubrimiento el polvo pasante a la malla 325 (apertura 45 μm), posteriormente se secó en una estufa hasta masa constante con el objetivo de eliminar la humedad del polvo, buscando que este tuviera mayor grado de fluidez durante el proceso de elaboración de los recubrimientos por proyección térmica.



Figura 19. a) Sistema de tamizado y b) tamices

4.2 Elaboración de los recubrimientos mediante proyección térmica por llama

Para la elaboración de los recubrimientos se utilizó la cámara de proyección térmica ARESTE I desarrollada por el grupo GIPIMME de la Universidad de Antioquia (UdeA), con una antorcha para deposición Eutectic Castolin-Terodyn 2000, modificado con dosificador de polvo, la cual permitió controlar la cantidad de flujo del polvo requerida, adicionalmente cuenta con medidores de flujo de oxígeno y acetileno para mantener su relación en la formación de la llama, y un pirómetro infrarrojo RAYTEK para medir la temperatura superficial de la muestra durante la

aplicación del recubrimiento, además posee sistemas electromecánicos para controlar la velocidad de la antorcha y del portamuestras, como se aprecia en la Figura 20.

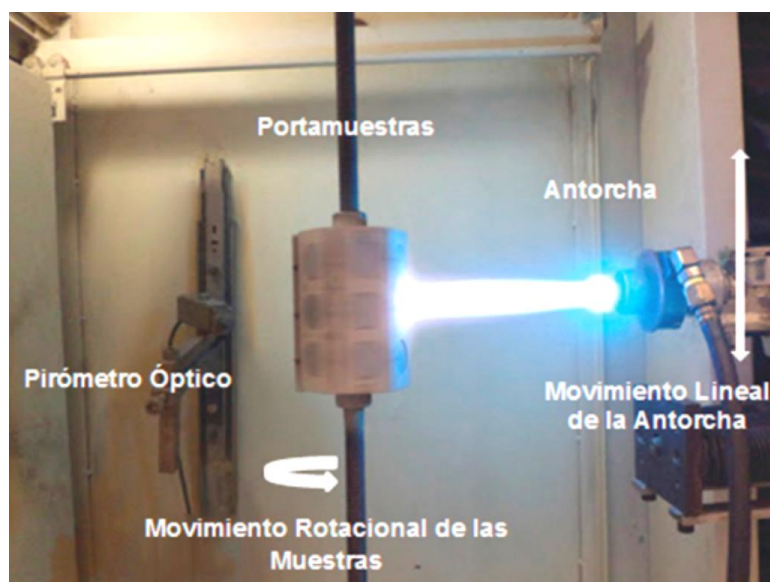


Figura 20. Sistema de proyección térmica de la cámara ARESTE I.

Fuente: grupo GIPIMME de la Universidad de Antioquia (UdeA)

El equipo cuenta con una recámara donde los combustibles se mezclan con anticipación para posteriormente ser proyectados utilizando una boquilla RL210 que posee 14 orificios donde se expulsada la mezcla de gases y 14 más dispuestos circularmente con la función de expulsar el polvo de magnetita. (Cadavid Iglesias, Parra Velásquez, & Vargas Galvis, Estudio de llamas oxiacetilénicas usadas en la proyección térmica, 2016). Los parámetros de proyección como la presión de los gases, como el acetileno y el oxígeno para producir la llama de combustión y nitrógeno para el transporte de las partículas hacia la llama y el sustrato fueron controlados por una interfaz. Por medio de la variación de flujos de oxígeno y acetileno la llama se puede modificar, para hacerla “neutra”, “oxidante” o “reductora”.

En la Tabla 2, se puede observar que el tipo de llama utilizado para realizar los recubrimientos correspondió a un tipo de llama oxidante ya que existe un exceso de comburente, con una relación de $C_2H_2:O_2$ de 1: 3,18. La llama oxidante se generó debido a la inyección de un

exceso de oxígeno a partir de la cantidad equimolar y fue seleccionada debido a que en este tipo de llama la zona primaria o más caliente se alarga por lo que el aporte energético a las partículas proyectadas es mayor en comparación que cuando se lleva a cabo con un tipo de llama neutra, lo anteriormente mencionado sucede debido a que las partículas permanecen más tiempo en la zona primaria, lo que favorece al tratamiento de las partículas sin embargo también produce oxidación de su superficie (Cadavid Iglesias, Parra Velásquez, & Vargas Galvis, Estudio de llamas oxiacetilénicas usadas en la proyección térmica, 2016)

La selección de los parámetros (Ver Tabla 2) fue definida por El Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales (GIPIMME) de la Universidad de Antioquia y el grupo de investigación en instrumentación y física de la materia condensada (GIFIMAC) de la Universidad Francisco de Paula Santander. En el sustrato cerámico de arcilla roja se realizaron dos proyecciones de Fe_3O_4 : una con el objetivo de aplicar cinco ciclos y otro para aplicar diez ciclos. En la figura 21, se aprecia el sustrato cerámico sin recubrir y el sustrato cerámico después del recubrimiento del polvo de magnetita.



Figura 21. Imagen de las muestras cerámicas con y sin recubrimiento.

Tabla 2.

Parámetros utilizados para la proyección térmica de los polvos de magnetita.

Materia prima usada en el proceso de proyección térmica	
Material proyectado	Magnetita
Material del sustrato	tableta de arcilla roja
Parámetros	
Presión O ₂ (Psi)	50
Presión C ₂ H ₂ (Psi)	12
Presión de N ₂ (Psi)	40
Velocidad de la antorcha (%)	10
Velocidad del portamuestras (%)	10
Pases de precalentamiento	5
Pases de proyección	5 y 10
Distancia de proyección (cm)	9
Flujo de polvo (g/min)	16,8
Boquilla	R1210
Rotojet	RPA3
Flujo O ₂ (nivel del flujómetro)	64
Flujo O ₂ (L/min)	70
Flujo C ₂ H ₂ (nivel del flujómetro)	60
Flujo C ₂ H ₂ (L/min)	22
Flujo N ₂ (L/min)	40

Fuente: Adaptado grupo GIPIMME de la Universidad de Antioquia (UdeA)

4.3 Caracterización estructural

4.3.1 Difracción de rayos X (DRX).

La identificación de las fases cristalinas se realizó por DRX usando un difractor XPERT-PRO que se muestra en la Figura 22, con radiación monocromática CuK α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) operando a 45 kV y 40 mA. Los patrones de difracción se recolectaron en el rango de 10 a 90° de escala 2 θ con un tamaño de paso de 0,026 y un tiempo de paso de 49,73 s. La cuantificación de la fase se determinó mediante el refinamiento de Rietveld utilizando el software X'Pert.

Adicionalmente, se calculó el índice de cristalinidad del polvo mediante la Ecuación 2, siguiendo lo reportado por (Bolio Lopez, Valadez Gonzalez, Veleza, & Andreeva, 2011).

$$\%C = \frac{I_{max}-I_{min}}{I_{max}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde I_{max} , e I_{min} corresponde a las intensidades máximas y mínimas de los picos de reflexión en la zona de no linealidad del patrón de difracción, el cual corresponde a la parte amorfa.

La estructura cristalina se estudió tanto a los polvos de magnetita como a la superficie de una muestra recubierta mediante haz rasante.



Figura 22. Equipo de difracción de rayos X marca XPERT-PRO

Fuente: Direct Industry by virtualexpo group. (2022). Difractómetro de rayos X X'Pert MRD / XL. Recuperado el 12 de marzo de 2022, de <https://www.directindustry.es/prod/malvern-panalytical/product-14669-1931717.html>

4.4 Caracterización morfológica.

4.4.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

El estudio de la morfología tanto de los polvos de magnetita como de los recubrimientos se realizó mediante un análisis a las imágenes obtenidas por MEB,

microfotografías que fueron tomadas usando los microscopios ZEISS EV0-MA10 el cual se muestra en la Figura 23.a y JEOL JSM 6490 LV en la Figura 23.b

Las muestras se prepararon aplicando un recubrimiento delgado en oro (Au) (equipo DENTON VACUUM Desk IV) y finalmente se analizaron en el microscopio electrónico de barrido en alto vacío para conseguir imágenes en alta resolución. Para estas caracterizaciones se emplearon los detectores de electrones secundarios (SE), a un voltaje de aceleración de 20kV y las imágenes se tomaron a diferentes magnificaciones.

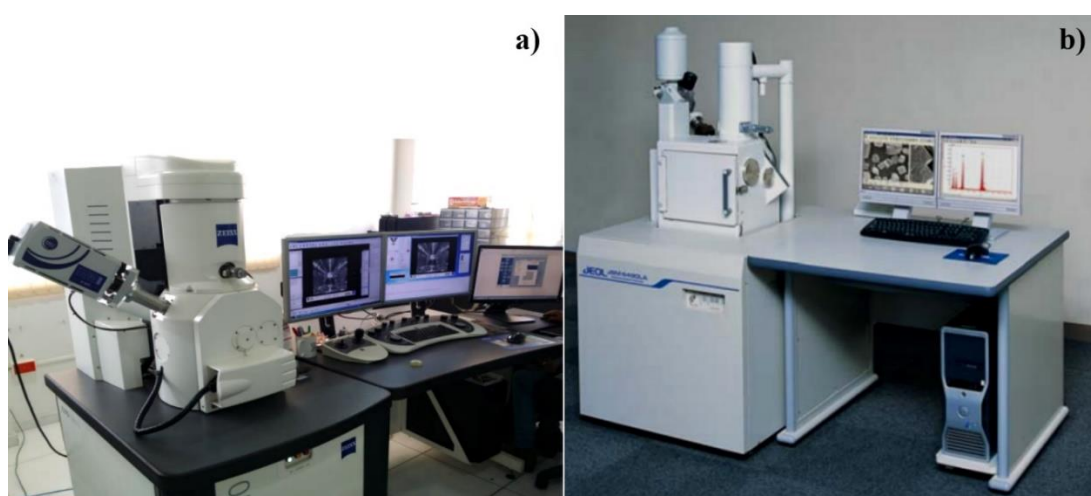


Figura 23. a) Microscopio electrónico de barrido, referencia ZEISS EV0-MA10, UPTC. b) JEOL JSM 6490 LV.

Fuente: Tomado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y la Universidad Universidad de Antioquia (UdeA)

La preparación de las muestras para el análisis del recubrimiento se realizó conforme a la norma ASTM e1920-03, con el objetivo de llevar a cabo el análisis morfológico y determinar la composición química del recubrimiento de magnetita. En primer lugar, se realizó el montaje en frío de las probetas utilizando resina de baja contracción de poliéster y un catalizador, los cuales reaccionan cuando se mezclan endureciéndose y encapsulando la muestra, como se observa en la Figura 24.a. La cantidad de catalizador se determinó según las recomendaciones del proveedor,

posteriormente se realizó el desmolde de las probetas ya secas con el objetivo de llevarlas al proceso de corte, las cuales se aprecian en la Figura 24.b.

El corte de las muestras se ejecutó con una cortadora de precisión que contiene un disco diamantado, como se muestra en la Figura 24.c. Luego se hizo la preparación superficial de las muestras mediante un pulido, inicialmente utilizando papel abrasivo (lijas) de carburo de tungsteno de tamaño de grano 400, 600, 1000, 1200, 1500, 2000 y 2200 por medio de una pulidora utilizada a una alta velocidad equipada con un sistema de suministro de agua. (Ver Figura 24.d.)

En el proceso de pulido se realizaron diversas inspecciones de las muestras con ayuda del microscopio digital de la marca CELESTRON, a magnificaciones de 10X y 150X, con el fin de garantizar una óptima preparación superficial evitando ralladuras como se aprecia en la Figura 24.d. Finalmente, las muestras se pulieron usando paño y alúmina pulverizada (Ver Figura 24.e) para obtener un acabado fino, como se observa en la Figura 24.f.

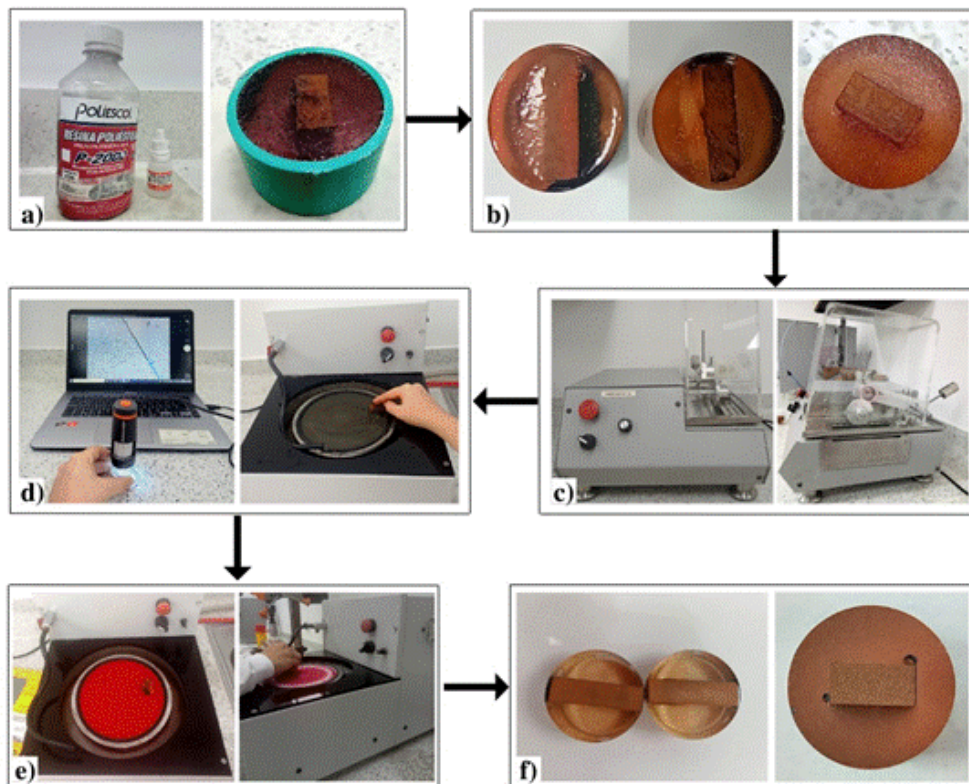


Figura 24. Proceso de preparación de las muestras. a) Embebido. b) Secado. c) Corte. d) Lijado e inspección. e) Pulido. f) Pulido fino

4.4.2 Microscopia óptica.

El espesor de los recubrimientos se determinó por microscopia óptica, mediante el Microscopio óptico Zeiss Axio Scope.A1, dotado con un software de captura de imágenes y una cámara Zeiss AxioCam ICc1 de 1,4 Megapíxeles como se muestra en la Figura 25. Las muestras usadas para este proceso fueron las obtenidas anteriormente (Ver Figura 24).

Las imágenes obtenidas fueron analizadas mediante el programa de procesamiento de imagen digital libre Image J®.



Figura 25. Microscopio Óptico

4.4.3 Determinación del tamaño de partícula.

El análisis del tamaño de partículas de los polvos de magnetita se realizó a través de las imágenes MEB con la ayuda del software libre ImageJ®, obteniéndose el diámetro promedio de Feret, el cual representa la distancia que existe entre dos líneas paralelas que son tangentes a la proyección de la partícula (Huerta Rosales, 2020). En la Figura 26, se aprecian las diferentes imágenes de MEB a 500X y el respectivo tratamiento mediante el software ImageJ®, para determinar el diámetro de Feret, el cual nos representa el tamaño promedio de partícula.

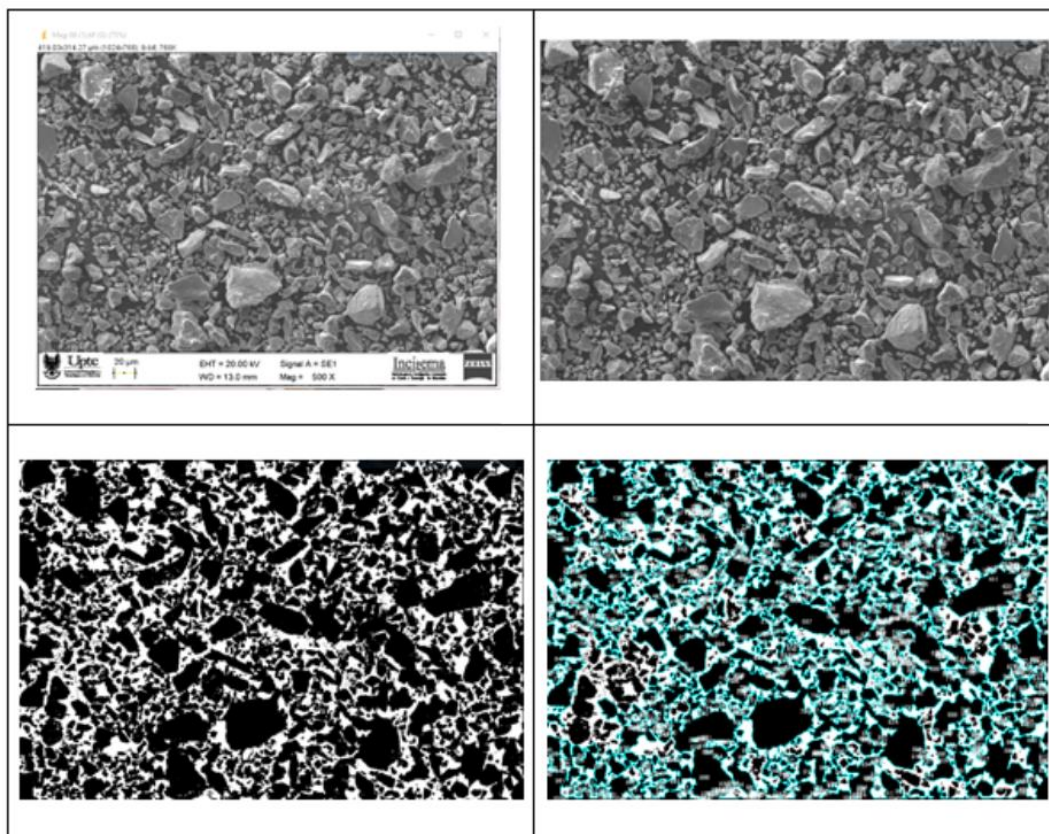


Figura 26. imágenes de MEB a 500X utilizadas para determinar el diámetro de Feret, mediante el software ImageJ.

4.5 Caracterización química

4.5.1 Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS).

El microanálisis elemental del polvo de magnetita se realizó con un microscopio electrónico de barrido de referencia ZEISS EV0-MA10, el cual tiene asociada una sonda de estado sólido que permite la cuantificación de las energías de rayos X dispersadas por la muestra, proporcionando información cuantitativa sobre la composición elemental del polvo de magnetita, así como del sustrato y del recubrimiento metálico.

4.6 Caracterización estética

4.6.1. Propiedades sensoriales.

Para la evaluación integral de los materiales en el campo del diseño de productos, además de sus propiedades técnicas o propiedades físico-mecánicas, también se debe tener en cuenta la relevancia de las propiedades estéticas del material o las características relacionadas con los sentidos humanos, las cuales también pueden denominarse como propiedades sensoriales (Karana, 2009).

A diferencia de las propiedades técnicas, en las que se puede comparar el comportamiento de un material mediante estándares de medidas generalmente cuantitativas como por ejemplo propiedades mecánicas, físicas, químicas y térmicas, las propiedades sensoriales se aprecian y reconocen a través de los sentidos, por lo que sus mediciones suelen ser cualitativas (Mejía Gómez , 2011). El análisis de los materiales bajo un enfoque estético permite establecer y clasificar propiedades como forma, textura, color entre otras y entender cómo estas afectan la percepción de las personas.

Para la caracterización estética de las muestras, se identificaron propiedades sensoriales, las cuales se dividen en categorías que se definen como percepciones obtenidas a través de la experiencia del material. Cada categoría tiene diferentes niveles, los cuales mediante el método de comprobación empleado generan un valor cualitativo que permite evaluar la percepción obtenida de cada mecanismo sensorial (Mejía Gómez , 2011). En la Tabla 3, se describen cada una de las categorías de las propiedades sensoriales mediante la cual se clasificaron las muestras de los sustratos sin recubrir y los sustratos recubiertos con el fin de evaluar la influencia del recubrimiento de magnetita en las propiedades estéticas del sustrato cerámico.

Tabla 3.

Guía para describir las propiedades estéticas de las muestras.

PROPIEDAD	CATEGORIA	NIVEL	DESCRIPCIÓN
Visuales	Forma	Dimensión	Término usado para describir figuras en las que se puede medir su largo, alto y ancho.
	Estructura	Homogénea	La formación monofásica y densa de los sólidos. La superficie del material consta de un solo componente.
		Heterogénea	Cuando varios materiales se combinan para formar un sólido.
	Apariencia Cromática	Color	sensación que producen los rayos luminosos en los órganos visuales y que es interpretada en el cerebro
	Apariencia Lumínica	Refractante	Propiedad de los materiales transparentes o amorfos. La luz que incide sobre un material transparente puede atravesarlo, pero en algunos casos cambia el ángulo de incidencia.
		Reflectante	característica de los materiales cristalinos que tienen un acabado superficial liso o brillante. La luz que incide sobre estos materiales se refleja de nuevo, manteniendo el ángulo de los rayos de luz incidentes
		Absorbente	Cuando la luz que incide sobre una superficie opaca es absorbida totalmente.
		Táctiles	Liso
	Rugoso		Característica de la superficie de un material formada por estrías, surcos o irregularidades.
	Textura		Punzante
Suave			Característica de la superficie de un material que puede tener salientes arrugas, o estrías, pero a su vez permite un deslizamiento en la superficie.
Dureza	Rígido		Característica de materiales que no se pueden doblar ni torcer.
	Flexible	Característica de materiales que se doblan fácilmente sin romperse.	
Fricción	Deslizante	Característica de la superficie de un material que permite el movimiento o el deslizamiento de una superficie sobre otra.	
	Antideslizante	Característica de la superficie de un material que impide o reduce el deslizamiento de una superficie sobre otra	
Gustativas			No aplica
Olfativas			No aplica
Auditivas			No aplica

Fuente: adaptación de Mejía Gómez, C. (2011). Metodología para el diseño de materiales Una aproximación desde la técnica y la sensorialidad. Universidad EAFIT, Medellín.

4.7 Caracterización tribológica

4.7.1 Resistencia a la abrasión profunda.

El equipo utilizado para el ensayo de abrasión profunda fue un abrasimetro marca Gabrielli Technology modelo Cap/3, el cual se aprecia en la Figura 27. Está conformado principalmente por un disco giratorio, una tolva de alimentación con un regulador para materiales abrasivos, porta muestras y contrapesos. El equipo utiliza un disco de acero, con un diámetro de (200 ± 02) mm y un espesor de $(10 \pm 0,1)$ mm, el cual gira a una frecuencia de 75 rpm (Cárcamo Ambrosio, 2007).



Figura 27. Abrasimetro marca Gabrielli Technology modelo Cap/3.

Fuente: Adaptado de Gabrielli Technology s.r.l. (2017). Catalogue Gabrielli Technology. Calenzano . Obtenido de www.Gabrielli.com

El estudio de la resistencia a la abrasión profunda se determinó mediante los lineamientos de la norma NTC 4321-6, esta norma es equivalente a la establecida por la

Organización Internacional para la Estandarización (ISO 10545-6). El método de ensayo consiste en efectuar una hendidura con un disco de acero rotatorio contra la muestra evaluada, que produce una pérdida de material y que indica el grado de consistencia del cuerpo cerámico, en cuanto a cohesión de las partículas que lo componen, este ensayo relaciona la longitud de la hendidura con el volumen de materia perdida, expresado en milímetros cúbicos (mm^3), por consiguiente, cuanto más compacto es el material, la hendidura será de menor longitud, en consecuencia, el volumen de material perdido también será menor.

Los especímenes de prueba tanto del sustrato, así como de los sustratos cerámicos con cinco y diez pases de recubrimiento de magnetita se utilizaron limpios y previamente secos hasta masa constante, durante el procedimiento se verificó que el material abrasivo haya sido alimentado uniformemente en la zona de contacto y se ubicaron las probetas de manera tangencial al disco rotatorio del equipo mencionado en la Figura 27. Posteriormente se midió la longitud de la huella de cada muestra con un calibrador pie de rey digital PITTSBURGH con el fin de determinar el desgaste a la abrasión profunda el cual se expresa como el volumen en mm^3 de material removido mediante la Ecuación 3.1 y la Ecuación 3.2

$$V = \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180} - \sin \alpha \right) \frac{h \cdot d^2}{8} \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \left(\frac{l}{d} \right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Dónde:

V: Volumen desprendido de material (mm^3)

l: Longitud hendidura(mm)

h: Espesor del disco (mm)

d: Diámetro del disco (mm)

4.8 Caracterización mecánica

4.8.1 Resistencia a la flexión.

El equipo utilizado para el ensayo de resistencia mecánica a la flexión corresponde a la máquina de ensayo universal referencia EMIC modelo DL2000 N0 11760 NS: 784, la cual cuenta con una capacidad Máxima 2000 kgf (20kN). Los equipos de la línea DL son de concepción electromecánica, poseen instrumentación electrónica que proporcionan una resolución con capacidad de abarcar con total linealidad todos los valores de fuerza en una escala solamente (MELDIC una empresa CESMEC). Además, cuenta con un dispositivo de tres puntos para el ensayo a la flexión como se puede observar en la Figura 28.

El ensayo de resistencia a la flexión de los sustratos cerámicos sin recubrimiento y con 5 y 10 pases de recubrimiento de magnetita se determinó mediante el ensayo a la flexión en tres puntos, este ensayo se realizó conforme a la norma NTC 4321-4 equivalente a la norma ISO 10545-4, la cual establece un método de ensayo para hallar la resistencia máxima a la flexión o módulo de rotura, y la fuerza de rotura para todo tipo de baldosas cerámicas, donde al finalizar el ensayo la muestra queda partida en dos piezas.

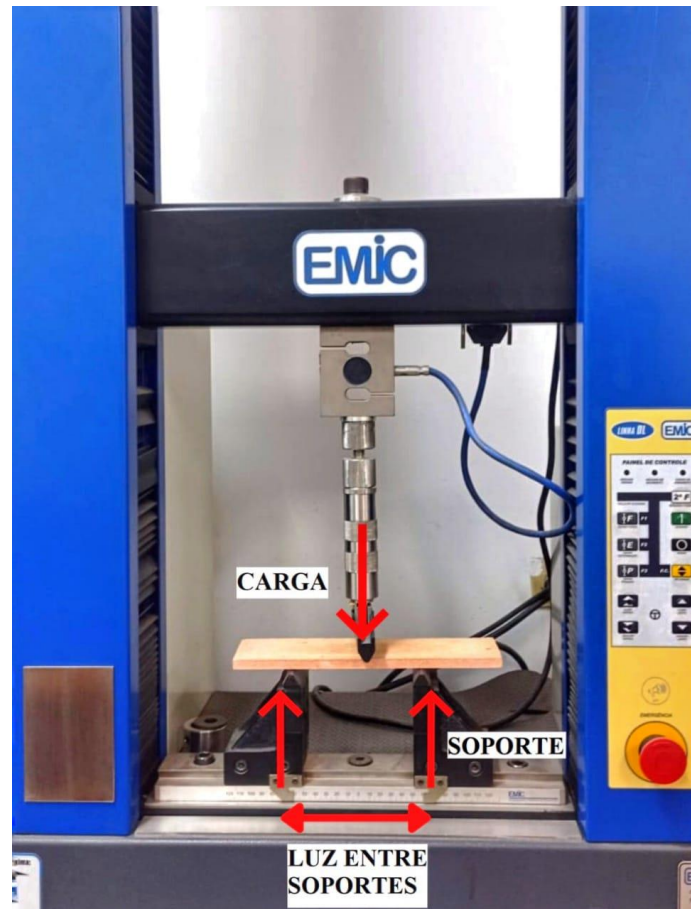


Figura 28. Máquina universal EMIC modelo DL2000, utilizada para la caracterización mecánica de las muestras.

Fuente: Universidad Francisco de Paula Santander

Las probetas fueron sometidas a una fuerza estática que aumentó hasta la fractura, la luz entre soportes de cada muestra tuvo un valor de 120 mm. La fuerza de rotura se obtuvo mediante la Ecuación 4.1, la cual se expresa como la relación directa entre la carga aplicada sobre la baldosa, con un coeficiente que relaciona la distancia entre apoyos y la anchura de la probeta, en newton (N), y el módulo de rotura también denominado resistencia a la flexión se determinó a través de la Ecuación 4.2, cuyo resultado es expresado en newton por milímetro cuadrado (N/mm^2). El software del equipo utilizado teniendo en cuenta la teoría mencionada anteriormente facilitó la obtención de los resultados.

$$S = F \cdot \frac{L}{b} \rightarrow [\text{N}] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \rightarrow \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

F: Carga de rotura

L: Espacio en mm entre las barras

b: Ancho de la probeta

h: Espesor mínimo probeta

4.9 Caracterización térmica

4.9.1 Conductividad térmica y efusividad.

La caracterización térmica por el método de la fuente plana transitoria (MTPS) es una forma de medición rápida y efectiva de la conductividad y efusividad térmica, así como de otros parámetros, con tiempos de medida relativamente cortos (Gilabert, Zumaquero, Machí, & Gómez, 2014). Por este motivo para realizar la caracterización térmica del sustrato cerámico y del conjunto cerámico-recubrimiento tanto de cinco y diez pases de recubrimiento de magnetita, se utilizó el equipo de C-therm, el cual se ilustra en la Figura 29.

Este sistema consta de una unidad de control, de un sensor (MTPS) y por último de un software computacional, en el que la muestra a estudiar se ubica sobre el sensor y posteriormente se aplica una pesa sobre ella con el objetivo de que exista contacto efectivo sobre el sensor, finalmente cuando se aplica el proceso de medida, los datos de las propiedades son registrados en el computador ya que este se encuentra conectado al equipo generándose una tabla con las propiedades térmica de la muestra. El equipo está sustentado en la norma ASTM D7984.

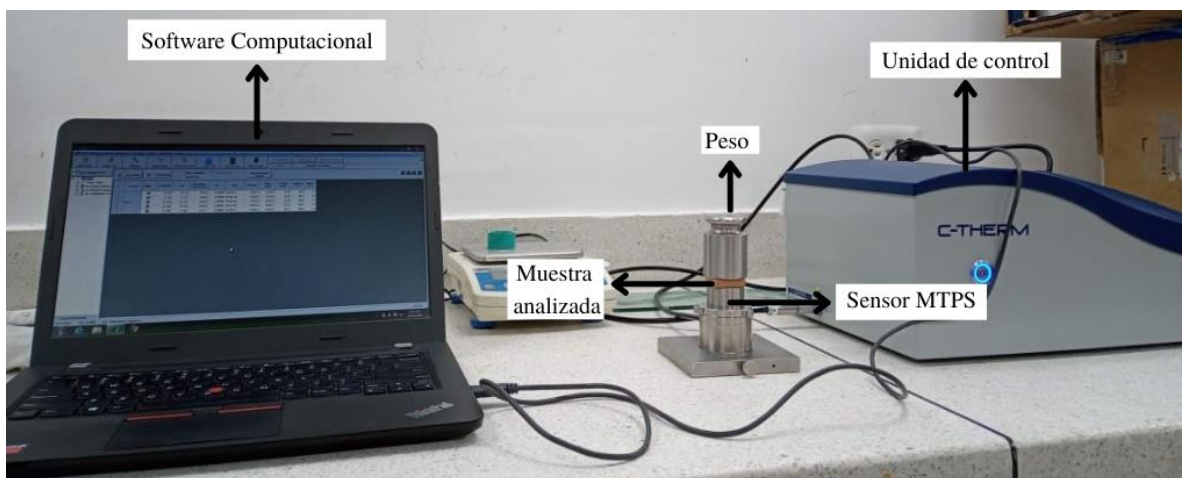


Figura 29. Equipo C-Therm, utilizado para la caracterización térmica de las muestras.

Fuente: Universidad Francisco de Paula Santander

Para determinar las propiedades térmicas se configuró el tipo de ensayo y el equipo, de esta forma se seleccionó el tipo de test según los proveedores que se adaptaba al material de estudio, considerando el rango de la medida de la conductividad térmica, así también se seleccionó el agente de contacto a modo de interface entre la probeta (sustrato cerámico sin recubrir, el sustrato recubierto con cinco y diez pases de proyección) con el sensor.

En este caso, el agente de contacto seleccionado para completar el espacio de aire que pueda existir entre el sensor y la superficie de las muestras fue la grasa térmica, debido a que su uso no afecta la medición puesto que no es absorbido por el material analizado, además es recomendado para este tipo de material según la guía del usuario, la grasa térmica o agente de contacto se observa en la Figura 30.

Para la preparación de las probetas, en primer lugar, se cortaron las muestras con el objetivo de evitar errores en el proceso debido a la pérdida de equilibrio de las muestras sobre el sensor y también para no afectar al sensor ya que no posee capacidad para soportar un peso superior a los 2 kg. Posteriormente se lijó la sección de las muestras que estarían en contacto con

el peso de 500 gramos, ya que esta sección estaba conformada por relieves propios del diseño del proveedor del sustrato. Por último, se limpió la superficie de las muestras que estarían en contacto con el sensor, para eliminar impurezas o algún tipo de contaminación como polvos o sustancias que podrían alterar los resultados, así mismo se distribuyó la cantidad suficiente del agente de contacto sobre el sensor (Porras Amores, Santa Cruz Astorqui, Villoria Sáez, & Viñas Arrebola, 2019).



Figura 30. Agente de contacto, sensor MTPS, montaje del sustrato y de la muestra recubierta

En la figura 30, se puede apreciar el montaje correcto de la muestra. Se tomaron cinco lecturas para cada tipo de probeta (sustrato sin recubrir, cerámica recubierta con cinco pases de proyección y cerámica recubierta con diez pases de proyección). Estas lecturas se tomaron esperando 3 minutos en promedio antes de iniciar la siguiente medición para que el calor se disipara totalmente y en zonas diferentes de la superficie. En cada tipo de muestra se determinó la conductividad térmica en (W/mK) y la efusividad en $(W \cdot \sqrt{s}) / (m^2) \cdot K$.

4.10. Caracterización eléctrica

4.10.1 Conductividad eléctrica.

Para la determinación experimental de la resistividad eléctrica, se tomó una sección transversal de un área de $0,002032 \text{ cm}^2$, donde se usó el espesor del recubrimiento para la muestra de diez ciclos ($203,2 \text{ }\mu\text{m}$ o $0,2032 \text{ cm}$) y un ancho de $0,01$ correspondiente a la medida del diámetro de la pinza del multímetro (UNIT-T UT171C), donde se variaron las longitudes de la medida de la resistencia para 2cm , 3cm , 4 cm y 5 cm respectivamente. Con los datos anteriores se utilizó la Ecuación 5.1.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

R=resistencia(Ω)

A=área de la sección transversal (cm)

L=longitud (cm)

Por otro lado, para la determinación de la conductividad eléctrica se usó la Ecuación 5.2, donde ρ es la resistividad medida anteriormente.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Fórmula para determinar la conductividad eléctrica (la inversa de la resistividad eléctrica).

5. Resultados y análisis

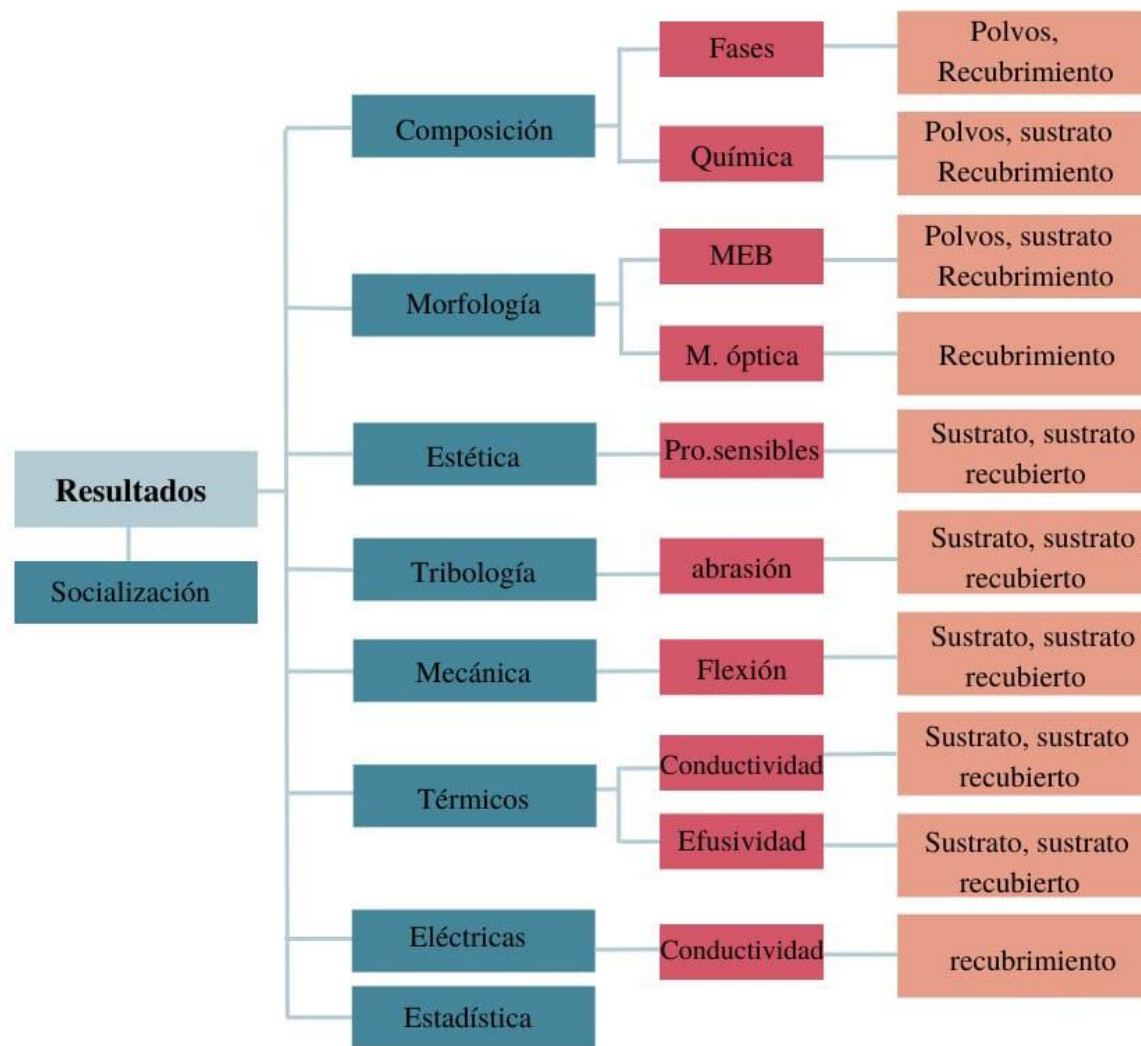


Figura 31. Esquema de resultados

5.1 Resultados y análisis de la caracterización de la materia prima

5.1.1 Análisis Estructural de los polvos de partida.

Los patrones de difracción de rayos X del polvo suministrado de magnetita se presentan en la Figura 32, donde se identifican tres fases cristalinas, una correspondiente a la Magnetita, identificada con el patrón de la ICDD 96-900-2674, la cual reporta los parámetros de red teóricos $a = b = c = 8,385 \text{ \AA}$, correspondiente a una estructura cúbica y grupo espacial 227, la segunda fue la Hematita (ICDD 96-901-5066), con estructura hexagonal con los parámetros de

red teóricos $a = b = 5,025 \text{ \AA}$ y $c = 13,716 \text{ \AA}$, y grupo espacial 167, y por último la fase monoclinica Wuestite (ICDD 96-900-2671) con los parámetros de red teóricos $a = 5,264 \text{ \AA}$, $b = 3,033 \text{ \AA}$, $c = 3,063 \text{ \AA}$, y grupo espacial 12. Por otra parte, en esta misma figura se observa que la muestra de polvo consiste en partículas de magnetita policristalinas con un porcentaje de fase morfa aproximado del 40%, el cual se obtuvo para el plano de reflexión 202 de la magnetita ubicado en el rango entre $2\theta = 29^\circ$ y $30,5^\circ$ (Ver Figura 32). El porcentaje de fase amorfa se halló usando la ecuación (1) de la sección 4.3.1.

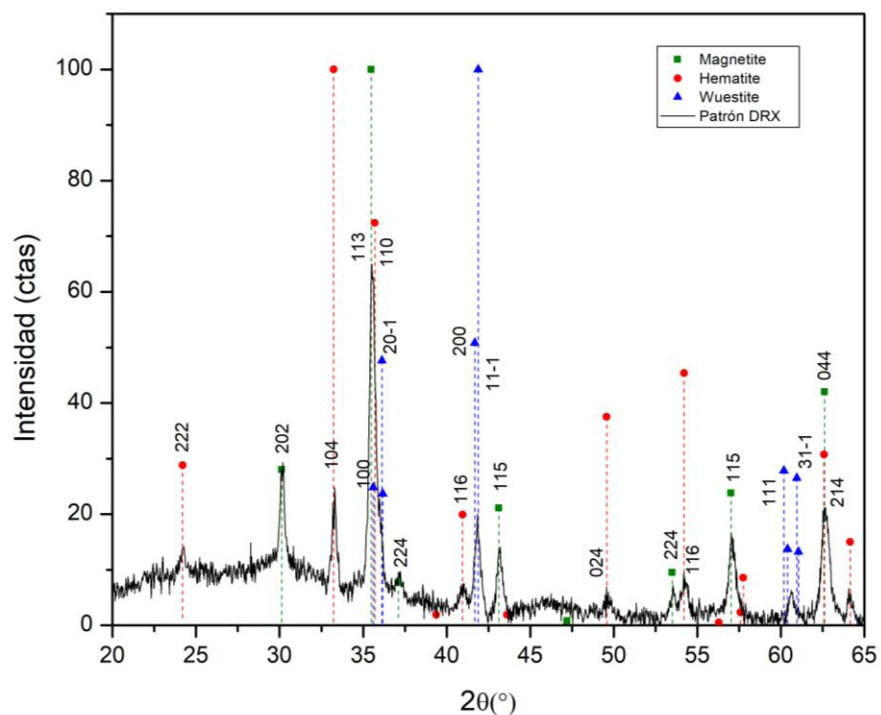


Figura 32. Patrón de Difracción de rayos X del polvo precursor de magnetita y las fases cristalinas identificadas.

5.1.2 Análisis Morfológico de los polvos de partida.

En la Figura 33, se presentan las micrográficas a dos magnificaciones tomadas con el microscopio electrónico de barrido a los polvos de magnetita utilizados para la elaboración de los recubrimientos. En la Figura 33.a, se observan con una magnificación de 500X los polvos, con

una morfología irregular de partículas alargadas propias de los minerales de hierro, así mismo en la Figura 33.b, se presenta una ampliación a 3000X, donde se observa la forma de una partícula de magnetita. Al comparar la morfología de las muestras con las reportadas en la literatura se encontró que son similares a las hallados por (Jadhav & Patil , 2014). Por otra parte, en esta misma figura, se pueden observar algunas partículas con forma laminar tipo aguja brillantes, la cual corresponde a la hematita, en contraste con la mayoría de partículas de la imagen que presentan una morfología más volumétrica correspondiente a la magnetita (Posada, 2015)

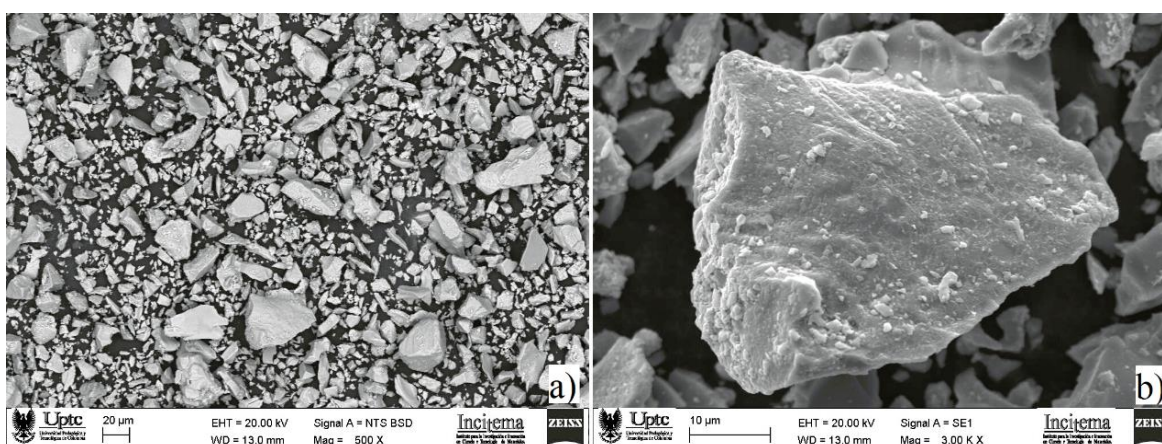


Figura 33. Polvos micrométricos de magnetita. a) Morfología del polvo de Fe_3O_4 . b) Partícula del polvo de Fe_3O_4

En la Figura 34.a, se presenta el histograma de la distribución de tamaño de partículas de la magnetita utilizada para la proyección térmica de los recubrimientos, la cual se obtuvo a partir de los resultados obtenidos mediante el software ImageJ a las partículas de la imagen tomada con MEB (Ver Figura 33), así mismo se presenta la curva de frecuencia acumulada de los tamaños del diámetro de las partículas en la Figura 34.b, donde se pueden observar que el 95% de las partículas tienen un diámetro menor a $17 \mu m$ y el 50% tiene un diámetro menor que $3 \mu m$.

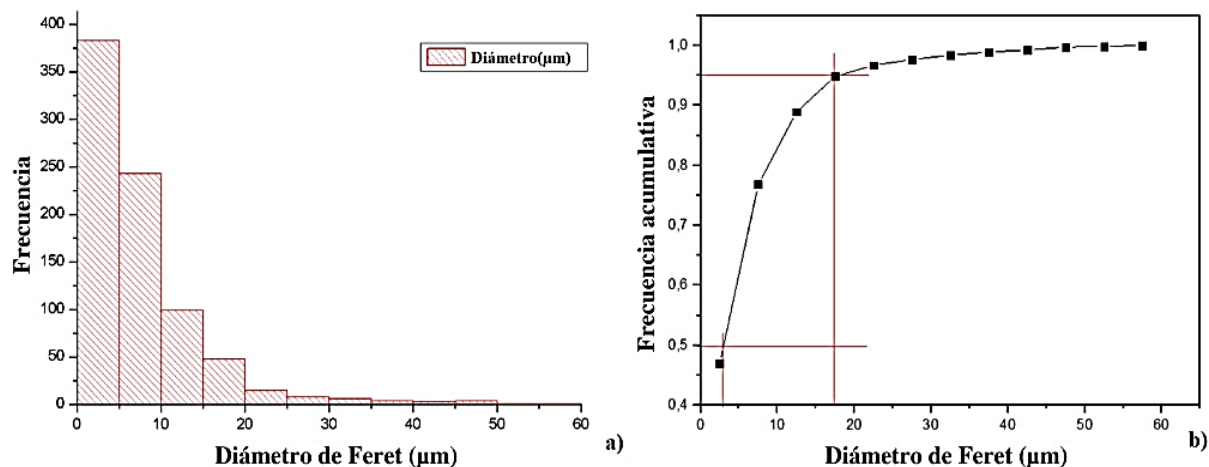


Figura 34. Distribución de tamaño de partículas de la magnetita suministrada. a) Frecuencia acumulada del diámetro de las partículas b) Histograma frecuencia de los diámetros de las partículas

5.1.3 Composición química de los polvos de partida.

En la Figura 35, se presenta la imagen de MEB y el patrón de energía dispersivas de rayos X (EDS), que permitió conocer la composición química por elemento o microanálisis del polvo de magnetita, donde se aprecia que el material está constituido principalmente por hierro y oxígeno con algunas impurezas de carbono, en general se infiere que la muestra corresponde a un óxido de hierro.

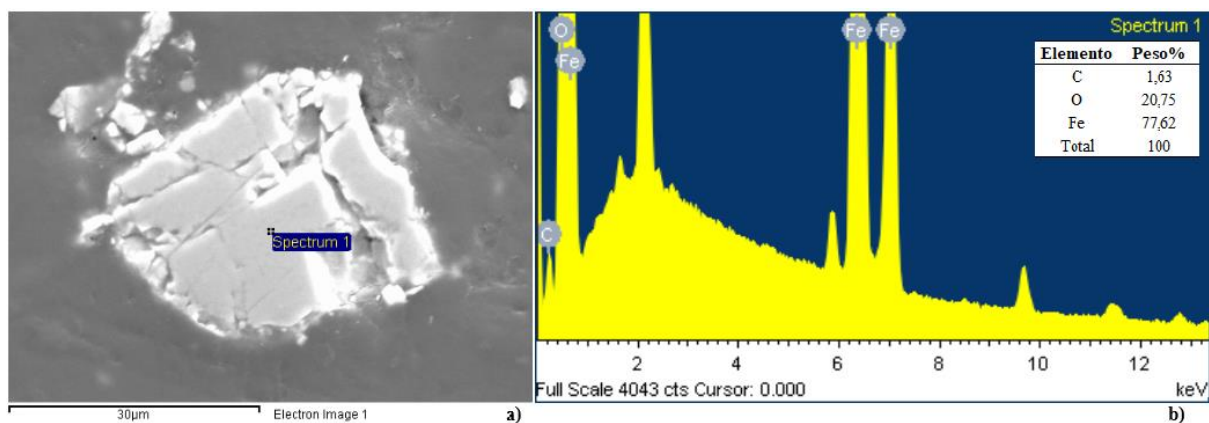


Figura 35. Espectro de composición química elemental

5.1.4 Análisis morfológico y químico del sustrato.

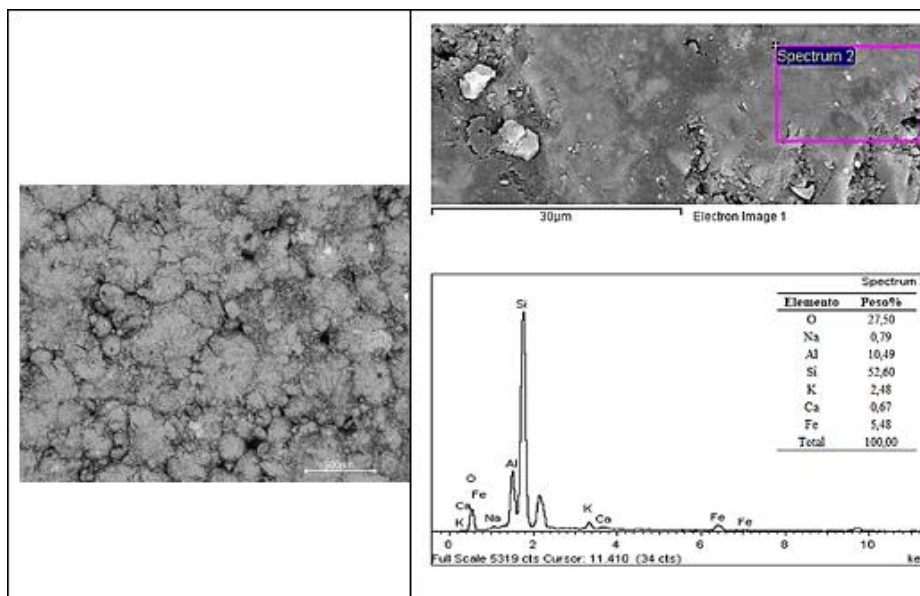


Figura 36. Imagen de MEB, y espectro de dispersión de energías de rayos X (EDS) para el sustrato.

En la Figura 36, se presenta la morfología superficial usando MEB del sustrato cerámico, así como el espectro de dispersión de energías de rayos X (EDS) de la muestra que permitió conocer la composición química por elemento de la muestra, evidenciándose que está compuesta principalmente por silicio, aluminio, potasio y hierro, y en menor concentración calcio y sodio.

5.2 Resultados y análisis de la caracterización estructural, morfológica y química del recubrimiento

5.2.1 Análisis estructural del recubrimiento.

Un patrón de difracción de rayos X de haz rasante realizado al recubrimiento se presenta en la Figura 37, donde se identificaron tres fases cristalinas una de Magnetita (ICDD 96-900-5838), con los parámetros de red teóricos $a = b = c = 8,3860 \text{ \AA}$, estructura cúbica y grupo espacial 227, Hematite (ICDD 96-901-5965), con los parámetros de red teóricos $a = b = 5,0350 \text{ \AA}$

y $c = 13,7470 \text{ \AA}$, estructura hexagonal y grupo espacial 167 y Wuestite (ICDD 96-900-9767) con los parámetros de red teóricos $a = b = C = 4,3260 \text{ \AA}$, estructura cúbica y grupo espacial 225.

Por otra parte, al comparar el patrón de DRX del recubrimiento con el de la muestra en polvo (Ver Figura 32) desde el punto de vista cualitativo se observa que las fases son similares.

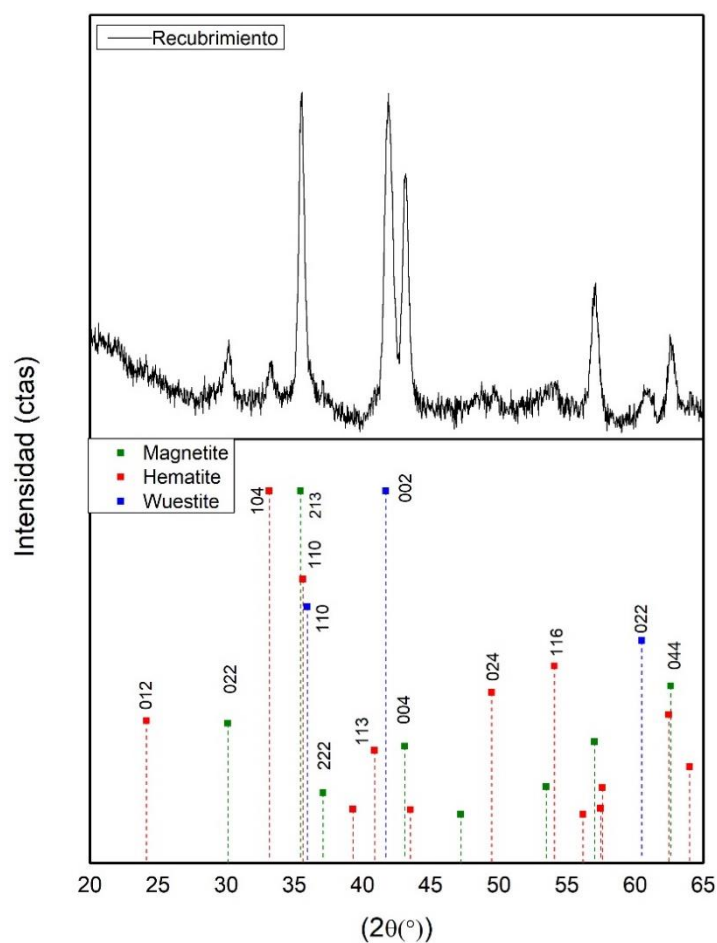


Figura 37. Patrón de difracción de rayos X, para el recubrimiento, e identificación de las fases cristalinas.

Con el objeto de cuantificar las fases cristalinas presentes en el recubrimiento, se realizó un refinamiento Rietveld al patrón de DRX (Ver Figura 38). En la Tabla 4, se presentan los parámetros de red calculados y el porcentaje de las fases presentes en el recubrimiento, al comparar los parámetros de red teóricos con los calculados se encuentra que los valores están en

buen acuerdo. El coeficiente de bondad ($\chi^2 = 3,02$) representa la calidad de refinamiento, lo que sugiere una buena relación entre el modelo calculado y el patrón XRD experimental.

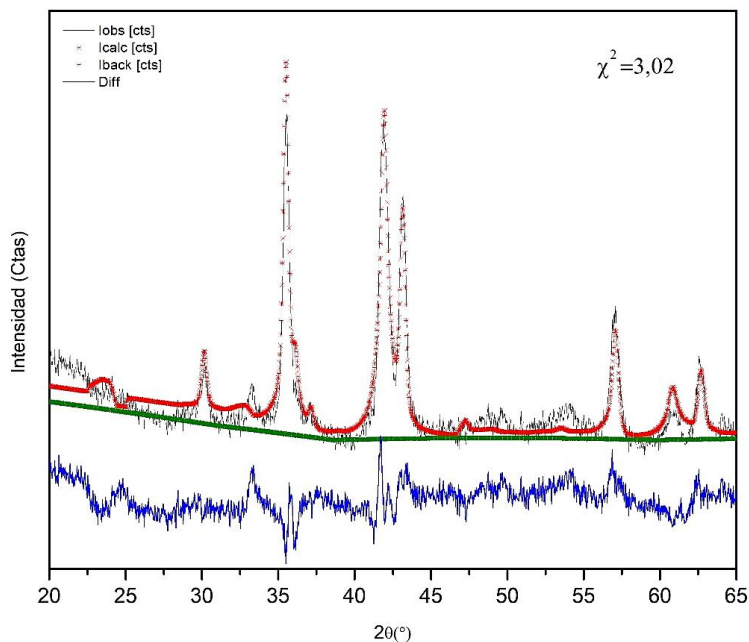


Figura 38. Refinamiento Rietveld del patrón del recubrimiento de magnetita.

Tabla 4.

Fases identificadas, cuantificación de la parte cristalina y parámetros de red

Fase	%	Parámetro de red Å
Magnetita	75	a = 8,38029
		b = 8,38029
		c = 8,38029
Hematite	5,5	a = 5,08306
		b = 5,08306
		c = 13,9016
Wuestite	19,5	a = 4,30611
		b = 4,30611
		c = 4,30611

5.2.2 Análisis Morfológico del recubrimiento.

En el análisis morfológico de los recubrimientos se observaron sistemáticamente las micrografías de la superficie y la sección transversal tomadas por el Microscopio electrónico de barrido (MEB). En la Figura 39, se puede apreciar la superficie del recubrimiento de magnetita a diferentes aumentos; a) 200, b) 500, c) 700 y d) 1000 en ellas se evidencia “splats” los cuales no son homogéneos, esto se debe a la distribución granulométrica de los polvos de partida la cual no es homogénea.

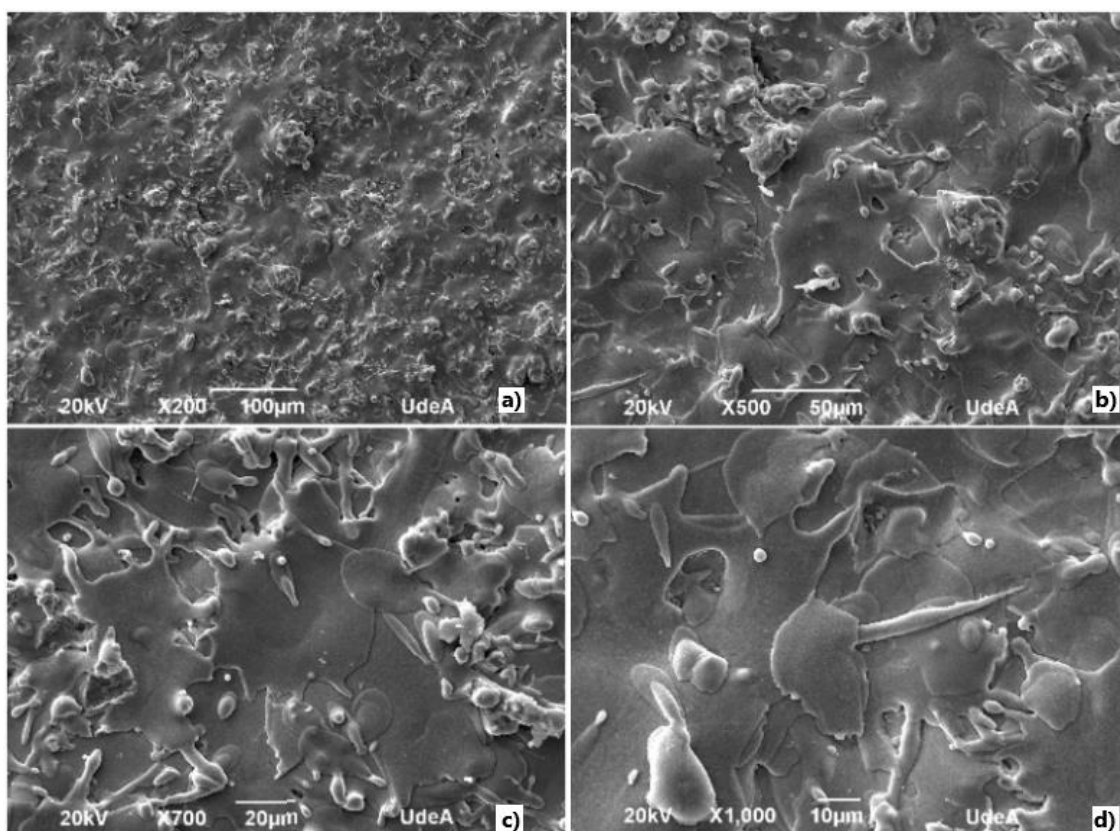


Figura 39. Micrografías MEB de la superficie de los recubrimientos obtenidos a a) 200X, b) 500X, c) 700X y d) 1000X

En la Figura 40.a, se presentan las partes detalladas de la superficie del recubrimiento, donde se aprecia una morfología de partículas fundidas, semifundidas, salpicaduras y microgrietas propia de la proyección térmica por llama (Ferrer, Moreno, & Vargas, 2018). Por

otra parte, en la Figura 40.b, se presenta la sección transversal del recubrimiento en la que se aprecia un alto grado de adherencia del recubrimiento al sustrato, esto se debe gracias a la rugosidad del sustrato, como menciona (Agredo Diaz, y otros, 2020) entre mayor sea la rugosidad del sustrato, el recubrimiento presentará una mayor adherencia, lo cual se aprecia al no existir una separación entre el recubrimiento y el sustrato.

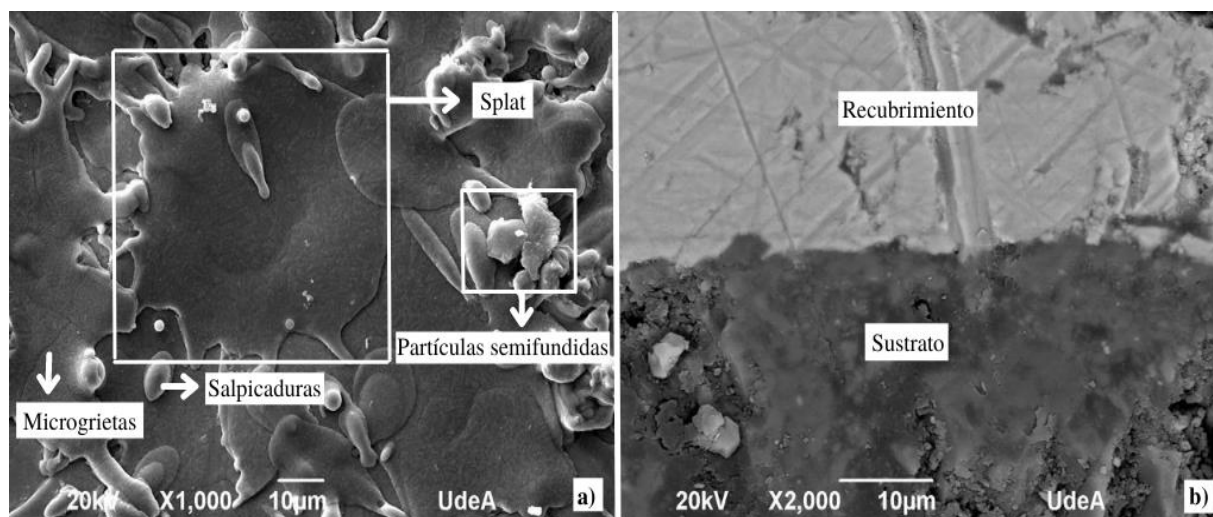


Figura 40. a) Micrografía MEB de las partes detalladas de la superficie del recubrimiento. b) Micrografía MEB de la sección transversal del recubrimiento.

En la Figura 41, se muestra las micrografías MEB de la estructura del recubrimiento en su área transversal a diferentes aumentos; a) 100X, b) 200X, c) 700X y d) 1000X, donde se observan irregularidades a lo largo de la superficie del sustrato, lo que indica que el recubrimiento no es cien por ciento plano. Esta topografía del recubrimiento de magnetita tiene una uniformidad similar a la de los recubrimientos de dióxido de titanio (TiO_2) reportados por (Peña Rodríguez, Dulce Moreno, & Vargas Galvis, 2018), realizados con la misma técnica de proyección y sobre el mismo sustrato, puesto que, por ser óxidos metálicos funden mejor debido a su temperatura de fusión, la cual corresponde a $1597\text{ }^\circ\text{C}$ para el Fe_3O_4 (Guillen Linares, 2021), esto generó mayor cohesión entre las partículas fundidas.

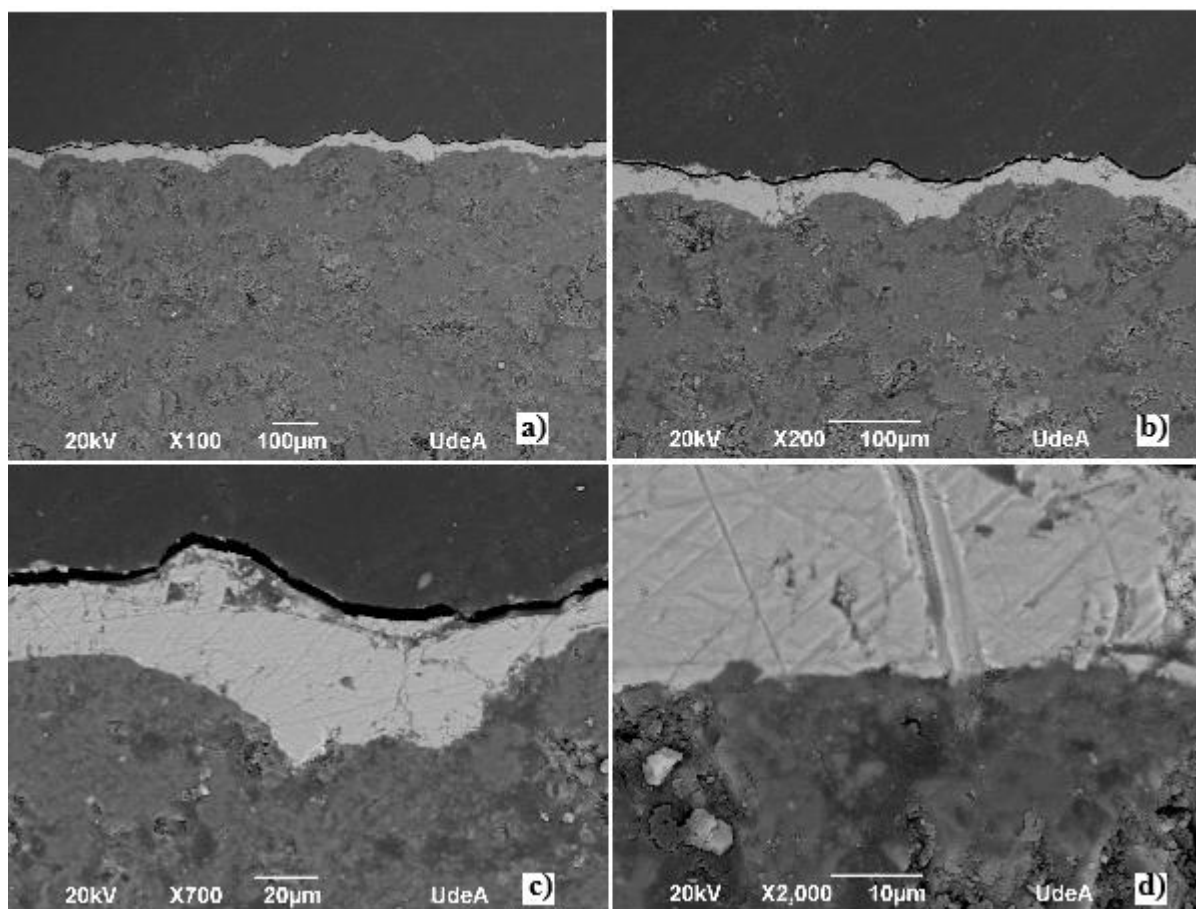


Figura 41. Micrografías MEB de la sección transversal de los recubrimientos obtenidos a a) 100X, b) 200X, c) 700X y d) 1000X

En la Figura 42, se presenta la sección transversal de los recubrimientos tomada con el microscopio óptico, durante la elaboración del recubrimiento mediante proyección térmica las partículas fundidas de magnetita que estuvieron bajo el tratamiento termocinético al impactar al sustrato cerámico en el que se anclan de forma mecánica originaron las “lamellas”, las cuales son los splats vistos desde una perspectiva transversal, que permiten el depósito de múltiples capas que forman el recubrimiento (Fauchais, Heberlein, & Boulos, 2014). En esta imagen se puede observar que las lamelas están formadas por partículas totalmente fundidas, esto indica que los parámetros utilizados son los adecuados ya que la mayor parte de los polvos de partida lograron fundirse por completo.

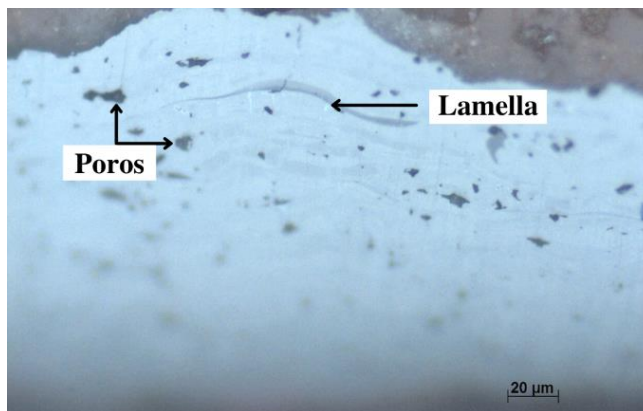


Figura 42. Sección transversal de los recubrimientos tomada con el microscopio óptico

También se puede observar en la Figura 43.a, la capa de recubrimiento formada mediante 5 pases de proyección la cual tiene un espesor promedio de $119.7 \pm 10 \mu\text{m}$, y en la Figura 43.b, el recubrimiento elaborado con 10 pases de proyección cuyo espesor promedio es de $203.2 \pm 18 \mu\text{m}$. Lo anterior permite inferir que a medida que aumenta el número de pases de proyección el espesor de la capa de recubrimiento también incrementa. Por otra parte, en la Figura 43.b, se observa que no se generó desprendimiento del recubrimiento, así como se reportó (Peña Rodríguez, Dulce Moreno, & Vargas Galvis, 2018) para recubrimientos de TiO_2 , esto debido a que los recubrimientos realizados a partir de estos óxidos metálicos son más homogéneos y poseen mayor grado de fusión.

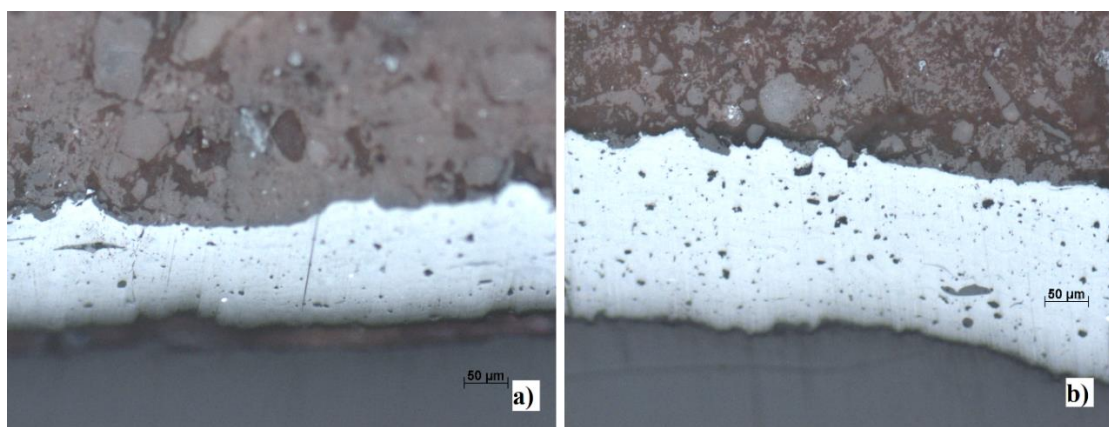


Figura 43. Micrografías de la sección transversal de los recubrimientos. a) Recubrimiento con cinco pases de proyección b) Recubrimiento con diez pases de proyección

5.2.3 Análisis de la composición química del recubrimiento.

Los resultados del microanálisis de la composición química del recubrimiento se realizó tanto a la sección transversal de la muestra como a la superficial, indicando que el material está compuesto principalmente por hierro y oxígeno, con algunas impurezas de manganeso, en la Figura 44.a, se muestra el área de análisis de la sección trasversal de $169,6 \mu\text{m}^2$, y en la Figura 44.b, el espectro de energía dispersiva de rayos X (EDS) correspondiente, obteniéndose un porcentaje en peso promedio de 89,08 para el hierro, de 9,86 para el oxígeno y 1,06 para el manganeso. Por otra parte, la imagen de la sección superficial y su correspondiente patrón de EDS se presenta en la Figura 45. En esta se aprecia que el microanálisis superficial del recubrimiento se realizó sobre un área de $11473,3 \mu\text{m}^2$, reportándose un porcentaje en peso promedio de 84,46 para el hierro, de 14,65 para el oxígeno y 0,89 para el manganeso, resultados que son del mismo orden de magnitud a los hallados a la sección trasversal, y las diferencias se deben a que las áreas estudiadas no son iguales.

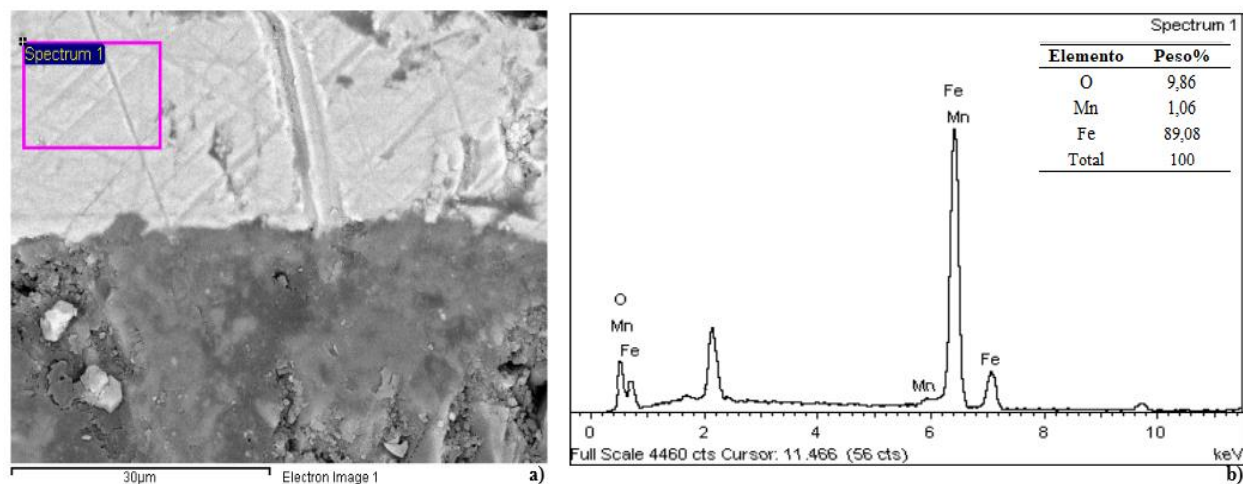


Figura 44. a) área de análisis de la sección transversal de la muestra. b) Espectro de energía dispersiva de rayos X (EDS)

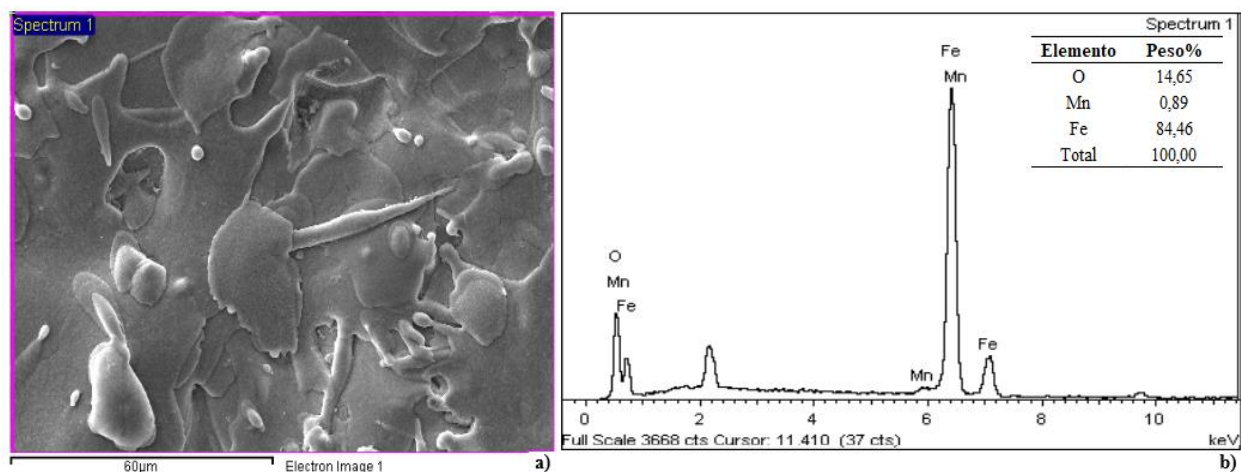


Figura 45. Imagen de MEB de la superficie del recubrimiento utilizada para el microanálisis elemental del recubrimiento.

5.3 Resultados y análisis de la caracterización Estética

5.3.1 Propiedades sensoriales del sustrato y recubrimientos

En la Figura 46, se muestran las imágenes utilizadas de las tabletas cerámicas sin recubrir y los recubrimientos para el análisis de las propiedades sensoriales. Por otra parte, en las Tablas 5 y 6, se presenta la clasificación de las muestras según sus propiedades visuales y táctiles a partir de las cuales se pudo inferir que el aporte del recubrimiento ofreció un acabado decorativo a la superficie del sustrato y cambios significativos en la estructura, apariencia cromática y lumínica, a diferencia de las propiedades táctiles que presentaron coincidencias en la textura rugosa, rigidez y características antideslizantes.

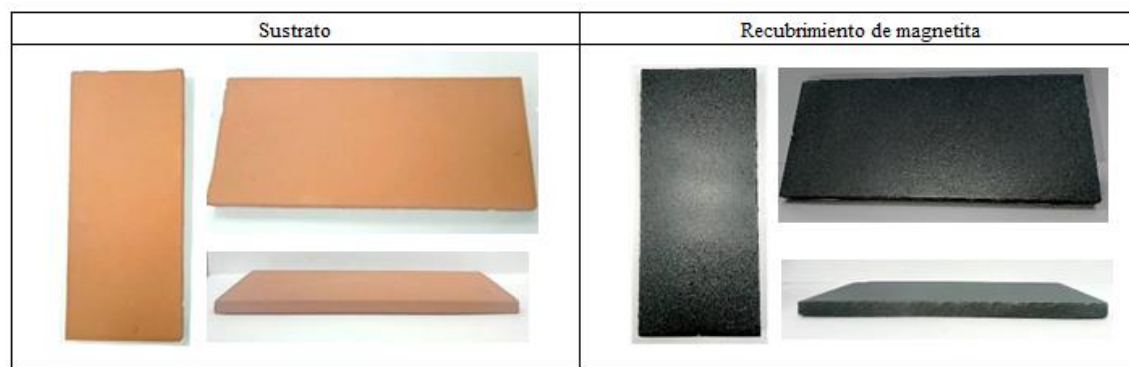


Figura 46. Muestras utilizadas para el análisis de las propiedades sensoriales

Tabla 5.

Propiedades visuales del sustrato y el recubrimiento

PROPIEDADES VISUALES				
Categoría	nivel	Sustrato cerámico	Sustrato con recubrimiento de Magnetita	Observación
Forma	Dimensión	X	X	Se encuentran coincidencias en la forma y dimensión de las muestras (longitud, ancho y espesor)
Estructura	Homogénea	X		Se observa una estructura homogénea en el sustrato sin recubrimiento la cual se compone del material arcilloso de la tableta cerámica
	Heterogénea		X	Se observa una estructura heterogénea compuesta por el material cerámico del sustrato y el óxido de hierro del recubrimiento de magnetita
Apariencia Cromática	Color	X	X	Las muestras difieren en su color la cual el sustrato sin recubrir presenta un color rojo debido a su composición arcillosa y el sustrato recubierto presenta un color negro grisáceo propio de la magnetita
Apariencia Lumínica	Refractante			
	Reflectante		X	Se observa una superficie reflectante difusa producida por la superficie del recubrimiento
	Absorbente			El sustrato sin recubrir presenta una superficie opaca el cual absorbe la luz sin reemitirla

Tabla 6.*Propiedades táctiles del sustrato y el recubrimiento*

PROPIEDADES TÁCTILES				
Textura	Liso			
	Rugoso	X	X	Las muestras evaluadas presentan una textura rugosa con leves irregularidades en su superficie
Dureza	Rígido	X	X	Se puede observar que los sustratos sin recubrir y con recubrimiento son rígidos, esto debido a la baja elasticidad de los materiales que lo componen
	Flexible			
Fricción	Deslizante			
	Antideslizante	X	X	Debido a la superficie rugosa de las muestras analizadas presentan características antideslizantes

5.4. Resultados y análisis de la caracterización tribológica

5.4.1. Evaluación de la resistencia a la abrasión profunda del sustrato y recubrimientos

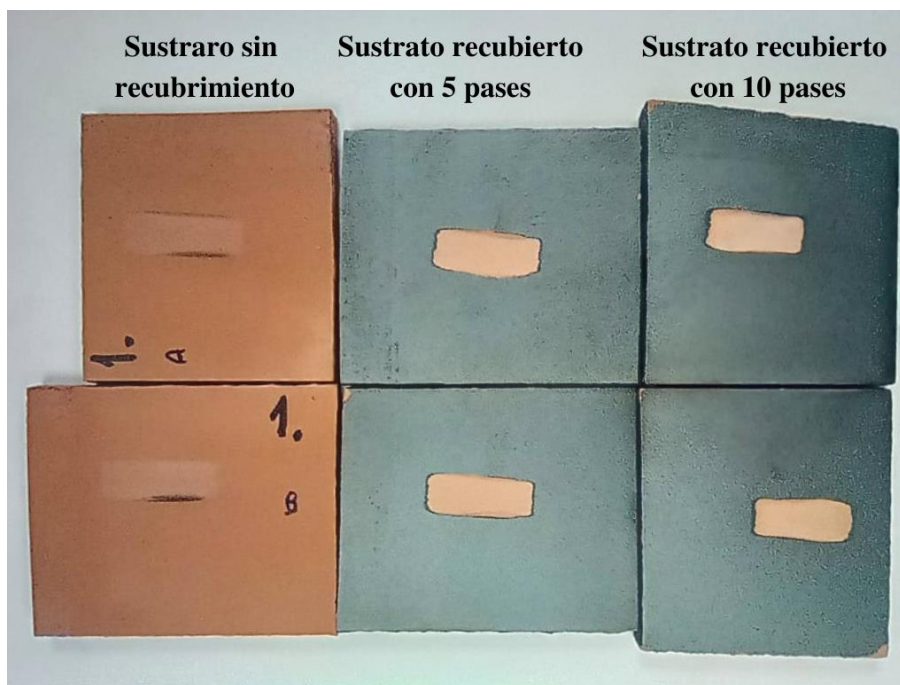


Figura 47. Imágenes de las huellas de abrasión profunda en las muestras sin y con recubrimiento.

En la Figura 47, se observan las muestras después de ser sometidas al ensayo de resistencia a la abrasión profunda, donde se aprecia la hendidura generada por el disco rotatorio o las huellas para el sustrato como para las muestras recubiertas a 5 y 10 pases de proyección, en la cual se refleja la diferencia de la dimensión de las hendiduras, infiriéndose cualitativamente que la longitud de la huella es menor en el recubierto con 10 pases, lo anterior se confirma de manera cuantitativa con los datos reportados en la Tabla 7, donde se aprecia que tanto la longitud como el volumen promedio removido de la muestra es menor para la muestra recubierta con los 10 ciclos.

Tabla 7.*Resultados de la abrasión profunda en las muestras*

Muestra	Longitud de huella promedio (mm)	Volumen promedio removido (mm³)
Sustrato	29,8 ± 0,7	221,3 ± 15,6
5 pases	25,2 ± 0,7	134,2 ± 11,0
10 pases	22,7 ± 0,5	97,6 ± 6,5

Por lo anterior, la muestra recubierta con 10 pases de proyección es la que presenta mayor grado de cohesión interna de las partículas, sirviendo de barrera protectora al desgaste, donde se infiere que el recubrimiento de magnetita protege al sustrato del desgaste por abrasión hasta en un 39% para 5 pases y en un 56% para 10 pases

El comportamiento anterior, se asemeja a lo reportado por (Araque Pabón, Peña Rodríguez, & Vargas Galvis, 2015). En donde al comparar el volumen de las huellas del sustrato con las muestras recubiertas, menciona que la alúmina protege al sustrato del desgaste por abrasión hasta en un 80%, por otra parte según el trabajo de (Peña Rodríguez, Dulce Moreno, & Vargas Galvis, 2018), quienes realizaron recubrimientos de óxidos de titanio sobre sustratos cerámicos por la misma técnica, encontraron que las muestras con recubrimiento protegen del desgaste hasta en un 65% al sustrato, luego la técnica de proyección por llama tanto de magnetita como de alúmina y dióxido de titanio ofrece protección contra el desgaste a las tabletas de cerámica de arcilla roja.

5.5. Resultados y análisis de la caracterización mecánica

5.5.1. Evaluación de la resistencia a la flexión del sustrato y recubrimientos

En la Tabla 8 y Figura 48, se muestran los resultados de la resistencia mecánica a la flexión, donde se encontró que la muestra recubierta aumentó su resistencia a la flexión o módulo de rotura en un 13,8% y 16,0% respectivamente para las muestras recubiertas con cinco y diez

pases de proyección en comparación con el valor de la muestra sin recubrir (sustrato cerámico). El comportamiento anterior es similar al reportado por Peña Rodríguez et al. (2017) y Araque Pabón et al. (2015), quienes encontraron que la resistencia mecánica a la flexión de cerámicas recubiertas con dióxido de titanio y alúmina por esta misma técnica de proyección, se incrementa para las muestras con recubrimiento.

Tabla 8.

Resultados de la resistencia mecánica a la flexión de las muestras sin y con los recubrimientos.

Muestra	Resistencia máxima a la flexión N/mm²
Sustrato cerámico	10,41 ± 4,4
sustrato recubierto con 5 pases	11,85 ± 2,8
Sustrato recubierto con 10 pases	12,08 ± 0,3

El comportamiento anterior se puede explicar por dos causas probables, la primera, debido a los esfuerzos de compresión generados en la superficie del sustrato cerámico durante la deposición de partículas, que pueden tener la capacidad de mitigar parcialmente esfuerzos tensiles que provocan en el ensayo de flexión la fractura del material. (Araque Pabón, Peña Rodríguez, & Vargas Galvis, 2015), la segunda se debe a que la aplicación del recubrimiento sella casi todas las irregularidades presentes en el mismo, aumentando la resistencia a la generación de fisuras, las cuales son la causa principal de las grietas en la superficie sometida a tensión durante el ensayo. Según lo anterior, se puede deducir que las partículas de magnetita lograron adherirse perfectamente con la superficie del sustrato cerámico y sellar los poros e irregularidades propias del sustrato, lo anterior se confirma con los resultados de la morfología del recubrimiento ya que se evidenció que en la zona del recubrimiento las partículas se

fundieron y se obtuvo un óptimo anclaje mecánico, lo cual favorecen las propiedades mecánicas de resistencia a la flexión de los sustratos.

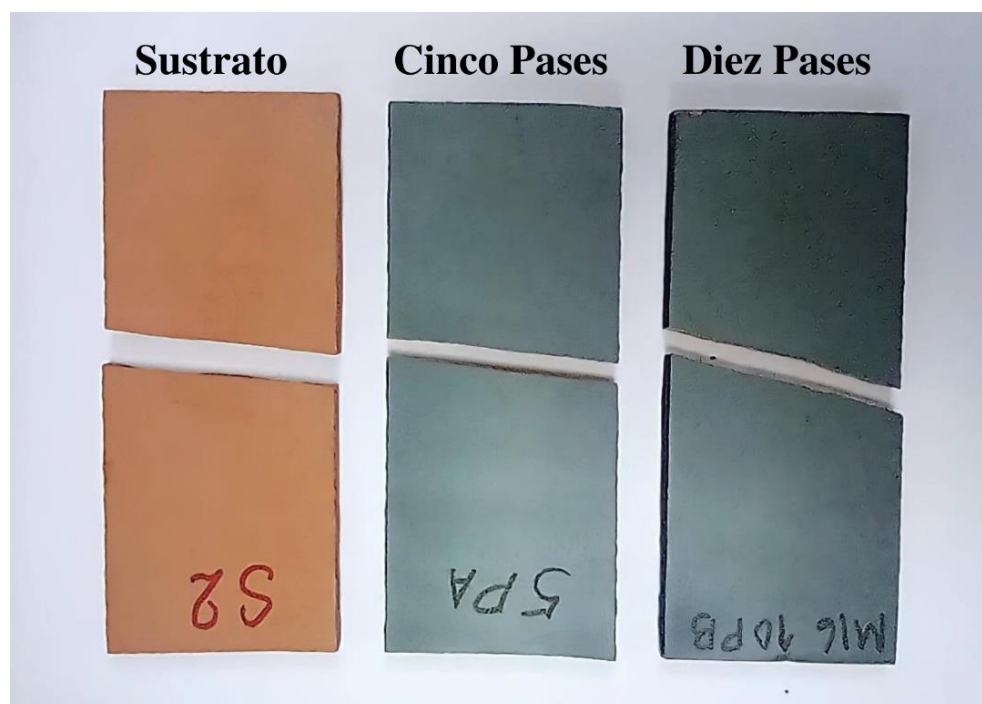


Figura 48. Imágenes de las muestras después de someterse al ensayo de flexión.

5.6 Resultados y análisis de la caracterización térmica

5.6.1. Evaluación de las propiedades térmicas de las muestras con y sin recubrimiento

Las propiedades térmicas como conductividad y efusividad son propiedades fundamentales de los materiales. (Popov, Beardsmore, Clauser, & Roy, 2016). La efusividad térmica o también denominada como coeficiente de contacto por algunos autores (Boeker & Grondelle, 1999). Según (Marin, 2006) “Describe la capacidad de cierto material de intercambiar energía térmica con el medio ambiente”. Por otro parte, el coeficiente de conductividad térmica (K), es una medida de la cantidad de calor que fluye en un material por unidad de área tiempo y gradiente de temperatura (Ramakrishna, Bharti, Nithya, Kusuma, & Singh, 2012).

En la Tabla 9, se muestran los resultados de la efusividad y la conductividad térmica del sustrato cerámico, mientras que estos parámetros para las muestras recubiertas a 5 y 10 ciclo se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 9.

Efusividad y conductividad térmica de los sustratos.

Sustrato	Efusividad $W\sqrt{s}/(m^2)K$	Conductividad (W/mK)
Test 1	756	0,24
Test 2	768	0,25
Test 3	768	0,25
Test 4	767	0,25
Test 5	765	0,25
Promedio	$764,8 \pm 5,07$	$0,25 \pm 0,004$

Tabla 10.

Efusividad y conductividad térmica de los recubrimientos para cinco ciclos.

Recubrimientos con 5 pases	Efusividad $W\sqrt{s}/(m^2)K$	Conductividad (W/mK)
Test 1	978	0,33
Test 2	1007	0,34
Test 3	1022	0,34
Test 4	1022	0,34
Test 5	1031	0,35
Promedio	$1012 \pm 20,9$	$0,32 \pm 0,007$

Tabla 11.

Efusividad y conductividad térmica de los recubrimientos para diez ciclos.

Sustrato con 10 Pases	Efusividad $W\sqrt{s}/(m^2)K$	Conductividad (W/mK)
Test 1	913	0,3
Test 2	957	0,32
Test 3	966	0,32
Test 4	986	0,33
Test 5	994	0,33
Promedio	$963,2 \pm 31,8$	$0,34 \pm 0,012$

Una tendencia actual es la búsqueda de materiales más eficiente en el aspecto térmico, en unos casos se pretende disminuir la conductividad térmica del material, y en otros aumentar la conductividad en los materiales cerámicos. (Instituto Valenciano de la edificación, 2006). La composición de los materiales cerámicos, específicamente las fases cristalinas y el porcentaje de fase vítrea influyen sobre la conductividad térmica del material (Gilabert, Zumaquero, Machí, & Gómez, 2014). Es decir, la conductividad térmica depende la estructura atómica interna (Holman, 1998).

La Figura 49, muestra un diagrama de cajas y bigotes elaborado a partir de los resultados de la conductividad térmica de las tres muestras ensayadas. En ésta, se observa que las muestras con recubrimiento de magnetita obtienen resultados más altos en la conductividad térmica en comparación al sustrato cerámico, lo cual era de esperarse, pues la conducción de calor en la fase metálica es mayor que en la cerámica donde la primera es vía electrónica y en la segunda es fonónica (Fernández Rojas, Fernández Rojas , Salas, García, & Marínero, 2008).

No obstante, se debe tener en cuenta otros factores que inciden en el valor de la conductividad térmica como la humedad y porosidad en el material estudiado (Zhang & Wang, 2017), ya que un incremento en las dimensiones o tamaños de los poros trae consigo un decrecimiento significativo de la conductividad térmica (Vincent, Silvain, Heintz, & Chandra, 2012), puesto que los poros pueden contener fluidos, que actúan como barreras al flujo de calor (Ariza, Aguirre, Quesada, Abril, & García, 2016). Lo cual es consecuente con la morfología estudiada ya que el recubrimiento de magnetita tuvo una gran adherencia y un alto de grado de fusión de las partículas del recubrimiento, que permitió reducir el porcentaje de porosidad en la superficie de la muestra.

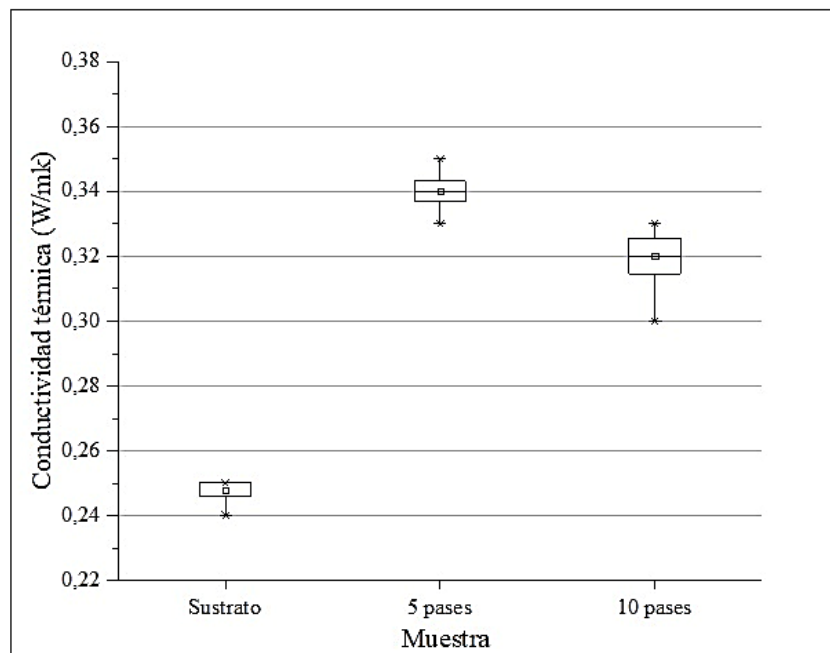


Figura 49. Diagrama de cajas y bigotes de las conductividades térmicas del sustrato y de los recubrimientos.

5.7 Resultados y análisis de la caracterización eléctrica

5.7.1 Conductividad eléctrica del recubrimiento

En la Tabla 12, se muestran los resultados correspondientes a la resistividad y a la conductividad eléctrica del recubrimiento.

Tabla 12.

Resultados de la resistividad y a la conductividad eléctrica del recubrimiento.

Distancia	Resistencia promedio (Ω)	Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)
2 cm	36,54	0,0371
3 cm	42,32	0,0287
4 cm	47,19	0,0240
5 cm	60,85	0,0247
Promedio	46,72	0,0286
Conductividad promedio del recubrimiento (S/cm)		34,94

Estos resultados no se pueden comparar con los valores de estos parámetros con los de los metales sólidos dado que los recubrimientos son de espesores micrométricos y con una morfología regular no homogénea, donde incluyen porosidades, fronteras de grano, lo cual afecta el transporte de los portadores de carga a través de esto. Por otro lado, se debe tener en cuenta las características del material utilizado, el hematite, wüstite, y magnetita son semiconductores (Cornell, The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences, and uses, 2003).

La característica principal de un semiconductor es que la separación entre la banda de valencia de los orbitales y la banda de conducción sea menor de 5 Ev. La conductividad de la magnetita es casi metálica con valores que oscilan entre $10^2 - 10^3 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Por tanto, como se puede observar el recubrimiento tiene la capacidad de conducir electricidad a diferencia del sustrato cerámico, lo que posibilita diversas aplicaciones tecnológicas como la generación de cerámicos con la implantación de sensores en su superficie, ya sean sensores de temperatura, de movimiento, de luz y entre otros. (García L. , 2013).

5.8 Tratamiento estadístico

En esta sección se analizó la influencia del recubrimiento de cinco y diez pases sobre el sustrato cerámico, creando una prueba de hipótesis básica.

Hipótesis nula (H_0) = El promedio de las propiedades tecnológicas del sustrato, del recubrimiento con cinco pases y del recubrimiento con diez pases es igual.

$$\mu_{\text{sustrato}} = \mu_{5\text{pases}} = \mu_{10\text{pases}}$$

$$\text{Hipótesis alternativa } (H_1) = \mu_{\text{sustrato}} \neq \mu_{5\text{pases}} \neq \mu_{10\text{pases}}$$

A continuación, se muestran las gráficas en las que se relacionan el tipo de muestra ensayada con el respectivo promedio en las propiedades tecnológicas junto a su error estadístico.

En la Figura 50, se aprecia la relación de la conductividad térmica de la muestra y de la

efusividad en función del tipo de muestra. En lo cual se confirma la hipótesis relativa, $\mu_{\text{sustrato}} \neq \mu_{5\text{pases}} \neq \mu_{10\text{pases}}$, no obstante. Por otra parte, se aprecia un cambio significativo de la conductividad térmica del sustrato sin recubrimiento con los sustratos con recubrimiento.

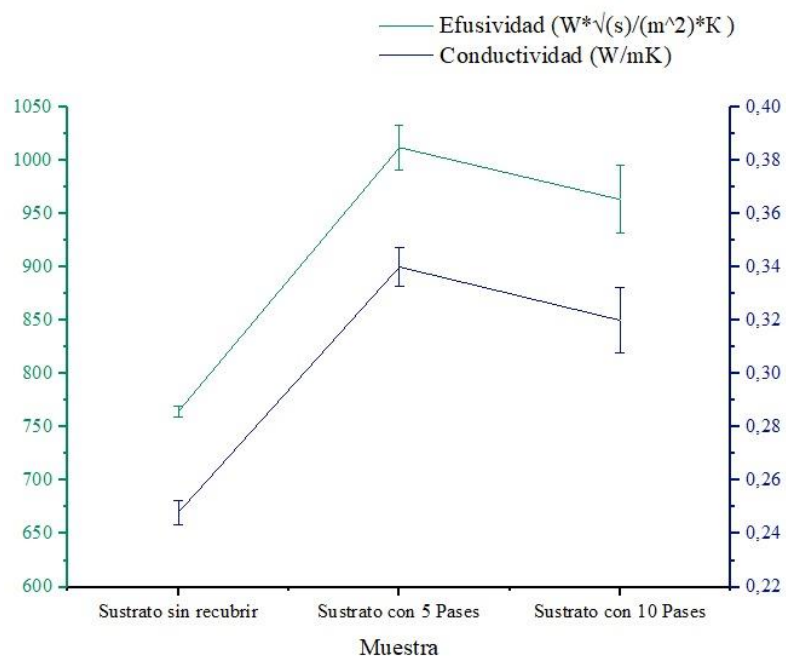


Figura 50. Relación de la conductividad térmica y la efusividad en función del tipo de muestra

Por otra parte, en las propiedades de resistencia a la flexión y a la abrasión profunda se evidencia que la media de los distintos tipos de muestras es diferente, es decir la hipótesis alternativa fue aceptada. En la figura 51, se observa que a mayor cantidad de pases existe menor desgaste por abrasión profunda. Por el contrario, un incremento de la resistencia a la flexión a mayor cantidad de pases. De lo anterior se deduce que el recubrimiento de diez pases presenta mejores propiedades mecánicas, térmicas y tribológicas y si existe relación con las propiedades tecnológicas.

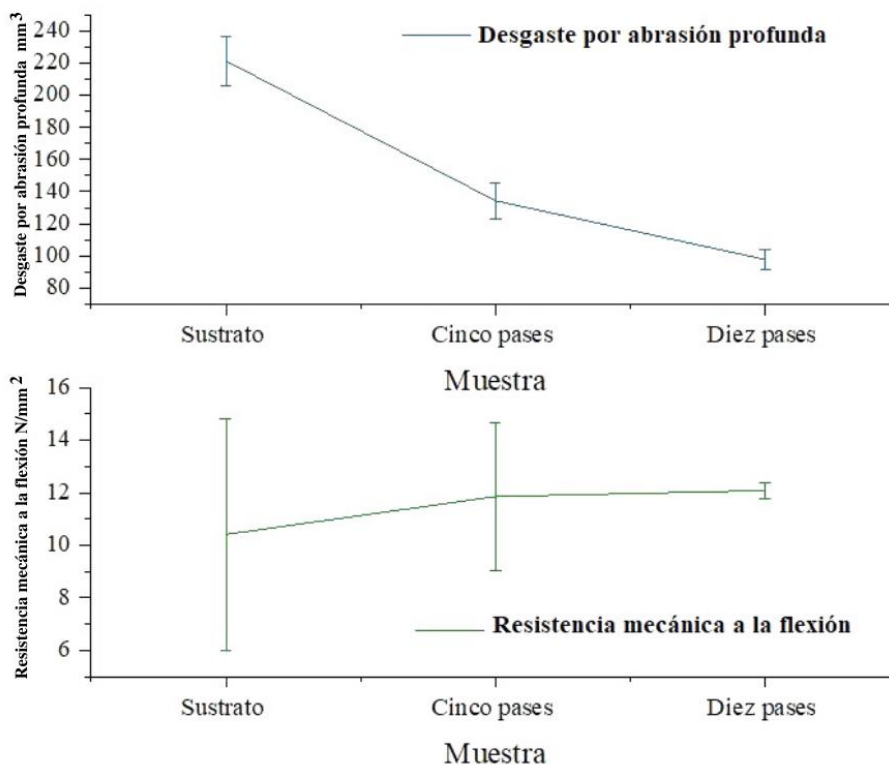


Figura 51. Relación del desgaste por abrasión y la resistencia mecánica a la flexión en función del tipo de muestra

En la Tabla 13, se observa el módulo de ruptura por flexión, volumen medio de huella por abrasión profunda, del sustrato y de los dos recubrimientos de magnetita

Tabla 13.

Módulo de ruptura por flexión, volumen medio de huella por abrasión profunda, del sustrato y de los dos recubrimientos de magnetita

Muestra	Abrasión profunda (mm ³)	Módulo de rotura (N/mm ²)	Conductividad térmica (W/mK)	Efusividad (W√(s)/(m ²).K)
Sustrato	221,3 ± 15,6	10,41 ± 4,4	0,25 ± 0,004	764,8 ± 5,07
5 pases	134,2 ± 11,0	11,85 ± 2,8	0,32 ± 0,007	1012 ± 20,9
10 pases	97,6 ± 6,5	12,08 ± 0,3	0,34 ± 0,012	963,2 ± 31,8

5.9 Socialización de los resultados

La socialización de resultados se realizó mediante ponencias en diversos eventos de investigación tanto a nivel regional, nacional e internacional, se tuvo participación en el evento

denominado V Workshop do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da UFPI / 4o Ciclo de Minicursos em Materiais, realizado em dos dias 27/09/2021 a 01/10/2021, via Webnário por la Universidad Federal do Piauí ubicada en Brasil. Donde se dio a conocer los resultados obtenidos a partir de la elaboración de los recubrimientos de polvo de magnetita sobre los sustratos cerámicos, en el cual se obtuvo mención honorifica como mejor trabajo de pregrado.

Así mismo, se realizaron otras participaciones en calidad de ponentes en los eventos denominados; VII encuentro departamental de semilleros de investigación modalidad virtual, en el nodo Norte de Santander del año 2021, el XXIV encuentro nacional y XVIII encuentro internacional de semilleros de investigación - fundación RedCOLSI que tuvo lugar del 2 al 5 de noviembre del 2021, Así también se participó en el III Encuentro Interinstitucional de Semilleros de Investigación, desarrollado en el marco de la 6ta Semana Internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación organizada por la Universidad Francisco de Paula Santander del año 2019 en San José de Cúcuta, y también en el V encuentro regional de semilleros de investigación, nodo Norte de Santander, realizado en la universidad de pamplona en el año 2019, evento desarrollado en Pamplona y el XXII encuentro nacional y XVI internacional de semilleros de investigación organizado por la red colombiana de semilleros de investigación- RedCOLSI realizado en la ciudad de Valledupar del año 2019.

6. Conclusiones

Se aplicó la técnica de proyección térmica por llama para generar recubrimientos de magnetita sobre sustratos de arcilla roja. Los parámetros utilizados para la obtención de los recubrimientos, se obtuvieron a partir de la literatura y de la experiencia de los investigadores que participaron en su elaboración, la variable que se manejó fue el número de pases con el fin de obtener diferentes espesores.

Mediante micrografías obtenidas con MEB, se evidenció una óptima adherencia del recubrimiento debido a la porosidad y a la rugosidad que caracteriza al sustrato. Así mismo el tamaño de partícula del polvo y los parámetros escogidos para la elaboración de los recubrimientos permitieron que la partícula tuviera buena interacción con la llama, por lo que se obtuvo un recubrimiento uniforme donde la mayor cantidad de partículas se fundieron formando splats en forma de flor sobre el sustrato.

El espesor del recubrimiento depende del número de pases, cuando las primeras partículas llegan al sustrato completamente fundidas, éstas se adhieren al sustrato, formando un recubrimiento uniforme el cual recibe los pases siguientes generando un mayor espesor en cada pase.

Los resultados del DRX permitieron cuantificar las fases cristalinas, la magnetita con un 75%, la hematita con un 5,5% y la wuestite con un 19,5%, y que estas fases están presentes tanto en el polvo como en el recubrimiento.

Se obtuvieron buenos resultados mejorando las propiedades mecánicas y tribológicas, los resultados del ensayo de resistencia a la abrasión profunda demostraron que la tasa de desgaste fue menor en los recubrimientos que en el sustrato, especialmente en los recubrimientos elaborados con diez pases de proyección indicando buenas propiedades para aplicaciones anti-desgaste. Por otra parte, la resistencia a la flexión de las baldosas cerámicas recubiertas

incrementó hasta un 13,8 % para 5 pases 16,0% para 10 pases, respecto al sustrato sin recubrir. Por lo anterior se infiere que a mayor espesor de la capa de recubrimiento el sustrato presenta mayor protección al desgaste y mayor resistencia mecánica a la flexión.

De acuerdo con los resultados de la conductividad y efusividad térmica se concluye que el sustrato recubierto con cinco pases de recubrimiento presentó 5,89% más de conductividad térmica efectiva que el de diez pases, lo cual se traduce en un porcentaje de porosidad mayor en el recubrimiento de diez pases, ya que la porosidad produce una disminución en la conductividad térmica.

La aplicación de los recubrimientos de magnetita sobre los sustratos cerámicos aportó un valor agregado en la estructura, color, textura y demás cualidades sensoriales, el cual de manera cualitativa se concluyó que tiene potencial para ser utilizado con fines decorativos, en consecuencia, el desarrollo del presente trabajo de investigación logró transformar materias primas existentes en un nuevo material con nuevas funciones técnicas y sensoriales

Los resultados de la caracterización morfológica, estética, tribológica, mecánica y térmicas de los recubrimientos mejoraron en comparación a los sustratos, así mismo cabe destacar que los recubrimientos elaborados con diez pases de proyección fueron superiores en relación al de cinco pases. En consecuencia, se puede afirmar que el espesor del recubrimiento de magnetita optimiza las propiedades tecnológicas del sustrato cerámico, dando respuesta a la pregunta problema planteada en la investigación.

En general, se concluye que los recubrimientos de magnetita son buenos candidatos para ser usados en diversas aplicaciones tecnológicas propias conferidas por las propiedades de la magnetita, por otra parte, el proyecto se puede considerar como punto de partida en el análisis de recubrimientos elaborados a partir de óxidos sobre materiales cerámicos, además de la búsqueda de otras posibles aplicaciones de este tipo de material.

7. Recomendaciones

Los resultados han mostrado que el aplicar un recubrimiento metálico a un sustrato cerámico de arcilla roja, le da un valor agregado muy grande mejorando sus propiedades mecánicas, eléctricas, tribológicas y estéticas entre otras. Este trabajo abre una gran oportunidad para nuevas investigaciones que busquen mejorar las propiedades físicas y químicas a cerámicas de arcilla roja, con este fin se recomienda:

Estudiar el efecto de la porosidad de los recubrimientos en la conductividad térmica, propiedades mecánicas y tribológicas del material. Así mismo se recomienda evaluar las propiedades magnéticas propias del recubrimiento para posibles aplicaciones tecnológicas.

Hacer nuevos ensayos de conductividad térmica en función del espesor de los recubrimientos, es decir obtener recubrimientos de diferentes espesores y llegar a encontrar un modelo matemático que describa la relación entre las propiedades térmicas y espesor.

El proyecto demostró que el recubrimiento de magnetita tiene la capacidad de mejorar las propiedades tribológicas, mecánicas, térmicas, estéticas y eléctricas evaluadas, por lo que es importante la realización de recubrimientos con otros óxidos metálicos fomentando así la investigación en la línea de investigación de proyección térmica y la mejora a los sustratos cerámicos de la región.

8. Lista de referencias

- Abello Linde. (2002). *Proyección térmica de superficies*. España: Linspray.
- Acuña, S. M., Moreno, C. M., & Espinosa, E. J. (2017). Evaluation of tribological wear and corrosion in coatings of diamalloy 4060NS deposited by thermal spray. *Journal of Physics: Conference Series*, 935. doi:10.1088/1742-6596/935/1/012018
- Agredo Diaz, D., Ortiz Godoy, N., Barba Pingarrón, A., González Parra, J., Valdez Navarro, R., & Olaya Florez, J. (2020). Efecto del sustrato en las propiedades de recubrimientos de Zn-Al depositados por proyección térmica sobre fundición nodular, aceros generados por manufactura aditiva y ABS. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*(7), 33-39.
- Araque Pabón, M., Peña Rodríguez, G., & Vargas Galvis, F. (2015). Desempeño mecánico y tribológico de baldosas cerámicas de arcilla roja recubiertas por proyección térmica a partir de alúmina. *Tecno Lógicas*, 8(35), 125-135.
- Ariza, M., Aguirre, D., Quesada, A., Abril, A., & García, F. (2016). ¿Lana o metal? Una propuesta de aprendizaje por indagación para el estudio de las propiedades térmicas de materiales comunes. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), 297-311.
- Azevedo, A. R., França, B. R., Alexandre, J., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., & Xavier, G. C. (2018). Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. *Journal of Building Engineering*, 19, 342–348. doi:10.1016/j.jobbe.2018.05.026
- Barba, A., Beltrán, V., Feliu, C., Gracia, J., Gines, F., Sánchez, E., & Sanz, V. (1997). *Materia primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Castellón: España.
- Bayle, A., Honold, E., & Skau, E. (1958). Topochemical mechanisms involved in the preparation and deacetylation of partially acetylated cottons. *Textile Research Journal*, 28(10), 861-873.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José de Costa Rica.: (IICA, Ed.).
- Boeker, E., & Grondelle, R. (1999). *Environmental Physics*. Wiley.
- Bolio Lopez, G., Valdez Gonzalez, A., Veleza, L., & Andreeva, A. (2011). WHISKERS DE CELULOSA A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE BANANO: OBTENCION Y CARACTERIZACION. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 291-299.
- Cadavid Iglesias, E., Parra Velásquez, C., & Vargas Galvis, F. (2016). Estudio de llamas oxiacetilénicas usadas en la proyección térmica. *Revista Colombiana de Materiales*(9), 15-26.

- Cadavid, E., Parra, C., & Vargas, F. (2017). Estudio termo-físico de llamas oxiacetilénicas utilizadas en la proyección térmica. *Revista Colombiana De Materiales*.
- Cámara de comercio de Cúcuta. (s.f.). *Camara de comercio Cúcuta*. Recuperado el 24 de Mayo de 2021, de <https://www.cccucuta.org.co/secciones-51-s/datos-geograficos.htm>
- Camargo, N. (2016). *Análisis de la competitividad regional en Colombia, un enfoque desde las comisiones regionales de competitividad*. Universidad de La Salle, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Bogotá. Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/>
- Cañon, D. G. (2015). Estructura cristalina. *Ingeniería de Los Porcesos de Fabricación.*, 1-21.
- Cárcamo Ambrosio, E. (2007). *NORMAS Y CONTROL DE CALIDAD DEL PISO CERÁMICO EN PRODUCTO TERMINADO*. Trabajo de grado, Guatemala.
- Cardenas Flechas, L. J., & Fuentes Mojica, J. D. (2014). *Diseño e Implementación de un equipo de recubrimiento por Spray Térmico*. Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Ingeniería electromecánica, Duitama.
- Cardona, R., & Vargas, F. (2019). Desarrollo de recubrimientos a partir de silicato de zirconio de origen mineral mediante proyección térmica por llama oxiacetilénica para aplicación sobre ladrillos refractarios. *TecnoLógicas*, 22(44), 97-110. doi:10.22430/22565337.1185
- Castaño, J., & Arroyave, C. (1998). La funcionalidad de los óxidos de hierro. *Revista de Metalurgia*, 34(3), 274-280.
- Clavijo, J. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Revista Elementos*(3), 133-146.
- Conductividad eléctrica aspectos teóricos. (2014). *Quimica*, 1-3.
- Connor, N. (08 de 01 de 2020). *¿Qué es la resistencia térmica? Resistividad térmica: definición*. Obtenido de thermal engineering: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-resistencia-termica-resistividad-termica-definicion/>
- Cornelis, K., & Cornelius, S. (1996). *Manual de mineralogía* (cuarta edición ed., Vol. 1). reverté.
- Cornell, R., & Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses* (Second ed.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Corporación Nueva Sociedad de la Región Nororiental de Colombia. (Abril de 2010). *CONSORNOC*. Obtenido de <http://consornoc.org.co/wp-content/uploads/2014/11/cartilla-cucuta.pdf>
- Cruz, P., Figueiredo, B., Carvalho, J., & Campos, T. (2020). Additive Manufacturing of Ceramic Components for Façade Construction. *JOURNAL OF FACADE DESIGN & ENGINEERING*, 8(1), 1-20. doi:10.7480/jfde.2020.1.4725

- C-Therm Technologies Ltd. (2021). *Tridente. 1 instrumento, 3 métodos de conductividad térmica*. Recuperado el 2 de mayo de 2021, de C-therm: <https://ctherm.com/thermal-conductivity-instruments/trident/>
- C-therm Tecnologías. (s.f.). *Modified Transient Plane Source (MTPS): Theory of Operation*. Recuperado el 10 de Mayo de 2021
- Davis, J. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Ohio: ASM International.
- Díaz, J., Sánchez, J., & Prato, J. (2016). Energy-Environmental Diagnosis of the Ceramic Sector Companies in the Metropolitan Area of Cucuta, Norte de Santander, Colombia. *Key Engineering Materials*.
- Direct Industry by virtualexpo group. (2022). Difractómetro de rayos X X'Pert MRD / XL. Recuperado el 12 de Marzo de 2022, de <https://www.directindustry.es/prod/malvern-panalytical/product-14669-1931717.html>
- Facultad Tecnológica laboratorios y talleres de mecánica. (2016). *Ensayo de Flexión*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Fauchais, P., Heberlein, J., & Boulos, M. (2014). *Thermal Spray Fundamentals From Powder to Part*. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. doi:10.1007/978-0-387-68991-3
- Fernández Rojas, F., Fernández Rojas, C., Salas, K., García, V., & Marínero, E. (2008). Conductividad térmica en metales, semiconductores, dieléctricos y materiales amorfos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(3).
- Ferrazzo, S., Bragagnolo, L., & Korf, E. (2020). Caracterização tecnológica e reaproveitamento de rejeitos de magnetita em misturas asfálticas e concreto – uma revisão. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 1(21). doi:10.5327/z2176-947820190512
- Ferrer, M. Y., Moreno, C. M., & Vargas, F. (2018). *Recubrimientos de circonita y alúmina por proyección térmica con llama: parámetros para obtener recubrimientos de alto punto de fusión*. Tunja: UPTC.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., & Hämmerle, C. (2009). Investigación cerámicas de recubrimiento. *Quintessence técnica*, 20(8), 446-453.
- Freiburga, D., Biermann, D., Peuker, A., Kersting, P., Maier, H., Möhwald, K., . . . Otten, M. (2014). Development and Analysis of Microstructures for the Transplantation of Thermally Sprayed Coatings. *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014, 14*, 245 – 250. doi:10.1016/j.procir.2014.03.054
- García, F., & Cuetos, J. (2001). *Recubrimientos de Proyección por Plasma*. Universidad de Oviedo, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, España.

- García, L. (2013). *Magnetita en el cuerpo humano: consecuencias potenciales y caracterización básica de la Magnetita biogénica nanométrica*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gelves, J., Monroy, R., Sánchez, J., & Ramirez, R. (2013). Estudio comparativo de las técnicas de extrusión y prensado como procesos de conformado de productos cerámicos de construcción en el Área Metropolitana de Cúcuta. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(1), 48-54. doi:10.3989/cyv.62013
- Ghazanfari, M., Kashefi, M., Shams, S., Shams, S., & Jaafari, M. (2016). Perspective of Fe₃O₄ Nanoparticles Role in Biomedical Applications. *Biochemistry Research International*, 1–32. doi:10.1155/2016/7840161
- Gilabert, J., Zumaquero, E., Machí, C., & Gómez, M. (2014). Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria. *técnicas de LABORATORIO*, 728(397).
- Girão, A. V., Caputo, G., & Ferro, M. C. (2017). Application of Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS). *Comprehensive Analytical Chemistry*, 153–168. doi:10.1016/bs.coac.2016.10.002
- Girrotto, E., & Santos, I. (2002). Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuálas corretamente. *Quím. Nova*, 25(4). doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000400019>
- González, A. G. (2008). *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*. Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería, Medellín.
- Gonzalez Cano, L. F., & Fajardo Tolosa, F. E. (2017). *Síntesis y caracterización de un material cerámico compuesto por óxido de magnesio y magnetita*. Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá.
- Grainger, S., & Blunt, J. (1998). *Engineering Coatings*. Abington Publishings.
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), 163-173. doi:10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173
- Guillen Linares, F. (2021). *Evaluación de las variables óptimas en la reducción de óxidos de cobre por la adición de arrabio en hornos de limpieza de escoria*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Heiman, R. (2010). *Clasic and Advanced Ceramics*. Wienheim, Germany: Wiley - VCH Verlag.

- Hernandez Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación. En R. Hernandez Sampieri, C. Fernández Collado, & P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación* (6 ed., pág. 634). México: McGraw-Hill.
- Hodoroaba, V. (2019). Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS). *Caracterización de nanopartículas: procesos de medición de nanopartículas*, 397–417. doi:10.1016/B978-0-12-814182-3.00021-3
- Holman, J. (1998). *Transferencia de calor* (Octava ed., Vol. 7). Madrid: Mc graw hill.
- Huerta Rosales, C. (2020). *Aplicación del software ImageJ en el análisis de imágenes para la estimación de la granulometría en un cauce fluvial*. Tesis de Pregrado, UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, Lima.
- Hurtado Hurtado, F. M. (2019). *Desarrollo de recubrimientos nanoestructurados de Al_2O_3 y $Al_2O_3-TiO_2$ depositados mediante proyección térmica oxiacetilénica, como una posible alternativa para la sustitución del cromoduro*. Tesis de Mestría, Universidad de Antioquia, Departamento de Materiales, Medellín.
- I.I.M. – U.M.S.N.H. (s.f.). 2. CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE DESGASTE. En *Tribología y Desgaste de Materiales* (págs. 23-47). Recuperado el julio de 2021, de <https://fim.umich.mx>
- Instituto Valenciano de la edificación. (2006). *Guía de la baldosa cerámica*. Valencia.
- Instituto de promoción cerámica. (s.f.). *Resistencia a la abrasión superficial*. Recuperado el julio de 2021, de www.ipc.org.es
- Jadhav, S., & Patil, S. (2014). Facile synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles and their characterization. *Frontiers of Materials Science*, 8(2), 193–198. doi:10.1007/s11706-014-0249-5
- JEOL Serving Advanced Technology. (s.f.). *JSM-6490 series Scanning Electron Microscopes*. Recuperado el 11 de Marzo de 2022, de [SM-6490LA/JSM-6490A/JSM-6490LV/JSM-6490](http://www.jeol.com/Products/SEM/JSM-6490LA/JSM-6490A/JSM-6490LV/JSM-6490)
- Karana, E. H. (2009). Meanings of materials through sensorial properties and manufacturing processes. *Materials and Design*, 30(7). doi: 10.1016/j.matdes.2008.09.028.
- La Opinión*. (28 de Enero de 2020). Recuperado el 24 de Mayo de 2021, de <https://www.laopinion.com.co/economia/poblacion-de-cucuta-crecera-777000>
- Lima, R. (1999). *Effect of chemical composition on the electrokinetic properties and floatability of chromite*. Tesis doctorado, Tohoku University, Japón.
- Manish, R. (2015). *Thermal Sprayed Coatings and their Tribological Performances*. IGI Global.

- Marin, E. (2006). Thermal physics concepts: the role of the thermal effusivity. *The Physics Teacher*, 44(7), 432-434.
- Marulanda Arévalo, J., Trisancho Reyes, J., & Gonzáles B, H. (2014). La tecnología de recuperación y protección contra el desgaste está en el rociado térmico. *Prospect*, 12(1), 70-78. doi:10.15665/rp.v12i1.153
- Mejía Gómez, C. (2011). *METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MATERIALES Una aproximación desde la técnica y la sensorialidad*. UNIVERSIDAD EAFIT, Medellín.
- MELDIC una empresa CESMEC. (s.f.). Lineas DL de máquinas universales de ensayo. Santiago, Chile. Recuperado el 16 de Marzo de 2022
doi:10.12804/rev.univ.empresa.29.2015.07
- Noval, V., Ochoa Puentes, C., & Carriazo, J. (2017). Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 42-59. doi:10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831
- Ordóñez, C., & Sánchez, O. (2018). Caracterización química-morfológica del PM_{2,5} en Lima metropolitana mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). *Acta Nova*, 8(3), 397-420.
- Pacheco, M. Y., Téllez, C. M., & Galvis, F. V. (2018). *Recubrimientos de circonia y alúmina por proyección térmica con llama: parámetros para obtener recubrimientos de alto punto de fusión*. Tunja: UPTC.
- Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. (Second ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Peña Rodríguez, G., Dulce Moreno, H., Daza Ramírez, J., Orozco Hernández, S., & Vargas Galvis, F. (2017). Mechanical and tribological behavior of red clay ceramic tiles coated with fly ash powders by thermal spraying technique. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Peña Rodríguez, G., Dulce Moreno, J., & Vargas Galvis, F. (2018). Recubrimientos de TiO₂ sobre sustratos de arcilla roja usando proyección térmica oxiacetilenica. *Rev. LatinAm. Metal. Mat*, 38(1), 43-52.
- Piedra, E. (2007). *Estudio y desarrollo de recubrimientos proyectados térmicamente-aplicación como elementos protectores*. Avance de tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10), 4179-4207.

- Porras Amores, C., Santa Cruz Astorqui, J., Villoria Sáez, P., & Viñas Arrebola, C. (2019). Comportamiento térmico del yeso tradicional con residuos de construcción y demolición. *Dyna*, 94(4), 431-436. doi:http://dx.doi.org/10.6036/8983
- Posada, A. (2015). *Síntesis y caracterización de un material compuesto a base de polietileno de alta densidad y magnetita pulverizada*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Quixal, R. (2005). *Estética en ingeniería civil. Elementos de composición y situación actual*.
- Rakesh , K., & Santosh , K. (2018). International journal of engineering sciences & research technology thermal spray coating: a study 1. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 7(3), 610-617.
- Ramakrishna, D., Bharti, R., Nithya, M., Kusuma, K., & Singh, K. (2012). Medición de las propiedades térmicas de las granulitas intactas y meteoros seleccionadas y su relación con las propiedades de la roca. *Geofísica*, 77(3), D63-D73.
- Ramirez , I. (1921). *Industria cerámica moderna*. Colombia: SENA.
- Ramírez Delgado, P. (2012). La innovación tecnológica en las empresas del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta. *Respuestas*, 17(1), 66-77. doi:10.22463/0122820X.373
- Rodriguez, J. (2011). Tecnicas de difraccion y termogravimetria para la determinacion estructural de materiales. *Innovación y Experiencias Educativas*(39), 10. Obtenido de https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_39/JORGE_RODRIGUEZ_1.pdf
- Rosen, B.-G., Eriksson, L., & Bergman, M. (2016). Kansei, surfaces and perception engineering. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4(3). doi:10.1088/2051-672X/4/3/033001
- Ružić, J., Vilotijević, M., Božić, D., & Raić, K. (2012). Understanding plasma spraying process and characteristics of dc-arc plasma gun (PJ-100). *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, 18 (4), 273-282.
- Salán Ballesteros, M. (2005). *Tecnología de proceso y transformación de materiales* (Primera edición ed.). Barcelona: EDICIONS UPC.
- Sánchez Molina, J., Sarabia Guarín, A., & Alvarez Roza, D. C. (2016). Evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de baldosas de gres en el sector cerámico de Norte-de-Santander (Colombia). *Respuestas*, 21(2), 48-56.
- Saucedo Salazar, E., Perera Mercado, Y., Rodríguez Ruiz, F., & Arauz Villareal, A. (2014). Production of glass spheres from blast furnace slags by a thermal flame projection process. *Ceramics International*, 40(1), 1177-1182. doi:10.1016/j.ceramint.2013.07.002

- Shahid, M. K., & Choi, Y. (2019). Characterization and application of magnetite Particles, synthesized by reverse coprecipitation method in open air from mill scale. *ournal of Magnetism and Magnetic Materials*, 495(2020), 1-9. doi:10.1016/j.jmmm.2019.165823
- Shahid, M., Phearom, S., & Choi, Y. (2018). Synthesis of magnetite from raw mill scale and its application for arsenate adsorption from contaminated water. *Chemosphere*, 203, 90–95. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.03.150
- Soares, P., A.T., C., Carvalho, L. A., Laura, P., Coutinho, J., Ferreira, I., . . . Borges, J. P. (2016). Iron oxide nanoparticles stabilized with a bilayer of oleic acid for magnetic hyperthermia and MRI applications. *Applied Surface Science*, 383, 240-247. doi:10.1016/j.apsusc.2016.04.181
- Sunday, K., Hanejkob, F., & Taheria, M. (2017). Propiedades magnéticas y microestructurales de los compuestos magnéticos blandos en polvo de Fe recubiertos con Fe₃O₄. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 423, 164-170. doi:10.1016/j.jmmm.2016.09.024
- Tebble, R., & Craik, D. (1969). *Magnetic Materials*. London: Wiley-Interscience.
- Tejero, M., Rezvani, R., Hussain, T., & McDonald, A. (2019). Beyond Traditional Coatings: A Review on Thermal-Sprayed Functional and Smart Coatings. *J Therm Spray Tech*, 28, 598-644. doi:10.1007/s11666-019-00857-1
- Torres, E. A., Moreno, C. M., Pinto, M. L., Cárdenas, L. J., & Fuentes, J. D. (2016). Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 55-65.
- Vargas Galvis, F. (2010). *Élaboration De Couches Céramiques Épaisses À Structures Micrométriques Et Nanométriques Par Projections Thermiques Pour Des Applications Tribologiques*. Université de Limoges.
- Ventura León, J. (2017). ¿Población o muestra? *Revista Cubana de Salud Pública. Una diferencia necesaria*, 43(3), 648-649.
- Verona Gomes, M. N. (2016). *Desarrollo del compuesto nanométrico Fe₃Al-k en matriz de aluminio para recubrimiento depositado por proyección térmica dellama en polvo*. Tesis Doctoral, Universidad Federal de Paraná, Posgraduación en Ingeniería mecánica, Curitiba.
- Vincent, C., Silvain, J., Heintz, J., & Chandra, N. (2012). Effect of porosity on the thermal conductivity of copper processed by powder metallurgy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73(3), 499-504.
- Weschler, B., Lindsley, D., & Prewitt, C. (1984). *Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites (Fe_{3-x}TixO₄)* (Vol. 69). American Mineralogist.

- Winnefeld, F., Kaufmann, J., Hack, E., & Harzer, S. (2012). Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. *Construction and Building Materials*, 30, 426–438. doi:10.1016/j.conbuil
- Zhang, N., & Wang, Z. (2017). Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, 172–183.

Anexos

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer	Test Report		
	Report Generated on: 25-Mar-2022 14:14:14		
Test ID: CHERM27-427 Instrument: TH91-13-00644 Test Method: Liquids and Powders Default	Software Version: 4.0.4.0 Test started on: 25-Mar-2022 Performed by: Administrator User ID: ADMIN		
Project: SUSTRATO S2 Material: Distilled Water Material Lot: A1			

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	13:57:37	756	0.240	26.92	1.55	5,165.87
2	1	H271	14:01:16	768	0.250	26.75	1.54	5,163.15
3	1	H271	14:06:18	768	0.250	26.58	1.55	5,160.71
4	1	H271	14:07:30	767	0.250	26.56	1.54	5,161.46
5	1	H271	14:12:28	765	0.250	26.40	1.55	5,158.70

Notes:

Last Edited By:

Last Edited On:

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer	Test Report		
	Report Generated on: 25-Mar-2022 14:37:33		
Test ID: CHERM27-428 Instrument: TH91-13-00644 Test Method: Liquids and Powders Default	Software Version: 4.0.4.0 Test started on: 25-Mar-2022 Performed by: Administrator User ID: ADMIN		
Project: RECUBRIMIENTO MAG 5A Material: Distilled Water Material Lot: A1			

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	14:20:14	978	0.330	26.08	1.41	5,154.39
2	1	H271	14:24:28	1,007	0.340	25.93	1.38	5,152.96
3	1	H271	14:27:58	1,022	0.340	25.80	1.38	5,151.50
4	1	H271	14:32:21	1,022	0.340	25.64	1.37	5,149.53
5	1	H271	14:35:42	1,031	0.350	25.54	1.37	5,147.98

Notes:

Last Edited By:

Last Edited On:

C-THERM TCI™

Thermal Conductivity Analyzer

Test Report

Report Generated on: 25-Mar-2022 15:05:41

Test ID: C THERM27-430
Instrument: TH91-13-00644
Test Method: Liquids and Powders Default

Software Version: 4.0.4.0
Test started on: 25-Mar-2022
Performed by: Administrator
User ID: ADMIN

Project: RECUBRIMIENTO MAG 10A
Material: Distilled Water
Material Lot: A1

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W \cdot \sqrt{s}}{(m^2) \cdot K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	14:45:34	913	0.300	25.15	1.47	5,143.32
2	1	H271	14:50:00	957	0.320	25.12	1.44	5,143.33
3	1	H271	14:53:36	966	0.320	25.03	1.43	5,141.75
4	1	H271	14:58:24	986	0.330	24.90	1.42	5,140.11
5	1	H271	15:01:43	994	0.330	24.82	1.41	5,139.32

Notes:

Last Edited By:

Last Edited On: