



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales

***“EFECTOS DE LA DEGRADACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE UN
REFLECTOR DIFUSO DE REFUERZO PARA APLICACIONES
SOLARES”***

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA
DE MATERIALES

PRESENTA:

Violeta Ramírez Trejo

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

Director:

Mtro. Demetrio Fuentes Hernández

Co-director:

Dr. Damián Díaz Guzmán

Titular:

Dr. Felipe Legorreta García

Suplente

Mtra. Yaneth Rosario Olguín

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 28 de abril de 2026

Número de control: ICBI-D/868/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería de Materiales **Violeta Ramírez Trejo**, quien presenta el trabajo de titulación **"Efectos de la degradación del recubrimiento de un reflector difuso de refuerzo para aplicaciones solares"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Felipe Legorreta García

Secretario: Dr. Damián Díaz Guzmán

Vocal: M. en C. Demetrio Fuentes Hernández

Suplente: M. en C. Yaneth Rosario Olguín

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184

Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Contenido

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1.....	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 JUSTIFICACIÓN	12
1.3 HIPÓTESIS.....	14
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.4.1 <i>Objetivos Específicos</i>	15
CAPÍTULO 2.....	16
ANTECEDENTES	16
CAPÍTULO 3.....	21
MARCO TEÓRICO.....	21
3.1 <i>Técnicas de Caracterización</i>	21
3.1.1 <i>Difracción de Rayos X</i>	21
3.1.2 <i>Microcopia electrónica de barrido</i>	23
3.1.3 <i>Tamaño de cristalito ecuación de Scherrer</i>	24
3.1.4 <i>Espectroscopia de rayos x por dispersión de energía</i>	25
3.1.5 <i>Espectroscopia UV-Vis</i>	27
3.2 <i>Conceptos de estudio</i>	28
3.2.1 <i>Reflectancia difusa total</i>	28
3.2.2. <i>Dureza</i>	28
3.2.3 <i>Adherencia</i>	30
CAPÍTULO 4.....	31
METODOLOGIA.....	31
4.1 <i>Síntesis de (Al₂O₃)</i>	32
4.2 <i>Preparación del recubrimiento</i>	38
4.3 <i>Etapas de Caracterización</i>	41
CAPÍTULO 5.....	42

ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	42
5.1 Difracción de rayos X.....	42
5.2 Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía.....	44
5.3 Tamaño de cristalito	46
5.4 Microscopia electrónica de barrido	46
5.5 Caracterización de recubrimientos.....	49
5.5.1 Reflectancia difusa total.	49
5.5.2. Espectroscopía UV-Vis.....	52
5.5.3 Dureza y adhesión.....	53
5.7 Análisis tecnoeconómico	54
CONCLUSIONES.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	58

Índice de Figuras

Figura 1. Estrategia experimental.....	32
Figura 2. Latas de aluminio.	33
Figura 3 Recipiente de molino de cuchilla y tamiz de malla número 30.	34
Figura 4. Aluminio obtenido de latas de refresco.....	34
Figura 5. Preparación de solución alcalina de NaOH 2.5 M.	35
Figura 6. Solución de NaOH tras reaccionar con polvo de Al.....	35
Figura 7. Precipitado de color marrón retenido en el papel filtro.....	36
Figura 8. Solución traslúcida que atravesó el papel filtro.	36
Figura 9. Etapa final de filtrado.	37
Figura 10. Etapa de secado a 90°C durante 24 horas.....	37
Figura 11. Preparación del recubrimiento.	39
Figura 12. Aplicación del recubrimiento.....	40
Figura 13. Etapa de secado del recubrimiento aplicado.....	40
Figura 14. DRX de α -alúmina sintetizada.....	42
Figura 15. DRX de α -alúmina comercial.	43
Figura 16. Estructura del corindón α - alúmina determinada por Maslen y compañía. Imagen obtenida por VESTA, CIF 2101053.....	43
Figura 17. Análisis de EDX.....	45
Figura 18. Micrografía de la alúmina sintetizada a 100 aumentos (100×).	47
Figura 19. Micrografía de la alúmina sintetizada a 2000 aumentos (2000×).	49
Figura 20. Comparación de la reflectancia difusa (pd) de la α -alúmina comercial frente a la sintetizada..	50
Figura 21. Comparación de la reflectancia difusa (pd) de los recubrimientos sintetizados con α -alúmina comercial frente a los obtenidos con alúmina sintetizada.	50
Figura 22. Reflectancia difusa relativa antes del tratamiento de Intemperismo.	52
Figura 23. Reflectancia difusa relativa antes del tratamiento de Intemperismo.	53
Figura 24. Muestras utilizadas en los ensayos de dureza y adherencia.....	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Tamaño de cristalito promedio de la alúmina sintetizada y comercial.	46
Tabla 2. Tamaño de grano a 100× de la alúmina sintetizada.....	48
Tabla 3. Tamaño de grano a 2000x de alfa-alúmina sintetizada.....	49
Tabla 4. Medición de la irradiancia generada por la RD sobre una superficie perpendicular.	51

RESUMEN

En la búsqueda por satisfacer las demandas energéticas globales, la humanidad ha encontrado un valioso aliado en el sol. A lo largo de la historia, este recurso se ha utilizado para diversas actividades, abarcando tanto sectores de subsistencia como comerciales. El advenimiento de la revolución industrial y la aparición de nuevas tecnologías que catalizaron el desarrollo de nuevos métodos de producción marcaron un aumento significativo en la demanda energética. En consecuencia, alternativas como el carbón y los derivados del petróleo captaron una atención sustancial debido a su rentabilidad y alta densidad energética, aunque a costa de una degradación ambiental considerable. Sin embargo, el aluminio y sus derivados han demostrado un rendimiento reflectante prometedor en la producción de un reflector difuso.

En este trabajo de investigación se sintetizó α -alúmina, a partir de aluminio reciclado, la cual exhibió propiedades reflectivas similares a una versión comercial. Las características del polvo se determinaron mediante difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia UV-Vis, revelando su capacidad para reflejar hasta el 92,84% de la radiación visible en el rango espectral de 400 a 800 nm. Esta eficiencia de reflexión es un 0,32% inferior a la de la versión comercial de alta pureza. Estas características permitieron su aplicación en la síntesis de recubrimientos reflectantes sobre acero esmaltado de bajo carbono para producir reflectores difusos. Los recubrimientos se sintetizaron mediante el método Sol-Gel y se aplicaron por pulverización. Posteriormente, se sometieron a espectroscopia visible, ensayos de dureza y ensayos de adhesión para evaluar su rendimiento. Estas pruebas revelaron que los recubrimientos exhibieron una reflexión difusa (ρ_d) de hasta el 72,30% de la radiación visible, lo que mejoró significativamente la generación fototérmica en un 110,33%. Adicionalmente, también demostraron una dureza de 5H y una fuerza de adhesión de 5B.

INTRODUCCIÓN

Reducir la contaminación es uno de los desafíos con mayor preocupación que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. A medida que la población mundial crece y las industrias se expanden, la generación de desechos y la contaminación del aire, agua y suelo se han convertido en problemas críticos que afectan la salud del planeta y de sus habitantes. Cada año se recolecta en el mundo una cantidad estimada de 11 200 millones de toneladas de residuos sólidos, mientras que la desintegración de la proporción orgánica de estos residuos sólidos contribuye aproximadamente al 5 % de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, s.f.). En la vida diaria, prácticamente todas las actividades esenciales que se realizan tienen un impacto ambiental, contribuyendo de alguna manera a la contaminación. Entre dichas actividades, se encuentra la generación de energía eléctrica, la cual, es esencial para el desarrollo humano y el funcionamiento de nuestras sociedades modernas. Sin embargo, los métodos tradicionales de producción de energía eléctrica, como la quema de combustibles fósiles, son responsables de una significativa contaminación ambiental y tienen graves consecuencias para la salud del planeta (Shamoon et al., 2022).

Se prevé que la generación de residuos sólidos urbanos aumente de 2,100 millones de toneladas que existen en 2023 a 3,800 millones de toneladas en 2050. En 2020, el costo directo mundial de la gestión de residuos se estimó en 252,000 millones de dólares (Naciones Unidas, s.f.). En respuesta a estos problemas, es necesario buscar soluciones sostenibles. La promoción del reciclaje, la reducción y la transición hacia fuentes de energía renovables son pasos importantes para mitigar la contaminación. Cabe mencionar que, no solo es crucial utilizar fuentes de energía sostenibles; también es vital innovar en la manera en que gestionamos nuestros desechos. La síntesis de nuevos materiales a partir de residuos representa una oportunidad significativa para un ciclo más circular y sostenible, ya que comprender la degradación de los materiales permite seleccionar opciones más duraderas y eficientes. En este sentido, comprender el proceso de degradación de los materiales se vuelve clave (Geissdoerfer et al., 2017). La degradación de un material, ya sea por exposición a factores ambientales, como la radiación solar, la humedad o las variaciones térmicas, afecta directamente su durabilidad y funcionalidad. Al analizar y comprender estos procesos, es

posible seleccionar materiales que sean más resistentes y adecuados para sus aplicaciones específicas, lo que no solo mejora su rendimiento, sino que también extiende su vida útil, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes, disminuyendo así el consumo de recursos y la generación de desechos, contribuyendo a un ciclo más circular y menos contaminante.

En este sentido, un reflector difuso se define como un material o recubrimiento cuya superficie dispersa la radiación incidente en múltiples direcciones, a diferencia de la reflexión especular de un espejo. Esta propiedad permite una distribución más uniforme de la energía luminosa, incrementando la eficiencia de los sistemas solares al minimizar las pérdidas asociadas a reflejos concentrados (Michael et al., 2015).

Esto ha sido el motivo de este tema de investigación, en el cual, el objetivo fue sintetizar una alúmina a partir de chatarra de aluminio para utilizarlo como precursor de un recubrimiento para que funcione como reflector difuso en un sistema híbrido solar. Se evaluarán, tanto el comportamiento de degradación, así como también, será validado experimentalmente en función de sus propiedades ópticas como la reflectancia, y mecánicas, como la dureza y adherencia.

En esta tesis, en el capítulo 1, se aborda el planteamiento del problema, la justificación, la hipótesis, así como los objetivos. En el capítulo 2, se presenta un breve panorama sobre los antecedentes de este tipo de sustratos. En el capítulo 3, se muestra el marco teórico, donde se describen las técnicas de caracterización que se utilizaron para caracterizar el sustrato y conceptos de estudio, como reflectancia difusa, dureza, adherencia. En el capítulo 4, se describe la metodología utilizada al sintetizar el material. En el capítulo 5, se muestran los resultados obtenidos por las técnicas de caracterización y de las pruebas mecánicas, así como, sus interpretaciones. Por último, se presentan las conclusiones.

A lo largo de la investigación, se proporcionarán respuestas a las preguntas de investigación planteadas al inicio del estudio, como la posibilidad de crear un sustrato a partir de materiales de desecho, la durabilidad del recubrimiento en condiciones de uso real, su comportamiento frente a condiciones extremas de exposición y su capacidad para mantener un rendimiento óptimo a lo largo de su vida útil. Cada uno de estos análisis contribuirá a una comprensión más profunda de la viabilidad del material en aplicaciones de energía solar, y permitirá formular recomendaciones

sobre su implementación en sistemas híbridos solares, con el fin de maximizar la eficiencia y minimizar el impacto ambiental.

CAPÍTULO 1

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La eficiencia de los sistemas híbridos solares depende en gran medida de la capacidad de los reflectores para maximizar la captación y redirección de la radiación solar. Actualmente, la mayoría de los reflectores utilizados en la industria están compuestos por metales que reciben un acabado superficial para mejorar su reflectancia. Sin embargo, estos materiales presentan una problemática significativa: factores ambientales que provocan su oxidación, lo que reduce progresivamente su capacidad reflectante y, en consecuencia, la eficiencia del sistema solar en el que se encuentran integrados.

Este deterioro conlleva costos adicionales de mantenimiento y reposición, además de disminuir la viabilidad económica de los sistemas solares en el mediano y largo plazo. La necesidad de desarrollar materiales con una mayor resistencia a la oxidación y una reflectancia sostenida a lo largo del tiempo es evidente.

Por lo tanto, la presente investigación busca responder las siguientes preguntas:

1. ¿Es posible sintetizar un sustrato a partir de latas de aluminio?
2. ¿En qué porcentaje un reflector difuso desarrollado con el sustrato sintetizado es eficiente en comparación con uno realizado con sustrato comercial?

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, nuestra vida cotidiana depende tanto de la tecnología y la energía que sería casi imposible funcionar sin ellas. Sin embargo, mientras más avanza una sociedad, más energía consume, y esto genera un grave daño al medio ambiente. Según la International Energy Agency (s. f.) para el 2040 la demanda de energía aumentará un 60%, y debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, el calentamiento global podría subir entre 1.4 y 5.8 °C para finales de siglo (Robles & Rodríguez Álvarez, s. f.). Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) son los principales responsables, ya que generan más del 75% de estos gases y casi el 90% del CO₂ (dióxido de carbono) emitido a nivel mundial (Naciones unidas, s.f.). Si no se actúa pronto, las consecuencias serán devastadoras para todos.

Ante este problema, las energías renovables surgen como una alternativa limpia e inagotable, a diferencia del petróleo, que además de contaminar, es un recurso limitado. La International Energy Agency (s. f.), refiere que el uso de energías renovables ha crecido un 2.3% anual desde 2015, ayudando a estabilizar las emisiones de carbono. Aun así, los combustibles fósiles todavía dominan el 80% de la producción energética global, por lo que es urgente acelerar la transición hacia fuentes limpias. La ONU advierte que, para evitar una catástrofe climática, debemos reducir las emisiones a la mitad para 2030 y llegar a cero emisiones netas en 2050 (Naciones unidas, s.f.).

Afortunadamente, las energías renovables ahora son más accesibles: la energía solar ha reducido sus costos en un 85% en la última década, y la eólica hasta en un 56% (Naciones unidas, s.f.). Esto las hace viables incluso en países con menos recursos, donde más se necesitan.

En este contexto, este trabajo busca contribuir al campo de la energía solar estudiando la eficiencia de un reflector difuso desarrollado con un sustrato sintetizado a partir de chatarra de aluminio, lo que no solo aprovecha desechos contaminantes, sino que también podría mejorar la eficiencia de los paneles solares. Actualmente, los reflectores pierden rendimiento con el tiempo debido a la degradación por factores como el sol, la lluvia o la humedad, pero no hay suficientes estudios sobre cómo esto afecta su funcionamiento en sistemas fotovoltaicos.

Esta investigación se considera importante porque no solo evaluará la degradación del material, sino que también propondrá un método sostenible para fabricarlo, lo que podría ser un paso importante hacia energías más limpias y accesibles para todos. Además, al reciclar aluminio, se reduce la contaminación y se promueve una economía circular.

1.3 HIPÓTESIS

Es posible obtener un sustrato cerámico basado en alúmina con una fase cristalina predominante α -alúmina mediante el método de síntesis por lixiviación y precipitación. En consecuencia, se postula que el recubrimiento compuesto por este sustrato cerámico y un polímero de silicio, conferirá una mayor resistencia a la degradación, en comparación con un recubrimiento desarrollado con α -alúmina comercial. Por lo que, se espera que mantenga su eficiencia reflectante por períodos más prolongados, proporcionando así un desempeño superior en aplicaciones donde la durabilidad y la protección contra la corrosión son factores clave.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Sintetizar un sustrato que funcione como recubrimiento y reflector difuso en sistemas híbridos solares mediante el proceso de transformación de chatarra de aluminio a alúmina alfa, con el fin de evaluar su potencial aplicación mediante el análisis de su degradación y eficiencia con respecto a un determinado tiempo.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Sintetizar α -alúmina, mediante un tratamiento de lixiviación, seguido de etapas de precipitación y calcinación, para su uso como precursor de un recubrimiento reflector.
- Identificar las fases cristalinas del sustrato sintetizado mediante Difracción de Rayos X (DRX) para verificar que se obtuvo la fase de α -alúmina.
- Identificar las fases cristalinas del sustrato comercial mediante Difracción de Rayos X (DRX) para compararlo con la α -alúmina sintetizada.
- Analizar las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido para describir la morfología y determinar el tamaño de las partículas del producto adquirido.
- Analizar los espectros de energía obtenidos por espectroscopia de rayos X por dispersión de energía para conocer la composición química semi cuantitativa de la muestra.
- Preparar los recubrimientos, con α -alúmina sintetizada y comercial, que funcionen como reflectores difusos aplicando el método sol-gel. Para aplicarlo en placas que formarán parte de un sistema solar, buscando optimizar la eficiencia de la captación y distribución de la radiación solar.
- Evaluar las propiedades ópticas y mecánicas del recubrimiento aplicado en las placas, después del proceso de intemperismo. A través de pruebas de espectroscopia UV-Vis, dureza y adherencia. Para determinar el desempeño del recubrimiento.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Los reflectores difusos son dispositivos que reflejan la radiación solar en múltiples ángulos, los cuales pueden ser utilizados para incrementar el rendimiento en sistemas solares. En 1991, Moehlecke y Krenzinger propusieron dos tipos de módulos ensamblados con reflectores difusos y células bifaciales redondas y laminadas manteniendo un mismo espacio entre ellas permitiendo que la radiación solar llegara al reflector difuso, de esta manera la radiación reflejada puede incidir en la superficie de las células; Uno de los módulos tenía un espacio de aire entre las células y el reflector blanco, el otro tenía un material dieléctrico transparente que mejoraría la irradiación en las células mediante reflexión interna total. Tomando en cuenta los costos, para optimizar las dimensiones, concluyeron que en los módulos con espacio de aire y con material dieléctrico se alcanzaba aproximadamente un 25% y 40% respectivamente, más de radiación que en un módulo convencional (Moehlecke et al., 2013).

Para aplicaciones domésticas se han propuesto reflectores de diferentes colores, comparando su rendimiento, llegándose a la conclusión que reflectores amarillo y naranja tenían un rendimiento del 7 menor en comparación con un reflector blanco (Moehlecke et al., 2001). Por otro lado, Moehlecke, Febras y Zanesco evaluaron experimentalmente módulos fotovoltaicos con células solares con (p+nn+) fabricaron dos módulos fotovoltaicos siguiendo un proceso de montaje estándar industrial, los cuales se caracterizaron después de la fabricación y después de 18 meses de operación en un sistema fotovoltaico autónomo instalado en Porto Alegre, Brasil. En su estudio compararon el rendimiento de los módulos fotovoltaicos con células bifaciales con el de los módulos con células monofaciales estándar instalados en un sistema independiente similar, y evaluaron el efecto de la deposición de polvo y la degradación de los módulos. Los módulos fabricados fueron expuestos a irradiación solar en Porto Alegre, Brasil, en una superficie inclinada de 48 grados, el polvo redujo la potencia de los módulos en un rango del 1 al 4%. Estos resultados fueron similares a los encontrados en los módulos estándar y a los publicados por otros autores para módulos instalados en varios sitios alrededor del mundo. Después de limpiar los módulos con celdas solares bifaciales de tipo n no presentaban degradación de rendimiento. (Moehlecke et al., 2013)

El interés en desarrollar reflectores solares basados en capas reflectantes de aluminio comenzó a principios de la década de 1980. La empresa Boeing Engineering and Construction Company (BEC), realizó la primera prueba de durabilidad bajo condiciones aceleradas y al aire libre para dos tipos de reflectores aluminizados recubiertos (fabricados por National Metalizing y Dunmore) en 1980. El equipo de OET (Outdoor Exposure Test) acelerado consistía en un dispositivo llamado Montura Ecuatorial con Espejos para Aceleración (EMMA), que proporcionaba un factor de aceleración de aproximadamente ocho soles durante un período de exposición de un año, mientras que el OET en tiempo real se realizó en la instalación de Pruebas de Exposición a la Luz Solar del Desierto (DSET) ubicada en Sonora (EE. UU.), donde los reflectores se expusieron a un sol a una elevación de 45°. En los años siguientes, se realizaron diversas pruebas de durabilidad en reflectores de aluminio. Por ejemplo, en 1981, la Universidad de Texas Tech probó varios candidatos a reflectores solares aluminizados en el aeropuerto de Crosbyton, encontrando una disminución similar en la reflectancia especular en todos los casos (García-Segura et al., 2021).

Se han realizado estudios adicionales sobre reflectores de aluminio en diferentes condiciones y entornos. Por ejemplo, el grupo de investigación de la Universidad de Uppsala estudió la durabilidad de reflectores de aluminio en Suecia, encontrando diferentes niveles de pérdida de reflectancia en función del tipo de reflector y las condiciones de exposición. En la década de 2000, un reflector de aluminio de primera superficie mejorado protegido por un recubrimiento sol-gel, también fabricado por Alanod, fue probado por el DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). En colaboración con el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) y PSA (Plataforma Solar de Almería) y el NREL (National Renewable Energy Laboratory) principios de la presente década; la estructura estratificada de este reflector, estaba compuesta por un recubrimiento protector obtenido por sol-gel de SiO₂ sobre varios recubrimientos refractivos de óxido metálico sobre una delgada capa de aluminio de alta pureza, depositada por deposición física de vapor sobre un sustrato de aluminio anodizado; tras 5 años de exposición al aire libre en el Desierto de Tabernas, la máxima degradación fue de 3.7%, se realizaron pruebas OET las cuáles son pruebas experimentales consideradas adecuadas para evaluar la durabilidad y el rendimiento de los reflectores solares, ya que se prueban en condiciones ambientales reales. Los lugares potenciales para plantas de energía solar térmica deben ser representativos y tener condiciones adecuadas, especialmente en cuanto a la irradiancia normal directa (DNI). Durante 3 años, las cuales arrojaron resultados de tan solo 1.9% en la pérdida de

reflectancia especular monocromática, y no disminuyó la reflectancia hemisférica ponderada solar. Se llevaron a cabo distintos ensayos acelerados como calor húmedo, NSS (spray de sal) y QUV (UV con agua) túnel de viento, y las muestras sin recubrimiento presentaron un 14% de disminución de reflectancia especular monocromática después de 2000 horas de prueba de calor húmedo o exposición a NSS (García-Segura et al., 2021).

Los reflectores de aluminio son un ejemplo común de reflectores de primera superficie. Por lo general, están compuestos por una capa de aluminio puro depositada sobre un sustrato de aluminio laminado, con una capa protectora de óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) en el medio y algunos recubrimientos transparentes protectores en la parte delantera. El dióxido de silicio o sílice (SiO_2) forma una capa protectora dura y transparente que ha demostrado ser eficaz contra la abrasión y la corrosión. Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología para la producción a gran escala todavía enfrenta restricciones económicas (García-Segura et al., 2016).

Los reflectores de película de polímero plateado se han producido durante varias décadas. Básicamente, comprenden una capa de plata depositada sobre un sustrato y protegida por capas de polímero. Dado que el sustrato polimérico limita la temperatura durante la deposición de plata, no se podía trabajar a temperaturas superiores a 60-80 °C, aunque la plata puede soportar temperaturas de hasta 100 °C sin aglomeración y, sin pérdida de reflectancia especular. Después de varios años de investigación, la durabilidad de las películas de polímero plateado se pudo mejorar utilizando la técnica de deposición asistida por haz de iones para depositar un recubrimiento transparente de alúmina protectora sobre la capa de plata, que mejoró la adherencia de la alúmina a la plata, redujo el estrés causante de grietas en la alúmina también proporcionó una protección más fuerte contra la degradación de la plata. Aunque se encontró degradación por túneles, la resistencia de la interfaz se fortaleció mediante un recocido a 80 °C durante 65 horas sin afectar la reflectancia especular (García-Segura et al., 2016). La técnica IBAD (Deposición Asistida mediante Haz de Iones) presentaba una limitación para una aplicación más amplia, una tasa de deposición relativamente lenta atribuible a la baja salida de fuentes de iones comerciales capaces de operar en una atmósfera oxidante, años más tarde esta pudo optimizarse; Kennedy, Smilgys, Kirkpatrick, Ross, analizaron el rendimiento óptico y la durabilidad reflectores solares protegidos por un recubrimiento de alúmina, utilizando un sustrato de PET (Tereftalato de Polietileno) plateado. Aplicaron una capa de 0.5- 4 μm del recubrimiento, bajo los criterios de NREL con 95% de reflectancia y 91% de

especularidad iniciales. Estas muestras fueron sometidas a pruebas aceleradas, resistiendo hasta 1800 horas de exposición sin degradación en la reflectancia hemisférica; no hubo ninguna diferencia entre las muestras con un recubrimiento de alúmina entre 0.7 μm y 5 μm de grosor. Este fue el tiempo de exposición exitoso más largo para un reflector con un sustrato de polímero probado en NREL hasta esa fecha (Kennedy et al., 1997).

En un estudio realizado en 2020 por Miguel Ángel Ortega González pudieron obtenerse un material con alta reflectancia difusa, tras una selección de sustratos y polvos precursores caracterizándolos con espectroscopia ultravioleta visible (UV-VIS), microscopia electrónica de barrido (MEB), espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) y difracción de rayos X (DRX), dureza (ASTMD3363) y adherencia (ASTMD3359). Se prepararon suspensiones a diferentes concentraciones mediante el uso de la técnica sol-gel, aplicada sobre diferentes sustratos (acero inoxidable, aluminio, cobre, latón, acero recubierto pintura y acero galvanizado) para formar películas base cerámica. Obteniendo mejores resultados en el acero pintura, con una reflectancia del 84.74%, adherencia del 86.68% y una dureza de 3H (González, 2020).

Los avances en la tecnología de recubrimientos han permitido mejorar la eficiencia de los reflectores solares mediante el uso de alúmina, optimizando así la captación y concentración de energía solar en aplicaciones industriales, comerciales y científicas. Esta tendencia refleja un creciente interés en soluciones sostenibles y eficientes que aprovechan al máximo el potencial de la energía solar como fuente de energía limpia y renovable. En los últimos años, la síntesis de alúmina ha experimentado avances significativos, con un enfoque creciente en métodos sostenibles y eficientes. Se ha investigado intensamente la obtención de alúmina de alta pureza y morfología controlada mediante técnicas como la sol-gel, precipitación controlada y métodos de síntesis hidrotérmica. Estos métodos permiten ajustar las propiedades físicas y químicas de la alúmina para aplicaciones específicas en nanotecnología, catalizadores avanzados, y dispositivos electrónicos. Un estudio realizado por Trejo-Trejo et al. (2021), expone un método para la obtención de alúmina alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) utilizando escoria de aluminio, mediante la lixiviación de la escoria en una solución de NaOH 0.5M, seguida de una etapa de precipitación utilizando HCl. Posteriormente, el sólido recuperado se calcinó a una temperatura de 1200°C durante 72 horas. El producto obtenido fue sometido a análisis utilizando varias técnicas de caracterización. La técnica de difracción de rayos X se utilizó para identificar las fases cristalinas presentes, mientras que la microscopía electrónica

de barrido permitió explorar la morfología del material. Se concluyó que es posible obtener el material mediante este método, sin embargo, sufre de contaminación de Si debido a la presencia del NaOH, y que además debido al consumo energético de reactivos, no es recomendable para sintetizar alúmina a gran escala (Trejo-Trejo et al., 2021).

La alúmina es un material extraordinario que posee propiedades tales como la resistencia a la degradación y una buena reflectancia, por ello su demanda ha aumentado, lo cual despertó el interés por sintetizar este material a partir de materiales tradicionales o incluso desechos. Grande et al. (2023), evaluaron distintas estrategias de síntesis de alúmina a partir de escorias salinas de aluminio, analizando los métodos de precipitación, sol-gel, síntesis hidrotermal, combustión, microondas, química húmeda, mecanoquímica, hidrólisis y template de celulosa, concluyendo que el método de precipitación es el más efectivo y sencillo que se puede llevar a cabo con materias primas de bajo costo, produce un nivel relativamente bajo de contaminación y también logra estabilidad térmica, alta pureza en el producto y nanopartículas de tamaño prácticamente homogéneo.

En un estudio realizado en 2019 por Roslan, examinó la extracción de γ -Al₂O₃ de escoria de aluminio mediante lixiviación ácida con ácido sulfúrico 2 M. La técnica implicó una relación específica de escoria-ácido, seguida de la adición controlada de amoníaco para alcanzar un pH de 9. Los resultados revelaron la obtención exitosa de γ -alúmina con una alta área de superficie específica, la cual demostró ser un soporte catalítico eficaz en la reacción de reformado en seco de glicerol. (Grande et al., 2023)

Por otro lado, en el año 2000 El-Katatny et al., propusieron un enfoque alternativo para recuperar alúmina a partir de escoria de aluminio mediante lixiviación atmosférica y a alta presión con NaOH, seguido de la precipitación de aluminato de sodio con varios agentes precipitantes. Este proceso resultó en la obtención de una gamma-alúmina cristalina bien definida con una alta pureza y áreas de superficie significativas, destacando que la lixiviación a alta presión produjo una recuperación de aluminio superior al 70%. (Grande et al., 2023).

En una comparación entre los métodos sol-gel y de coprecipitación llevada a cabo por Rajaeiyan y Bagheri-Mohagheghi en 2013, se encontró que ambos métodos resultaron en la síntesis exitosa de alúmina en sus formas γ y α . Sin embargo, la coprecipitación demostró ser más eficiente en la

obtención de partículas de alúmina con un área de superficie más alta, mientras que el sol-gel produjo partículas más pequeñas y homogéneas. (Grande et al., 2023).

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 Técnicas de Caracterización

3.1.1 Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica analítica no destructiva que permite determinar la estructura molecular de materiales cristalinos a partir de la medición de los patrones de difracción generados al incidir rayos X sobre una muestra. Los patrones de interferencia resultantes proporcionan información sobre la estructura reticular del material, lo que posibilita el análisis de

parámetros como las dimensiones de la celda unitaria, la simetría del cristal, la deformación de la red y los defectos cristalinos (Mahmood et al., 2025). La identificación de fases se realiza comparando el patrón de difracción obtenido de una muestra con patrones de una base de datos de referencia, siendo la más completa la mantenida por el *Centro Internacional de Datos de Difracción* (ICDD) (Ermrich & Oppen, 2011).

El tubo de rayos X genera radiación mediante emisión termoiónica. Los electrones emitidos desde un filamento de tungsteno calentado son acelerados bajo alto voltaje hacia un material blanco, generalmente cobre o molibdeno. Cuando el haz de electrones colisiona con el blanco, los electrones de las capas internas son expulsados, creando vacantes que son ocupadas por electrones de capas externas. Esta transición libera energía en forma de rayos X característicos, cuyas longitudes de onda son específicas del elemento que constituye el blanco. Estos rayos X son dirigidos hacia la muestra para su análisis (Cornelius & Grigorian, 2022).

El portamuestras posiciona la muestra dentro de la trayectoria del haz. Su diseño debe minimizar la dispersión de fondo y garantizar una alineación precisa, ya que incluso desviaciones menores pueden afectar los patrones de difracción. El detector recoge los haces difractados, convirtiendo la intensidad de los rayos X en señales electrónicas que posteriormente se procesan para generar un patrón de difracción. Este patrón revela información sobre la simetría del cristal, la disposición atómica y los espaciamientos interplanares (Cornelius & Grigorian, 2022).

En un experimento típico de XRD que opera en modo de reflexión, la fuente de rayos X permanece fija mientras la muestra rota con respecto al haz incidente. Esta rotación permite que el haz explore diferentes planos cristalográficos del material. Simultáneamente, el detector rota al doble del ángulo de la muestra (geometría 2θ) para capturar los rayos difractados con precisión. Esta configuración asegura un registro confiable de los picos de difracción y facilita el cálculo del espaciamiento interplanar mediante la ley de Bragg (Cornelius & Grigorian, 2022):

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

d = espaciamiento interplanar d_{hkl} (hkl: índices de Miller)

θ = ángulo de Bragg θ_B

2θ = ángulo entre el haz incidente y el haz reflejado

n = "orden" de la interferencia $n = 1, 2, 3...$, normalmente $n = 1$ (denominado: reflexión de orden n)

λ = longitud de onda

En 1913, W.H. Bragg y W.L. Bragg describieron la difracción e interferencia de los rayos X en un cristal como reflexiones en los planos atómicos de la red cristalina. Las posiciones de las reflexiones se calculan utilizando la diferencia de camino óptico $2s$, con $s = d \sin \theta$, entre dos rayos reflejados en espaciamentos interplanares vecinos. Al igual que en la óptica de luz visible, se producen máximos para múltiplos enteros de λ (Ermrich & Oppen, 2011).

3.1.2 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (MEB) es una técnica de caracterización microestructural que permite el análisis de la morfología, topografía y composición de materiales sólidos mediante el barrido de la superficie de la muestra con un haz de electrones enfocado. La interacción de este haz con la materia genera diversas señales, entre las que destacan los electrones secundarios y los electrones retrodispersados. Los electrones secundarios proporcionan imágenes de alta resolución sobre la topografía superficial, mientras que los electrones retrodispersados ofrecen contraste composicional en función del número atómico de los elementos presentes. Adicionalmente, al estar equipado con un detector de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS), el equipo permite realizar un análisis elemental semicuantitativo de la región analizada. Esta versatilidad convierte a la MEB en una herramienta fundamental en la ciencia de materiales para la caracterización de la microestructura y la composición local de una muestra (Subramanian et al., 2018).

Cuando el haz de electrones primario interactúa con la muestra, los electrones pierden energía mediante procesos repetidos de dispersión aleatoria y absorción dentro de un volumen de la muestra con forma de gota o pera, conocido como volumen de interacción. Este volumen se extiende desde menos de 100 nm hasta aproximadamente 10 μm por debajo de la superficie. El tamaño del volumen de interacción depende de la energía de llegada de los electrones, del número atómico de la muestra y de su densidad (Subramanian et al., 2018).

El intercambio de energía entre el haz de electrones y la muestra da lugar a:

- La reflexión de electrones de alta energía (electrones retrodispersados) mediante dispersión elástica.
- La emisión de electrones de baja energía (electrones secundarios) y electrones Auger mediante dispersión inelástica.
- La emisión de radiación electromagnética (rayos X y catodoluminiscencia).

Cada una de estas señales puede ser detectada por detectores específicos. La corriente del haz absorbida por la muestra (corriente de muestra) también puede ser detectada y utilizada para crear imágenes de su distribución. Se emplean amplificadores electrónicos de diversos tipos para amplificar las señales; los detectores electrónicos convierten estas señales en imágenes digitales que se visualizan en un monitor de computadora (Subramanian et al., 2018).

3.1.3 Tamaño de cristalito ecuación de Scherrer

El tamaño de cristalito constituye un parámetro microestructural fundamental en el análisis de materiales cristalinos mediante difracción de rayos X. Dicho parámetro se encuentra directamente relacionado con el ensanchamiento de los picos de difracción (reflexiones) observados en los difractogramas. La anchura total a la mitad del máximo (FWHM) de una reflexión depende tanto de factores instrumentales (geometría del difractómetro, configuración de rendijas, óptica, ángulo 2θ y tipo de detector) como de características intrínsecas de la muestra. En condiciones ideales, que implican una divergencia mínima del haz monocromático y una muestra "perfecta" con cristalitos de tamaño comprendido entre 0.5 y 5 μm y ausencia de imperfecciones cristalinas, un difractómetro de polvos estándar puede producir picos con anchuras (FWHM) de entre 0.03° y 0.1° en 2θ en todo el rango angular. Sin embargo, cuando se observa un ensanchamiento adicional de los picos más allá de estos valores de referencia, dicho fenómeno puede atribuirse a la presencia de cristalitos de tamaño muy pequeño (por debajo de aproximadamente 0.1 μm) y/o a la existencia de microdeformaciones en la red cristalina. De esta manera, el análisis del ensanchamiento de picos permite estimar el tamaño promedio de cristalito y evaluar el estado de microtensiones de la muestra (Ermrich & Oppen, 2011).

La relación entre el ensanchamiento de las reflexiones y el tamaño promedio de cristalito se encuentra formalmente establecida mediante la ecuación de Scherrer:

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta_{\tau}\cos\theta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

β_{τ} es el ensanchamiento de la reflexión debido a tamaños de cristalito pequeños

con $\beta_{\tau} = (B - b)$

dónde:

B = FWHM de la reflexión de la muestra real

b = FWHM de la reflexión del estándar

(tamaño de cristalito aproximado de 0.5 a 5 μm)

K aproximadamente 0.9 (0.89 para cristalitos esféricas, 0.94 para cristalitos cúbicas)

λ es longitud de onda

θ es el ángulo de refracción

(Ermrich & Oppen, 2011)

3.1.4 Espectroscopia de rayos x por dispersión de energía

La caracterización estructural y elemental de materiales a escala micro y nanométrica constituye una etapa fundamental en la investigación científica de materiales. Dentro del conjunto de técnicas analíticas disponibles se encuentra la Espectroscopia de Rayos X por Dispersión en Energía (EDS o EDX), mediante la cual podemos obtener análisis elemental mientras se examina la microestructura de los materiales (Leng, 2008).

La espectroscopia de rayos X por dispersión en energía es una técnica analítica empleada para la determinación elemental de muestras sólidas, usualmente acoplada a un microscopio electrónico de barrido (SEM) o de transmisión (TEM). El principio físico fundamental reside en la detección y análisis de los rayos X característicos emitidos por una muestra cuando es bombardeada con un haz de electrones de alta energía. Durante esta interacción, los electrones del haz incidente pueden expulsar electrones de las capas internas de los átomos, generando vacantes electrónicas. Para que el átomo recupere su estado fundamental, electrones de capas superiores descienden para ocupar dichas vacantes, liberando el exceso energético en forma de fotones de rayos X. La energía de estos fotones es característica de la diferencia energética entre las capas electrónicas involucradas y, por ende, es única para cada elemento químico. El detector de rayos X dispersivo en energía típicamente de silicio dopado con litio o de deriva de silicio (SDD) recibe estos fotones y genera un pulso eléctrico cuya amplitud es proporcional a la energía del fotón incidente. Un analizador

multicanal clasifica estos pulsos en función de su amplitud, generando un espectro de intensidad versus energía donde los picos corresponden a los elementos presentes en la muestra (Leng, 2008).

Esta técnica es adecuada para analizar los elementos químicos en un volumen microscópico de la muestra porque la sonda electrónica puede enfocarse en un área muy pequeña. Por esta razón, a esta técnica se le denomina a menudo microanálisis (Leng, 2008).

Este análisis puede ser cualitativo, mediante la identificación de los elementos presentes, o semicuantitativo, estimando sus proporciones relativas a través de correcciones por matriz ($Z_i A_i F_i$) (Leng, 2008).

Para un análisis cuantitativo preciso mediante EDS en ME, se requieren muestras patrón separadas que contengan los elementos presentes en la muestra a analizar. Los patrones deben medirse en las mismas condiciones instrumentales que la muestra. Esto significa que los espectros de la muestra y del patrón deben adquirirse bajo las mismas condiciones en lo que respecta a los siguientes parámetros (Leng, 2008).

- Voltaje de aceleración del haz de electrones;
- Ángulo de despegue de los rayos X desde la muestra hacia el detector; y
- Pérdidas por coincidencia en el detector (tiempo muerto del detector).

Este método determina la concentración de cada elemento presente en la muestra mediante la comparación entre la intensidad de los rayos X característicos emitidos por el elemento en la muestra problema (I_i) y la intensidad correspondiente en un patrón o estándar de referencia ($I(i)$). Dicha comparación requiere la aplicación de factores de corrección que compensan los efectos de matriz, los cuales modifican la intensidad de radiación generada en función de la composición global del espécimen. Estos factores se agrupan en tres categorías fundamentales: el efecto de número atómico (Z_i), que considera la eficiencia de generación de rayos X; el efecto de absorción (A_i), que corrige la atenuación de los rayos X al atravesar la matriz hasta emerger de la superficie; y el efecto de fluorescencia secundaria (F_i), que compensa la intensidad adicional proveniente de

la excitación de un elemento por los rayos X generados por otros elementos presentes en la muestra, representándose en la siguiente fórmula (Leng, 2008):

$$\frac{C_i}{C_{(i)}} = (Z_i A_i F_i) \frac{I_i}{I_{(i)}} = (Z_i A_i F_i) k_i \quad \text{Ecuación 3}$$

3.1.5 Espectroscopia UV-Vis

La espectroscopia UV-Visible se basa en el principio de que las moléculas o iones absorben energía luminosa, lo que da lugar a transiciones electrónicas dentro de sus estructuras. Al ser expuestas a la luz ultravioleta o visible, los electrones, particularmente los electrones no enlazantes (n), de enlace (σ) y pi (π), pueden absorber energía y pasar de un estado de menor energía a uno de mayor energía. Esta absorción es específica de la estructura molecular y puede observarse como picos característicos en el espectro ultravioleta o visible, lo que proporciona información sobre la naturaleza electrónica de la molécula (Nasreen et al., 2025).

La espectroscopia ultravioleta (UV) es un método analítico ampliamente utilizado que evalúa la capacidad de una molécula para absorber radiación UV, típicamente dentro del rango de 200–400 nm. Cuando este rango se extiende a la región visible (400–800 nm), la técnica se denomina espectroscopia UV-Visible (UV-Vis). El espectro de absorción resultante ayuda a determinar información estructural y funcional de la molécula (Nasreen et al., 2025).

La espectroscopia UV opera bajo el concepto de que las moléculas absorben radiación ultravioleta, promoviendo electrones desde un estado basal a un estado excitado. Estas transiciones electrónicas se observan típicamente en el rango de 200–400 nm y, para algunos compuestos, pueden extenderse a la región visible (hasta 800 nm) (Nasreen et al., 2025).

Transiciones Electrónicas Clave:

- $\pi \rightarrow \pi$ (pi a pi asterisco): Electrones que transitan entre orbitales pi enlazantes y antienlazantes. Es común en compuestos aromáticos y alquenos.
- $n \rightarrow \pi$ (n a pi asterisco): Electrones de orbitales no enlazantes que transitan hacia orbitales pi antienlazantes. Se observa en carbonilos, aminas y otros compuestos con heteroátomos.

Estas transiciones proporcionan información sobre la estructura molecular y las configuraciones electrónicas de los compuestos analizados (Nasreen et al., 2025).

3.2 Conceptos de estudio

3.2.1 Reflectancia difusa total

La reflectancia difusa es un fenómeno óptico empleado, particularmente en las regiones UV-visible, infrarrojas cercanas (NIR) e infrarrojo medio (técnica conocida como DRIFT o DRIFTS), que permite obtener información espectroscópica de muestras en polvo con mínima preparación. A diferencia de la reflexión especular, en la cual el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia (similar a la reflexión en un espejo), la reflectancia difusa se caracteriza por la dispersión de la radiación electromagnética incidente en múltiples direcciones, independientemente del ángulo de incidencia. Este comportamiento es típico de superficies mate o sin brillo, como una pared blanca iluminada por luz solar, la cual presenta el mismo brillo desde cualquier ángulo de observación. En la práctica analítica, la espectroscopia de reflectancia difusa recolecta y analiza la radiación dispersada por la superficie de la muestra, constituyendo una alternativa viable cuando la muestra no es adecuada para la espectroscopia de transmisión convencional debido a su opacidad, textura o condición física (Mirabella, 1998).

3.2.2. Dureza

La dureza se define como la propiedad mecánica que cuantifica la resistencia que opone la superficie de un material a ser penetrada por un indentador de mayor dureza, estableciéndose una relación directa entre este parámetro y la resistencia al desgaste del material evaluado. Los materiales que presentan valores elevados de dureza tienden a producir desgaste en aquellos de menor dureza con los que interactúan y, en consecuencia, exhiben una vida útil más prolongada en condiciones de servicio abrasivo (Newell, 2011).

Entre la diversidad de metodologías existentes para la determinación de la dureza, el ensayo Brinell constituye una de las técnicas más ampliamente implementadas. Este método consiste en la aplicación controlada de una fuerza sobre un indentador esférico de carburo de tungsteno, cuyo diámetro normalizado es de 10 mm, el cual se presiona contra la superficie de la muestra problema. El valor de dureza Brinell (HB) se obtiene mediante una expresión matemática que relaciona la carga aplicada con el área superficial de la huella generada (Newell, 2011):

$$HB = \frac{F}{\left(\frac{\pi}{2}\right)D \left(D - \sqrt{D^2 - D_i^2}\right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde **F** es la carga aplicada en kilogramos, **D** es el diámetro de la esfera y **D_i** es el diámetro de la impresión que dejó la esfera en el material de ensayo en milímetros (Newell, 2011).

El ensayo Brinell es un método ampliamente utilizado para determinar la dureza de materiales debido a su rapidez, facilidad de ejecución y confiabilidad en los resultados obtenidos. Esta técnica se considera no destructiva, dado que la muestra no experimenta fractura durante el procedimiento, generándose únicamente una impresión superficial producto de la penetración del indentador. Por otra parte, el ensayo Rockwell constituye una variante del método Brinell que emplea como indentador un cono de diamante o una esfera de acero en lugar de la bola de carburo de tungsteno característica del ensayo original; aunque el principio físico de operación se mantiene, la medición se basa en la variación de la profundidad de la huella bajo diferentes condiciones de carga (Newell, 2011).

Con frecuencia, los valores de dureza Brinell son convertidos a la escala de dureza Moh, desarrollada por Friedrich Moh en 1822. Esta escala asigna valores del 1 al 10 a diez minerales de referencia, donde el talco representa el extremo inferior (menor dureza) y el diamante el superior (mayor dureza). Cabe señalar que la escala Moh no es lineal, por lo que las diferencias numéricas no implican proporcionalidad directa en la dureza real de los materiales. En términos comparativos, los materiales cerámicos suelen presentar valores de dureza superiores a los metales, mientras que los polímeros generalmente ocupan el rango inferior (Newell, 2011).

Existe una correlación aproximada entre la dureza Brinell y la resistencia a la tracción de los materiales, dado que ambas propiedades están vinculadas con la capacidad del material para resistir la deformación plástica. Esta relación permite estimar parcialmente la resistencia a la tracción a partir de los valores de dureza obtenidos. Sin embargo, ciertos materiales como muestras minerales frágiles o vidrios no pueden evaluarse mediante los métodos convencionales debido a que las cargas aplicadas provocan su fractura. Para estos casos, se emplean ensayos de microdureza, los cuales utilizan cargas reducidas del orden de gramos y emplean indentadores de geometría piramidal (ensayo Vickers) o romboidal (ensayo Knoop). Los lineamientos

normalizados para la realización de estos ensayos se encuentran especificados en la norma ASTM E-384 (Newell, 2011).

3.2.3 Adherencia

La adhesión es un fenómeno interfacial que se define como el estado en el cual dos superficies, pertenecientes a sustratos iguales o diferentes, se mantienen unidas mediante fuerzas de naturaleza física, química o mecánica. Su estudio reviste una importancia capital en numerosos ámbitos científicos y tecnológicos, siendo su principal aplicación la unión mediante adhesivos, técnica que ha desplazado parcialmente a los métodos de fijación mecánica convencionales como el atornillado o el remachado, por ventajas significativas tales como la reducción de peso, una distribución más uniforme de tensiones y un acabado estético superior derivado de la naturaleza prácticamente invisible de la línea de unión. No obstante, el alcance de la adhesión trasciende las uniones adhesivas, estando presente en todos aquellos sistemas donde existe contacto entre sólidos, incluyendo recubrimientos, pinturas, barnices, materiales compuestos, mezclas de polímeros y sistemas multicapa. En estos materiales, el desempeño final del conjunto depende críticamente de la calidad de la interfaz formada entre los componentes, lo que justifica la necesidad de comprender a profundidad los mecanismos involucrados (Pizzi & Mittal, 2003).

En la actualidad se acepta que la adhesión puede explicarse mediante una serie de mecanismos concurrentes, cada uno de los cuales desempeña un papel específico, ya sea de manera individual o en combinación con otros. Entre estos mecanismos, la teoría del anclaje mecánico constituye una de las explicaciones más intuitivas y antiguas sobre el fenómeno de la adhesión, siendo denominada en ocasiones como "enganche" mecánico. Este mecanismo postula que el adhesivo en estado líquido penetra en las cavidades, porosidades e irregularidades presentes en la superficie del sustrato sólido, para posteriormente solidificar en su interior, generando una estructura cuya separación requiere la aplicación de una fuerza mecánica suficiente para fracturar alguno de los componentes del sistema. Inicialmente, se consideraba que dichas irregularidades superficiales debían ser de dimensiones relativamente grandes, al menos observables mediante microscopía óptica. Este planteamiento resultaba plausible para ciertas aplicaciones específicas, como las obturaciones dentales con amalgama o la adhesión de materiales porosos (textiles, papel o cartón), pero no lograba explicar satisfactoriamente la unión de superficies lisas y duras como las de vidrio o aluminio (Allen, 1984).

La evaluación de la adhesión requiere métodos de análisis que permitan determinar tanto la calidad de la unión como las propiedades fundamentales del sistema adhesivo. Estos ensayos cumplen propósitos específicos que incluyen: el control de calidad del adhesivo y de los tratamientos superficiales aplicados; la determinación de las propiedades mecánicas e ingenieriles básicas del adhesivo en estado curado; la exploración de los efectos que condiciones ambientales específicas ejercen sobre la integridad de la unión; la selección del adhesivo más adecuado para una aplicación determinada; y la posibilidad de establecer comparaciones objetivas entre productos de diferentes fabricantes (Allen, 1984).

Las configuraciones de ensayo más comúnmente empleadas se agrupan en tres categorías fundamentales: ensayos de cizalladura, ensayos de tensión y ensayos de pelado. Entre estas, la evaluación del desempeño de cintas adhesivas, que puede realizarse mediante diversas configuraciones de ensayo, entre las cuales se encuentra el ensayo de pelado invertido a 90 grados. Este procedimiento emplea como superficie de prueba cartón estándar o un cartón seleccionado según los requerimientos del análisis. La medición consiste en determinar el tiempo requerido para desprender una longitud de una pulgada (25 mm) de una muestra de una pulgada (25 mm) de ancho, utilizando una carga de 200 gramos. Para garantizar que únicamente la sección especificada entre en contacto con el cartón, se emplea una ventana de papel liberador recubierto de silicona que delimita la longitud de evaluación, permitiendo que la muestra se desprenda al completarse el ensayo (Pizzi & Mittal, 2003).

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

La metodología experimental se desarrolló en cuatro etapas principales: síntesis de alúmina a partir de chatarra, preparación de recubrimientos reflectores, la aplicación del recubrimiento en las placas y la caracterización. En la síntesis de alúmina hubo dos subetapas, que consistieron en la preparación del polvo precursor, así como la preparación de la solución. En la etapa de la preparación del recubrimiento este se sintetizó mediante la técnica de sol gel, a partir del precursor obtenido como de la alúmina comercial. En la etapa de la aplicación, esta se realizó por medio de aspersión. Y por último, en la etapa de caracterización, se dividió en dos partes, la caracterización

del precursor y de la alúmina comercial, antes de ser aplicadas al recubrimiento, se identificó la fase cristalina de ambas por medio de difracción de rayos X, y del precursor, se analizó la morfología de las partículas por microscopía electrónica de barrido y su análisis semicuantitativo por espectroscopia por dispersión de rayos X; mientras también se realizó la caracterización del recubrimiento en las placas por reflectancia difusa total, espectroscopia UV-VIS de reflectancia, dureza y adhesión. El procedimiento en general se muestra en la figura 1.

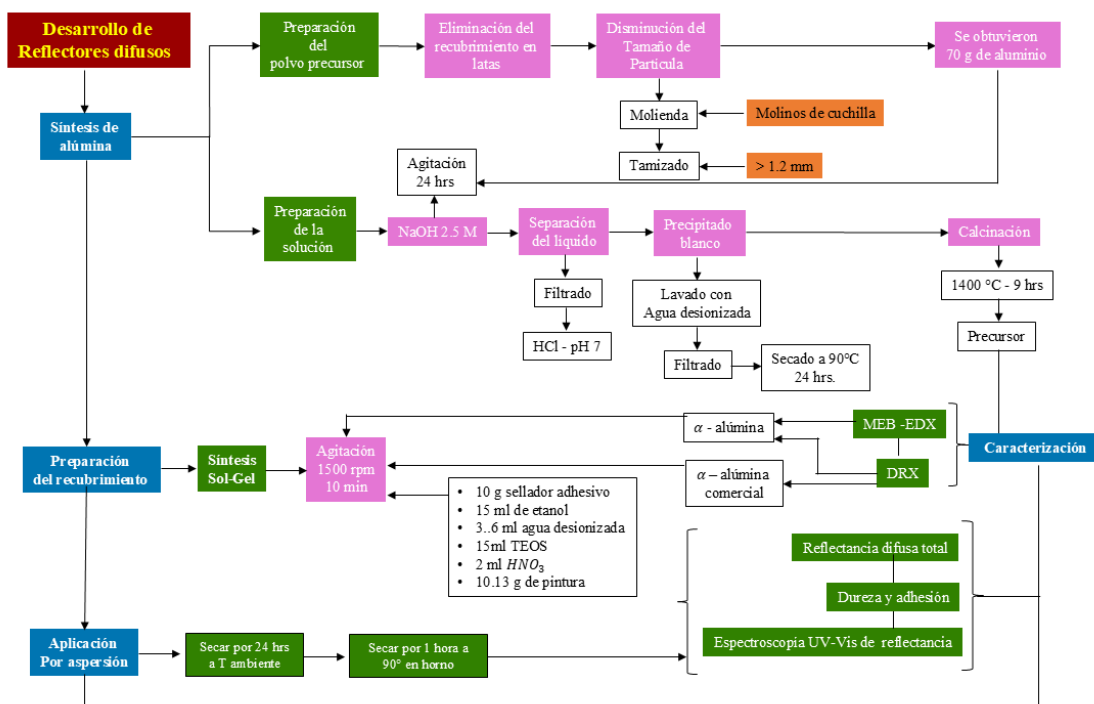


Figura 1. Estrategia experimental.

4.1 Síntesis de (Al_2O_3)

4.1.1 Preparación del polvo precursor

Durante esta etapa se sintetizó alúmina (Al_2O_3) a partir de chatarra de aluminio (latas de refresco) mediante el método de lixiviación propuesto por Villafuerte y Ávila Pozos (2021):

1. Se lijaron las latas para eliminar pintura y recubrimientos superficiales, con el fin de remover la mayor parte de las impurezas, dado que el único componente de interés era el cuerpo metálico.



Figura 2. Latas de aluminio.

2. Se redujo su tamaño empleando un molino de cuchilla de acero inoxidable y se tamizó con malla número 30, obteniendo partículas inferiores a 1.2 mm.



Figura 3 Recipiente de molino de cuchilla y tamiz de malla número 30.

Durante esta primera etapa de síntesis de Al_2O_3 se obtuvieron 70g de polvo de aluminio.



Figura 4. Aluminio obtenido de latas de refresco.

4.1.2 Preparación de la solución

1. Se prepararon 4 L de una solución alcalina de NaOH 2.5 M, a la cual se añadieron 70 g de la chatarra (como se menciona en el punto 4.1.1). La mezcla se dejó reaccionar mediante agitación durante 24 horas, obteniendo una suspensión traslúcida de color marrón con un pH de 14 ± 0.2 .



Figura 5. Preparación de solución alcalina de NaOH 2.5 M.



Figura 6. Solución de NaOH tras reaccionar con polvo de Al.

2. Se filtró la suspensión, obteniendo dos productos: un precipitado de color marrón retenido en el papel filtro y una solución traslúcida que lo atravesó.



Figura 7. Precipitado de color marrón retenido en el papel filtro.

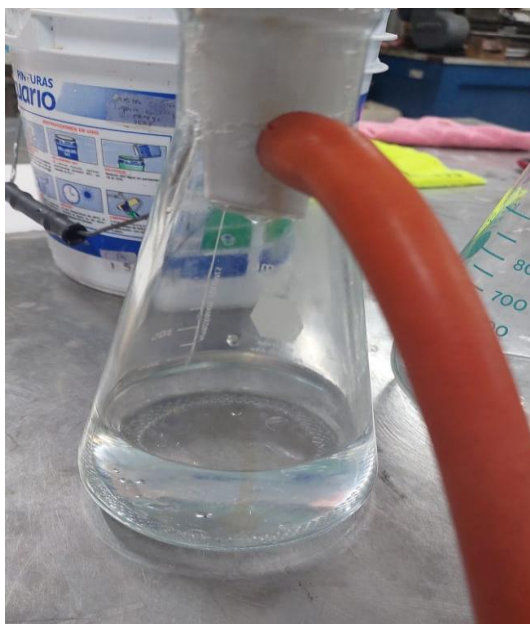


Figura 8. Solución traslúcida que atravesó el papel filtro.

3. La solución resultante se neutralizó con ácido clorhídrico hasta alcanzar un pH de 7 ± 0.2 , lo que generó un precipitado blanco de consistencia gelatinosa.
4. Posteriormente, el precipitado se enjuagó con agua destilada a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta eliminar la conductividad en el agua de lavado, registrando el pH y la conductividad con un medidor Oakton 1000 (± 0.01).
5. Se realizó un nuevo filtrado y el sólido obtenido se secó a 90°C durante 24 horas.



Figura 9. Etapa final de filtrado.



Figura 10. Etapa de secado a 90°C durante 24 horas.

6. Finalmente, se sometió a una etapa de calcinación a 1400 °C durante seis horas.

4.2 Preparación del recubrimiento

Se prepararon dos series de recubrimientos con función de reflector difuso: una con alúmina α obtenida del reciclaje de latas de refresco Coca Cola® y otra con alúmina α comercial (Sigma-Aldrich®), con el fin de comparar su eficiencia con base en los resultados de los análisis de caracterización. La preparación se realizó de acuerdo con el método sol-gel descrito por Ortega González (2020), basado en las reacciones de hidrólisis y condensación, mediante el siguiente procedimiento:

1. En un vaso de precipitados de 250 mL, con ayuda de una balanza analítica, se colocaron los siguientes reactivos:
 - TEOS (tetraetil ortosilicato, $C_8H_{20}O_4Si$, Sigma-Aldrich®, grado reactivo 98%, CAS: 78-10-4)
 - Etanol (C_2H_5OH , Sigma-Aldrich®, CAS: 64-17-5)
 - Agua desionizada (H_2O , Meyer®, CAS: 7732-18-5)
 - Ácido nítrico al 5% (HNO_3 , Meyer®, ensayo máximo permitido 68.0–70.0%, CAS: 7697-37-2)
 - Sellador adhesivo B-18 pazti® (acetato de polivinilo, $(C_4H_6O_2)_n$)
 - α -alúmina (Al_2O_3), ya fuera la sintetizada o la comercial (Sigma-Aldrich®, CAS: 1344-28-1)
 - Sulfato de bario ($BaSO_4$, Sigma-Aldrich®, CAS: 7727-43-7)
 - Dióxido de titanio (TiO_2 , Sigma-Aldrich®, CAS: 1317-70-0)
 - Dióxido de silicio (SiO_2), obtenido por síntesis con el método sol-gel en el laboratorio de tecnología de cerámicos de la UAEH
 - Solución fosfatizante y desoxidante®
 - Pintura blanca®
2. La mezcla se sometió a agitación durante 10 minutos a 1500 rpm para lograr homogeneidad.



Figura 11. Preparación del recubrimiento.

3. El recubrimiento resultante se aplicó sobre los sustratos mediante la técnica de aspersión. Posteriormente, se realizó un secado durante 24 horas a temperatura ambiente, seguido de un secado adicional durante 1 hora a 90 °C.



Figura 12. Aplicación del recubrimiento.



Figura 13. Etapa de secado del recubrimiento aplicado.

4.3 Etapa de Caracterización

La caracterización de los materiales se realizó en el siguiente orden:

1. El polvo obtenido en el punto 4.1.2 fue sometido a caracterización mediante DRX para la identificación de las fases presentes en la muestra.
2. Se analizó la morfología de la muestra y se realizó un análisis cuantitativo mediante MEB.
3. Se determinó la composición elemental mediante EDX.
4. Las placas con el recubrimiento (muestras obtenidas en el punto 4.2) se sometieron al análisis de reflectancia mediante espectroscopía UV-Vis.
5. Se aplicó una técnica de intemperismo para inducir degradación en las muestras.
6. Concluido el proceso de intemperismo, se realizó una segunda medición de reflectancia UV-Vis para determinar los cambios ocasionados.
7. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas mecánicas para evaluar la dureza y la adherencia de los recubrimientos, el fin de determinar qué tan resistentes eran después de haber sido expuestos a la intemperie.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 Difracción de rayos X

Se presentan los difractogramas de rayos X (DRX) tanto del producto adquirido (fig. 14), como de la alúmina comercial (fig. 15). Los análisis revelan la presencia de alta pureza de la fase cristalina de corindón α - Al_2O_3 . La identificación de fase en la alúmina sintetizada, figura 10a, se realizó por comparación con el patrón de referencia PDF# 96—900-9784 (Pauling & Hendricks, 1925), esta tiene una similitud con la indexada por Maslen et. al (1993, Maslen), quienes reportaron que contiene una celda unidad hexagonal con $a = 4.7540 \text{ \AA}$ y $c = 12.9820 \text{ \AA}$. El cual contiene en su estructura átomos de Al y O, como se ve en la Figura 16. Para el caso comercial, se identificó con la ficha PDF 96-100-0033. Se observó un ligero desplazamiento de aproximadamente 0.5° en 2θ en la muestra sintetizada, figura 14. Esto puede asociarse con la formación de fases secundarias que contienen silicio durante la cristalización, como se sugiere en la literatura (Rodríguez-Martínez et al., 2025) (Hernández et al., 2019, Schneider et al., 2015).

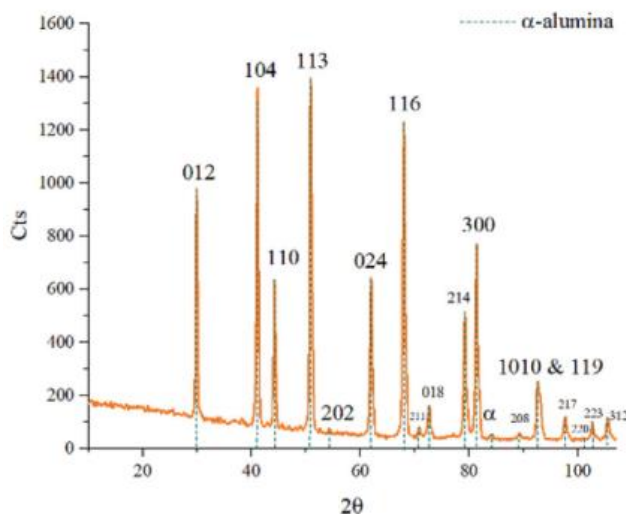


Figura 14. DRX de α -alúmina sintetizada.

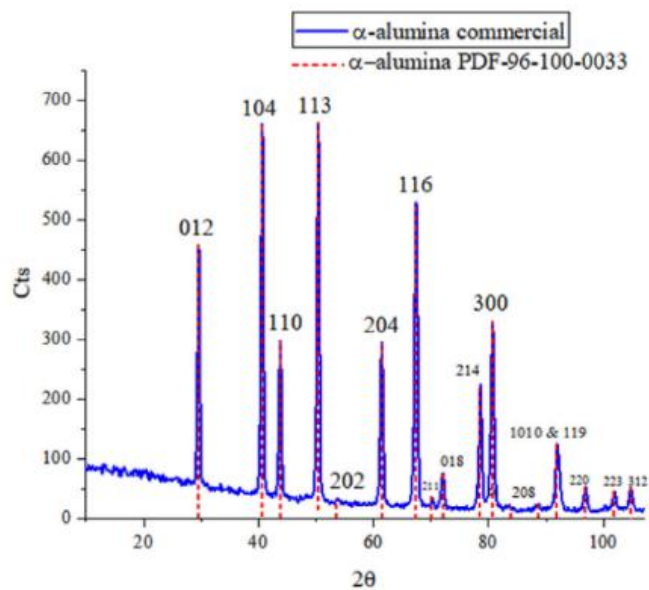


Figura 15. DRX de α -alúmina comercial.

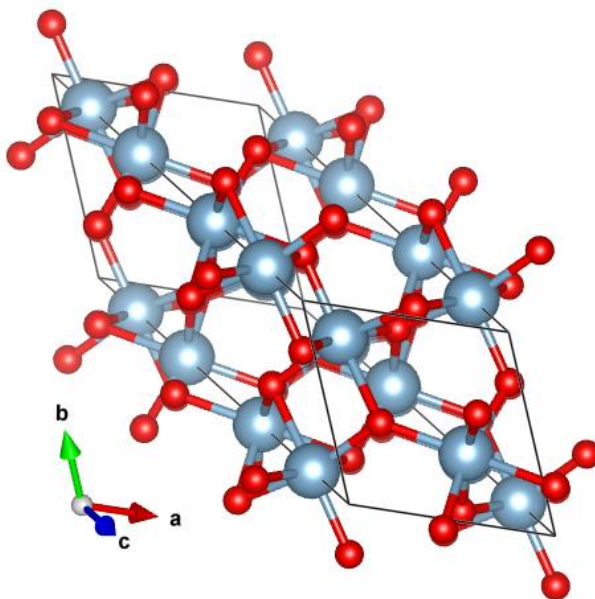


Figura 16. Estructura del corindón α -alúmina determinada por Maslen y compañía. Imagen obtenida por VESTA, CIF 2101053.

La obtención de una fase única de α -Al₂O₃ se ha reportado en otros trabajos de investigación, algunos con diferentes precursores, métodos de síntesis y diferentes temperaturas, como el de López et al. (Lopez, 2012) completaron el proceso de conversión de un material residual de fábrica en alúmina de alta pureza, a través de la calcinación del xerogel de boehmita a 1300°C. Sin embargo, existen registros de trabajos que utilizaron rutas similares a este trabajo de investigación, como los realizados por Kaur et. al. (2020, Karu), quienes ocuparon a diferencia, NH₄OH y una temperatura de 1150°C. Lopez y compañía (Lopez Juarez 2018), obtienen una fase pura con 1160 °C en la calcinación, mientras que otros con temperaturas de 1200 °C obtuvieron con una mezcla de fases (Trejo 2021), se atribuye este resultado a la diferencia en la secuencia de las etapas en los procesos. Sin embargo, la secuencia y el proceso utilizado en este trabajo es más parecido al de Trejo et al. (Trejo 2021) pero con dos modificaciones el uso de una solución de NaOH 2.5 M y una temperatura de 1400 °C en la calcinación. La concentración elevada de iones OH⁻ garantiza una precipitación más rápida, así como, el incremento de temperatura provee la energía térmica necesaria para la transformación de las fases transitorias.

5.2 Espectroscopía de rayos X por dispersión de energía

La Fig. 17 presenta la composición elemental de la muestra. Además de Al y O, se detectaron cantidades traza de Si, Na, Ti, K y Fe, todas con concentraciones inferiores al 1 % en peso. Debido a la baja sensibilidad de la técnica EDS para elementos ligeros y a la incertidumbre asociada, estos valores deben interpretarse únicamente como una indicación de la presencia de impurezas menores, más que como una cuantificación precisa. Su presencia es consistente con la aleación de aluminio original (Ibarra-Cruz et al., 2024) y con el hecho de que dichas especies no se eliminan completamente durante las etapas de lavado o filtración.

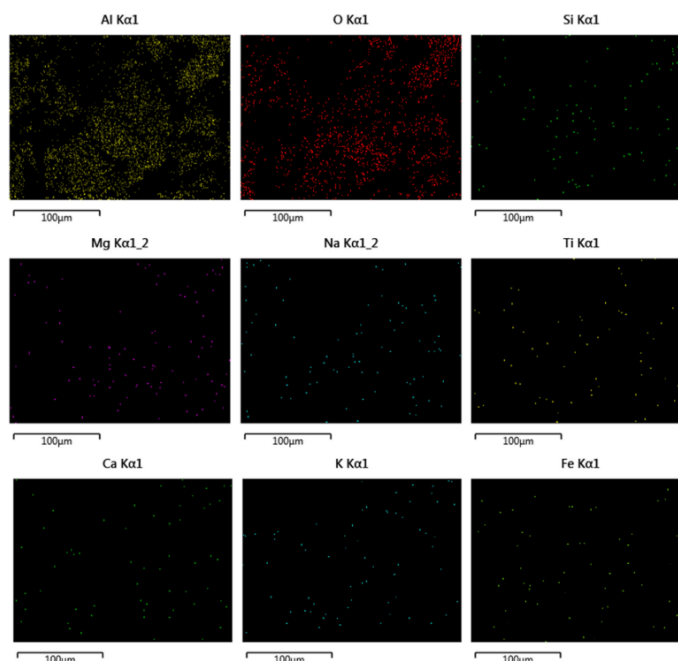


Figura 17. Análisis de EDX.

Aunque no se detectaron mediante DRX, estos elementos pueden desempeñar un papel estructural y morfológico. Por ejemplo, la incorporación de Si podría favorecer la formación local de dominios tipo mullita. La sustitución por Fe ha sido reportada como causante de distorsiones en la red cristalina de la alúmina, generando efectos de microdeformación (Heiba et al., 2018, Khodadadi et al., 2019, Abbas & Al-Mayalee, 2024). Además, elementos como Si y Fe pueden segregarse en los límites de grano, promoviendo la formación de fases secundarias o induciendo distorsiones de la red que dificultan el crecimiento homogéneo del grano. Efectos similares han sido reportados en sistemas de alúmina dopada con Mg, Y y La, donde la movilidad de los límites de grano se inhibe, dando lugar a morfologías de partículas más irregulares y a una distribución de tamaños más amplia. Este incremento en la rugosidad y heterogeneidad mejora la dispersión de la luz en la superficie, favoreciendo la reflectancia difusa, como también se ha evidenciado en aerogeles de alúmina dopados con sílice, donde pequeñas cantidades de dopantes aumentan significativamente la eficiencia de dispersión.

5.3 Tamaño de cristalito

El tamaño de cristalito se estimó utilizando la ecuación de Scherrer como una primera aproximación. Para la alúmina sintetizada, el tamaño promedio de cristalito calculado a partir de los principales picos de difracción fue de ~ 22 nm, mientras que el promedio global obtenido a partir de todos los picos indexados fue de ~ 24 nm. En comparación, la alúmina comercial presentó valores promedio de ~ 19 nm y ~ 24 nm, respectivamente (véase la Tabla 1). Estas pequeñas diferencias (2–3 nm) se encuentran dentro de la incertidumbre típica del método y deben considerarse indicativas más que precisas.

Tabla 1. Tamaño de cristalito promedio de la alúmina sintetizada y comercial.

Muestra	Tamaño de cristalito promedio (nm)	Rango (nm)
γ -Al ₂ O ₃ sintetizada	23.8	14.6-69.3
γ -Al ₂ O ₃ comercial	23.6	11.5-89.7

5.4 Microscopia electrónica de barrido

La Fig. 18 muestra la micrografía SEM a un aumento de $100\times$, donde se observan aglomerados con morfología irregular y tamaños comprendidos entre ~ 60 y $330\ \mu\text{m}$, estos se midieron con apoyo del programa ImageJ. El tamaño de estos aglomerados puede atribuirse al brillo especular casi metálico, como se ha reportado previamente (Rahaman, 2017, Bohren & Huffman, 1998, Bohren, 1998b, Bohren, 1998a). Aunque los aglomerados de mayor tamaño son visualmente prominentes, la mayoría de las partículas son más pequeñas, con un tamaño promedio de $\sim 100\ \mu\text{m}$. Esta amplia distribución de tamaños y la morfología irregular pueden resultar ventajosas para la reflectancia difusa (DR), ya que la heterogeneidad mejora la dispersión de la luz en múltiples direcciones, incrementando la blancura y la reflectividad difusa. Estudios previos sobre recubrimientos micro estructurados híbridos (por ejemplo, nanocompuestos de TiO₂) han demostrado que ensamblajes de partículas desordenados con amplios rangos de tamaño suprimen la reflexión especular y aumentan la reflectancia difusa (Sun et al., 2016, Lu et al., 2018). Dicho comportamiento favorece una dispersión más uniforme de la radiación, minimizando gradientes locales de temperatura en sistemas fotovoltaicos.

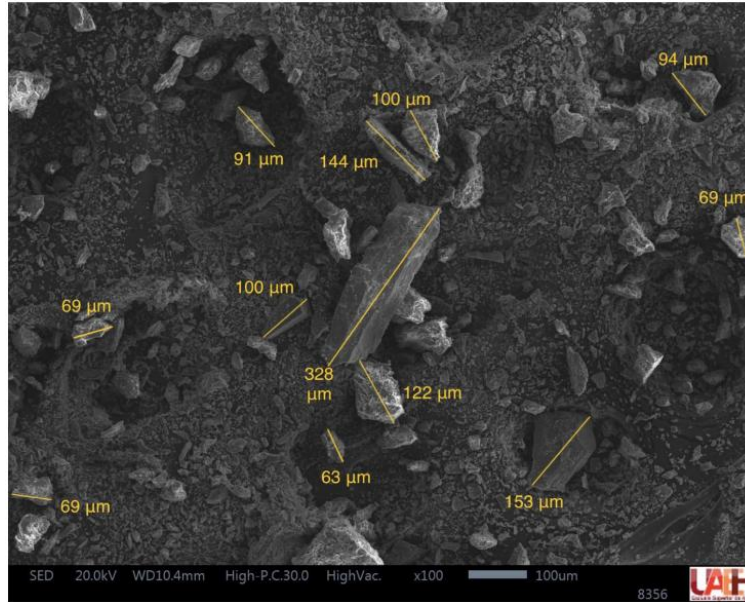


Figura 18. Micrografía de la alúmina sintetizada a 100 aumentos (100×).

En la Tabla 2 se presenta un análisis estadístico de los tamaños de aglomerados medidos. Considerando la totalidad de las partículas, el tamaño promedio calculado fue de 116.83 μm ; no obstante, este valor se ve significativamente influenciado por el aglomerado de mayor dimensión (328 μm). Dado su carácter atípico, se calculó un promedio alternativo excluyendo dicho aglomerado, obteniéndose un valor de 97.64 μm . Asimismo, se incluye en la tabla la variación porcentual de cada medición con respecto a ambos promedios. Con respecto a la media que incluye el valor extremo, las variaciones oscilan entre -40.94 % y 180.74 %; mientras que, al excluirlo, el rango de variación se reduce a valores entre -29.33 % y 56.70 %.

Tabla 2. Tamaño de grano a 100× de la alúmina sintetizada.

Tamaño de grano (μm)	Tamaño promedio considerando todos los granos medidos (μm)	Diferencia porcentual respecto al promedio (%)	Tamaño promedio sin considerar el grano más grande (μm)	Diferencia porcentual respecto al promedio (%)
63	116.83	-46.08	97.64	-35.47
69		-40.94		-29.33
69		-40.94		-29.33
69		-40.94		-29.33
91		-22.11		-6.80
94		-19.54		-3.72
100		-14.41		2.42
100		-14.41		2.42
122		4.42		24.95
144		23.25		47.49
153		30.96		56.70
328		180.74		235.94

A mayor aumento (2000×, Fig. 19), la microestructura revela características laminares de 3–11 μm, consistentes con la morfología de la α -alúmina obtenida por sinterización convencional sin presión (Rahaman, 2017). De este modo, el material presenta una estructura jerárquica compuesta por láminas finas intercaladas con aglomerados de mayor tamaño del orden de cientos de micrómetros, una morfología que mejora la reflexión en las regiones visible y ultravioleta cercano. Estos resultados destacan la importancia de refinar el control del tamaño de partícula en trabajos futuros para optimizar el desempeño óptico. En el caso de la micrografía a 100×, el tamaño promedio y la variación de las mediciones con respecto a este se calcularon y se presentan en la Tabla 3.

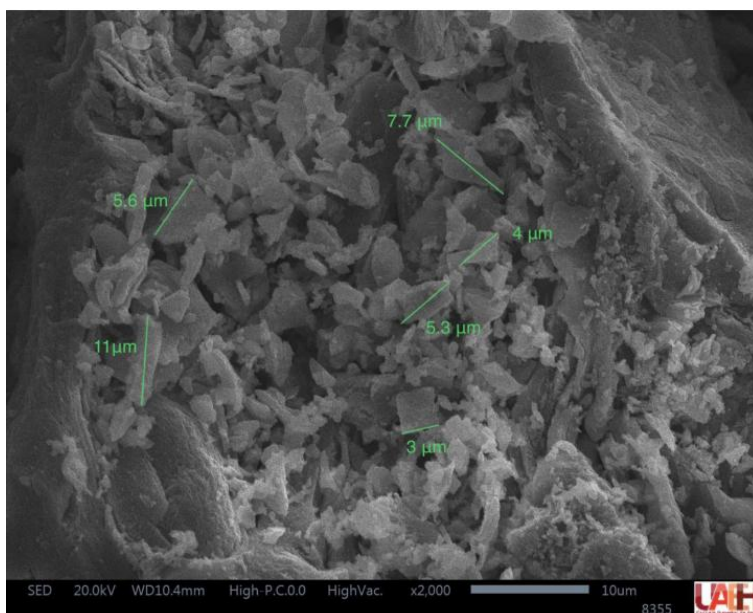


Figura 19. Micrografía de la alúmina sintetizada a 2000 aumentos (2000×).

Tabla 3. Tamaño de grano a 2000x de alfa-alúmina sintetizada.

Tamaño de grano (μm)	Tamaño promedio considerando todos los granos medidos (μm)	Diferencia porcentual respecto al promedio (%)
3	6.1	-50.82
4		-34.43
5.3		-13.11
5.6		-8.20
7.7		26.23
11		80.33

5.5 Caracterización de recubrimientos.

5.5.1 Reflectancia difusa total.

En la Fig. 20 se presenta un análisis comparativo de la reflectancia del compuesto sintetizado y su contraparte comercial. Con base en la integración del área bajo la curva, la versión comercial exhibe una reflectancia de 93.16 %, mientras que la obtenida a partir de aluminio reciclado presenta una reflectancia de 92.84 %. Esta similitud en los valores sugiere que el material obtenido es adecuado para la producción de reflectores difusos. La ligera disminución en la reflectancia

puede atribuirse a impurezas amorfas que no fueron completamente eliminadas durante los procesos de filtración y lavado, así como a fases amorfas no identificadas y a granos que exceden los 5 μm de tamaño y el tamaño del cristalito más grande.

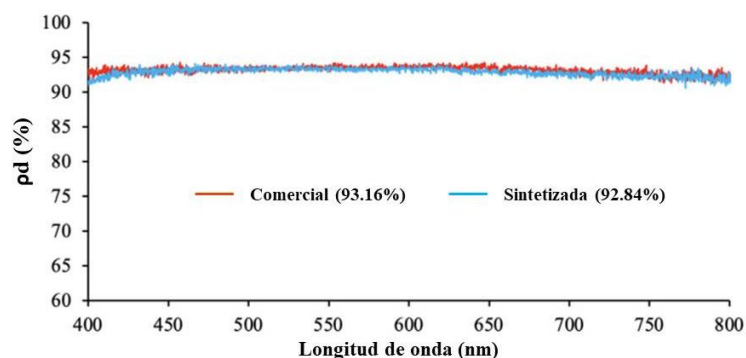


Figura 20. Comparación de la reflectancia difusa (pd) de la α -alúmina comercial frente a la sintetizada.

Como se observa en la Fig. 21, la reflectancia difusa disminuye cuando la alúmina se incorpora en la síntesis del recubrimiento. En contraste, la versión comercial alcanza un 75.88 %, mientras que el producto sintetizado a partir del reciclaje alcanza un 72.30 %. Esta reducción del 3.58 % sugiere que el compuesto producido puede competir con una versión comercial en la fabricación de reflectores difusos.

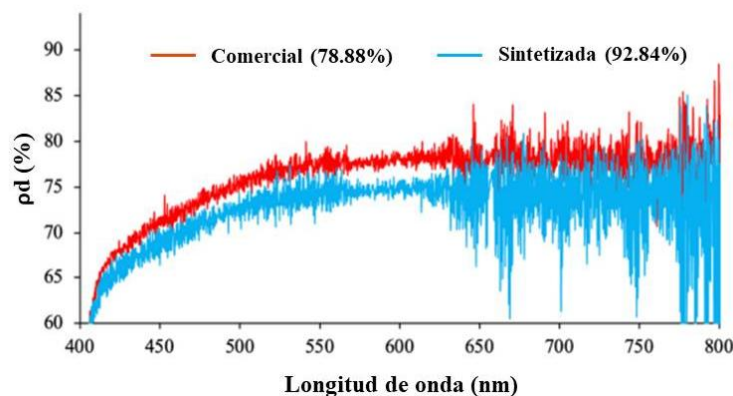


Figura 21. Comparación de la reflectancia difusa (pd) de los recubrimientos sintetizados con α -alúmina comercial frente a los obtenidos con alúmina sintetizada.

La disminución de la reflectancia ocurre principalmente a longitudes de onda superiores a 630 nm. Este fenómeno puede atribuirse a la formación de compuestos amorfos de SiO₂, los cuales son generalmente transparentes a la radiación infrarroja cercana (a partir de aproximadamente 700 nm), y a ello se atribuye la disminución inicial de la reflectancia en la alúmina sintetizada. Esta observación se ve reforzada por el hecho de que el Si es un elemento presente en la aleación de aluminio originalmente procesada y durante el proceso de síntesis del recubrimiento, y que la adición de TEOS contribuye a la formación de polímeros de silicio, además de las condiciones previamente descritas del polvo de alúmina, como el tamaño de grano y de cristalito, así como la presencia de impurezas (Ibarra-Cruz et al., 2024).

La Tabla 4 muestra los valores de las mediciones de irradiancia realizadas. El incremento en la radiación incidente se encuentra entre 11.58 % y 12.04 %, con un valor promedio de 11.81 %. Esta variación puede deberse a factores como la nubosidad y el ángulo de inclinación respecto al cenit.

Tabla 4. Medición de la irradiancia generada por la RD sobre una superficie perpendicular.

G sin RD (W/m²)	G con RD (W/m²)	Incremento (%)
790	885	12.03
960	1074	11.88
980	1098	12.04
620	693	11.77
800	894	11.75
730	816	11.78
850	950	11.76
860	961	11.74
950	1060	11.58
1030	1151	11.75
1070	1196	11.78

5.5.2. Espectroscopía UV-Vis

Como se observa en la Figura 7, que la reflectancia difusa generada por el compuesto sintetizado y la alúmina comercial puede considerarse equivalentes, pues ambas alcanzan un valor cercano al 69% en el rango de 400 a 800 nm. Esto demuestra que la alúmina proveniente del reciclaje de aluminio puede considerarse como un reemplazo de la alúmina comercial de alta pureza.

Sin embargo, como se muestra en la Figura 8, ambos valores de reflectancia sufren un aumento posterior a la prueba de intemperismo. Esto se atribuye a la degradación de la fina película polimérica que se deposita sobre la superficie durante la síntesis del recubrimiento, producto de la polimerización del TEOS. No obstante, también es apreciable en la misma figura, que el recubrimiento producido con la alúmina reciclada, tiene un mayor aumento que el realizado con su contraparte comercial; pues sus valores relativos son de 75.88 y 72.30 % respectivamente. Esta diferencia de 3.58 % puede atribuirse a la presencia de compuestos de titanio como TiO_2 , el cual posee una mayor capacidad reflectiva que la alúmina (González et al., 2024, Fuentes-Hernández et al., s. f.). Esto se ve reforzado ya que, este metal está presente en la aleación original de las latas (Rodríguez-Martínez et al., 2025). Este comportamiento es atípico en reflectores metálicos y mixtos, como lo han mostrado investigaciones previas (García-Segura et al., 2021), lo cual representa una ventaja significativa de este tipo de reflectores.

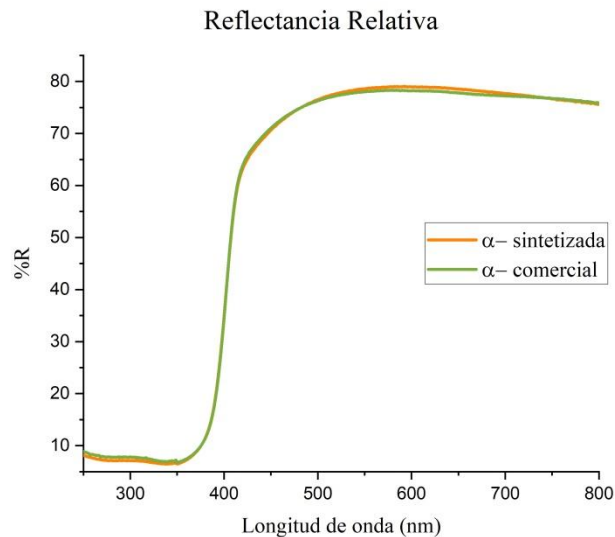


Figura 22. Reflectancia difusa relativa antes del tratamiento de Intemperismo.

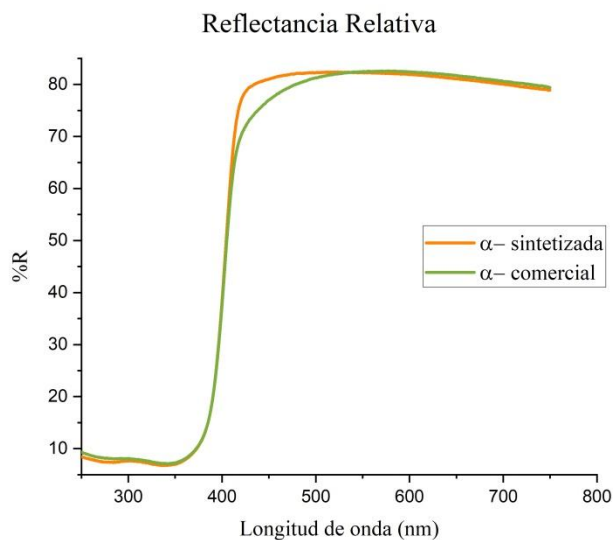


Figura 23. Reflectancia difusa relativa antes del tratamiento de Intemperismo.

5.5.3 Dureza y adhesión.

Los valores de dureza y adhesión obtenidos tras las pruebas fueron de 5H y 5B para la alúmina sintetizada (las calificaciones más altas alcanzables en esta evaluación) y de 5H y 4B para la alúmina comercial. Esto indica que ambos materiales presentan la misma dureza, mientras que el recubrimiento fabricado con alúmina sintetizada exhibe una mayor adhesión. Esto puede atribuirse al mayor tamaño de grano del material reflectante, lo que resulta en una mayor superficie de contacto entre el sustrato y el material. Estos hallazgos demuestran que el recubrimiento posee las características necesarias para funcionar bajo condiciones exigentes (Fig. 22).

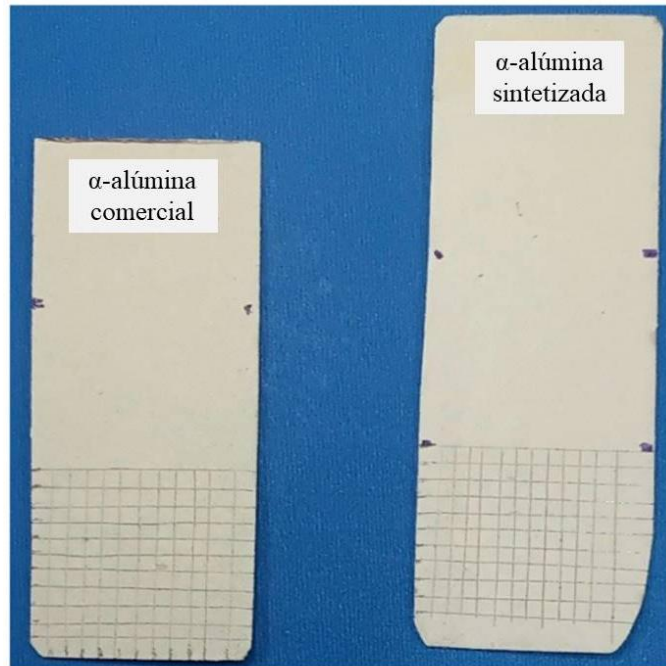


Figura 24. Muestras utilizadas en los ensayos de dureza y adherencia.

5.7 Análisis tecnoeconómico

Se estimó que el costo de fabricación, considerando todos los reactivos necesarios sin incluir el sustrato de acero, es de aproximadamente \$109.38 MXN por m², lo que equivale, al momento de este trabajo, a \$5.96 USD o €5.05 con alúmina comercial, y €3.48 con alúmina sintetizada. Por otra parte, la generación adicional teórica producida bajo condiciones promedio de irradiancia en México por el reflector (utilizando la Ec. (6)) en un panel fotovoltaico se estimó entre 16.83 y 21.38 kWh por año. Para el caso específico del modelo de panel utilizado en la simulación computacional de este trabajo, la eficiencia no fue proporcionada por el fabricante, pero se obtuvo a partir de sus dimensiones (1.445 m × 0.547 m), lo que da un área de 0.79 m². Dado que la potencia generada bajo condiciones estándar es de 100 W, se determinó que una superficie de 1 m² podría producir 126.56 W, lo que corresponde a una eficiencia del 12.65 %. No obstante, es bien conocido que existen paneles fotovoltaicos con eficiencias superiores a este valor, alcanzando hasta 26.7 % en celdas de silicio monocristalino (Green et al., 2022), lo que implica que la potencia recuperada podría situarse entre 35.91 y 46.08 kWh por año.

$$CAEP = DI\left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ por día}}\right) \times AEP (\%) \times \eta \times 365 \text{ días} \quad \text{Ecuación 5}$$

Considerando esta información y sabiendo que el costo base por kWh en México en 2025 es de \$0.044 USD (~€0.037) (Rodríguez Suárez et al., 2017), la inversión en el recubrimiento podría recuperarse en un periodo comprendido entre 2.04 y 5.59 años. Este tiempo dependerá siempre de la eficiencia de conversión de la tecnología fotovoltaica y de las condiciones climáticas. Es bien sabido que existen celdas fotovoltaicas con mayor eficiencia que las consideradas en este estudio; sin embargo, la mayoría de ellas aún se encuentran en etapa de investigación y desarrollo, por lo que no están disponibles comercialmente.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten establecer que es posible obtener α -alúmina a partir de chatarra de aluminio mediante un proceso que involucra etapas de lixiviación, precipitación y calcinación a una temperatura de 1400 °C. El análisis por difracción de rayos X confirmó la presencia de las fases cristalinas correspondientes a la α -alúmina, mostrando una correspondencia con los patrones reportados para este material. El tamaño de cristalito estimado mediante la ecuación de Scherrer presentó diferencias dentro del margen de variación asociado al método de estimación. El análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido evidenció aglomerados de tamaño micrométrico y una microestructura laminar jerárquica, características que favorecen la dispersión de la radiación y la reflectancia difusa. Asimismo, el análisis por espectroscopía de rayos X por dispersión de energía confirmó la presencia predominante de aluminio y oxígeno, así como trazas de otros elementos asociados a la aleación de aluminio original. En términos ópticos, la α -alúmina sintetizada presentó una reflectancia difusa de 92.84 %, valor cercano al observado para la alúmina comercial (93.16 %), lo que indica un comportamiento comparable. De igual manera, los recubrimientos elaborados mediante el método sol-gel mostraron valores de reflectancia similares en el intervalo de 400 a 800 nm, alcanzando aproximadamente 69 % en ambos casos, lo que demuestra que la alúmina obtenida a partir del reciclaje de aluminio puede considerarse una alternativa viable a la alúmina comercial de alta pureza para aplicaciones ópticas. En cuanto a las propiedades mecánicas, los recubrimientos presentaron una dureza equivalente de 5H, mientras que el recubrimiento elaborado con alúmina sintetizada mostró una adherencia superior al sustrato (5B) en comparación con el elaborado con alúmina comercial (4B).

Las pruebas de intemperismo evidenciaron un incremento en la reflectancia de ambos recubrimientos, atribuible a la degradación de la delgada película polimérica formada durante la síntesis como resultado de la polimerización del tetraetil ortosilicato (TEOS). Posteriormente, el recubrimiento elaborado con alúmina reciclada alcanzó una reflectancia de 75.88 %, mientras que el elaborado con alúmina comercial presentó un valor de 72.30 %, observándose una diferencia de 3.58 %. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de compuestos de titanio, particularmente TiO_2 , provenientes de la aleación original del aluminio reciclado, los cuales poseen una capacidad reflectiva superior a la de la alúmina. Además, este incremento de reflectancia después del envejecimiento resulta especialmente relevante debido a que constituye un comportamiento atípico en reflectores metálicos y mixtos reportados en la literatura,

representando una ventaja potencial para aplicaciones que demandan estabilidad óptica a largo plazo. En conjunto, los resultados obtenidos indican que la α -alúmina sintetizada a partir de chatarra de aluminio puede emplearse eficazmente como precursor para la elaboración de recubrimientos reflectores difusos, presentando propiedades estructurales, ópticas y mecánicas comparables e incluso superiores en algunos aspectos a las de materiales comerciales. Por lo tanto, la valorización de residuos de aluminio para la producción de α -alúmina representa una alternativa técnicamente viable, con potenciales beneficios económicos y ambientales, para el desarrollo de recubrimientos destinados a sistemas solares híbridos y otras aplicaciones que requieran materiales reflectores de alta eficiencia.

BIBLIOGRAFÍA

A. Pizzi, K. L. M. (Ed.). (1998). *Modern techniques in Applied Molecular Spectroscopy* | Wiley.

Taylor & Francis Group, LLC.

Abbas, I. A., & Al-Mayalee, K. H. (2024). Structural and optical properties of Al₂O₃ nanostructures prepared by hot water treatment method. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 34(4), 527–532. <https://doi.org/10.18280/rcma.340414>

Allen, K. W. (1984). Adhesion and adhesives – some fundamentals. *Etudes de Conservation [Studies in Conservation]*, 29(sup1), 5–12. <https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.supplement-1.5>

Angular dependence of scattering. (2007). En *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (pp. 381–428). Wiley-VCH Verlag GmbH.

Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (1998). Angular dependence of scattering. En *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (pp. 381–428).

Bohren, H. D. C. (1998a). *Measured optical properties*, in: *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* pp. 268–283,. CRC Press.

Bohren, H. D. C. (1998b). Surface modes in small particles. En *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* pp. 325–380, <http://dx.doi.org/10.1002/9783527618156.ch12>.

Cornelius, T. W., & Grigorian, S. (Ed.). (2022). *X-ray diffraction of functional materials*. <https://www.researchgate.net/profile/Hiva->

Doustmohammadi/publication/359941434_Xray_Diffraction_of_Functional_Materials_1/links/625811eba279ec5dd7f5fc8c/Xray-Diffraction-of-Functional-Materials-1.pdf

En Absorption and Scattering of Light by Small Particles. (2007). Wiley-VCH Verlag GmbH.

Ermrich, M., & Oppen, D. (2011). *XRD for the analyst: Getting acquainted with the principles*. PANalytical GmbH.

F Mahmood, H., Ahmad, S. A., & Abu-Bakr, M. (2025). Comprehensive overview of X-ray diffraction: Principles, techniques, and applications in material science. *Technobius Physics*, 3(3), 0035. <https://doi.org/10.54355/tbusphys/3.3.2025.0035>

G. V. Rodríguez-Martínez, E. al. (2025). *Boosting solar energy: recycled aluminum in the manufacture of diffuse reflectors, 2025 [under review]*. <https://doi.org/10.29057/icbi.v14i27.14939>

García-Segura, A., Fernández-García, A., Ariza, M. J., Sutter, F., & Valenzuela, L. (2016). Durability studies of solar reflectors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 453–467. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.060>

García-Segura, A., Sutter, F., Martínez-Arcos, L., Reche-Navarro, T. J., Wiesinger, F., Wette, J., Buendía-Martínez, F., & Fernández-García, A. (2021). Degradation types of reflector materials used in concentrating solar thermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143(110879), 110879. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110879>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- González, M. A. O. (2020). *Síntesis de Películas de Base Cerámica y su Evaluación como Reflectores Difusos*”.
- Grande, L., Vicente, M. Á., Korili, S. A., & Gil, A. (2023). Synthesis strategies of alumina from aluminum saline slags. *Process Safety and Environmental Protection : Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, 172, 1010–1028.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.006>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Hinken, D., Rauer, M., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics*, 30(7), 687–701. <https://doi.org/10.1002/pip.3595>
- Heiba, Z. K., Mohamed, M. B., Wahba, A. M., & Imam, N. G. (2018). Structural, optical, and electronic characterization of Fe-doped alumina nanoparticles. *Journal of Electronic Materials*, 47(1), 711–720. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5830-0>
- Hernández, M. F., López, P. V., Violini, A., Suárez, G., Conconi, M. S., & Rendtorff, N. M. (2019). Dense alumina-mullite composite ceramics from alumina and spodumene-albite feldspar binary mixtures: Processing and properties. *Science of Sintering*, 51(4), 445–458.
<https://doi.org/10.2298/sos1904445h>
- Ibarra-Cruz, L. E., Legorreta-García, F., Juárez-Tapia, J. C., Cobos-Murcia, J. Á., & Rosario-Olguin, Y. (2024). Bohemita de tamaño micrométrico obtenida a partir de desechos

urbanos. *PADI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*, 11(22), 138–143. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11026>

J. Santiago Rodríguez Suárez, Emmanuel Espinoza Navarrete, Joscha Rosenbuch, Hermilio O.

Ortega Navarro, Dr. Manuel Martínez Fernández, Dra. Karla G., Cedano Villavicencio

Miriam M. Armenta. (2017). *LA INDUSTRIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y*

FOTOTÉRMICA EN MÉXICO. Gob.mx.

Kennedy, C. E., Smilgys, R. V., Kirkpatrick, D. A., & Ross, J. S. (1997). Optical performance and durability of solar reflectors protected by an alumina coating. *Thin Solid Films*, 304(1–2), 303–309. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00198-3](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00198-3)

Khodadadi, A., Farahmandjou, M., Yaghoubi, M., & Amani, A. R. (2019). Structural and optical study of Fe³⁺-doped Al₂O₃ nanocrystals prepared by new sol gel precursors. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 16(2), 718–726. <https://doi.org/10.1111/ijac.13065>

Leng, Y. (2008). *Materials characterization: Introduction to microscopic and spectroscopic methods*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

Lu, H., Huang, M., Shen, K.-S., Zhang, J., Xia, S.-Q., Dong, C., Xiong, Z.-G., Zhu, T., Wu, D.-P., Zhang, B., & Zhang, X.-Z. (2018). Enhanced diffuse reflectance and microstructure properties of hybrid titanium dioxide nanocomposite coating. *Nanoscale Research Letters*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2763-3>

- Michael, J. J., Iniyan, & Goic, R. (2015). Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 62–88.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.022>
- Moehlecke, A., Febras, F. S., & Zanesco, I. (2013). Electrical performance analysis of PV modules with bifacial silicon solar cells and white diffuse reflector. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 96, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.028>
- Moehlecke, A., Zanesco, I., Pan, A. C., Severo, T. C., & Mallmann, A. P. (2001). Photovoltaic module with coloured diffuse reflectors”. En *en Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 785–787).
- Nasreen, A., Praveena, K., Keerthana, P., Manikanta, G., & Soundarya, G. U. (2025). *A review of ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy and its practical applications*. Ijsred.com.
<https://www.ijrsred.com/volume8/issue4/IJSRED-V8I4P93.pdf>
- Newell, J. (2011). Ciencia de materiales: Aplicaciones en ingeniería. *Alfaomega*.
- Pauling, L., & Hendricks, S. B. (1925). The crystal structures of hematite and corundum. *Journal of the American Chemical Society*, 47(3), 781–790. <https://doi.org/10.1021/ja01680a027>
- Rahaman, M. N. (2017). *Ceramic Processing and Sintering* (2a ed.). CRC Press.
- Robles, C., & Rodríguez Álvarez, O. (s/f). *Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia An overview of the renewable energy in the World, Latin America and Colombia*. Revistaespacios.com. Recuperado el 10 de marzo de 2026, de <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>

- Schneider, H., Fischer, R. X., & Schreuer, J. (2015). Mullite: Crystal structure and related properties. *Journal of the American Ceramic Society. American Ceramic Society*, 98(10), 2948–2967. <https://doi.org/10.1111/jace.13817>
- Shamoon, A., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Bala Garg, S., Chandmal Sharma, R., & Garg, J. (2022). Environmental impact of energy production and extraction of materials - a review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 936–941. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.159>
- Subramanian, K. S., Janavi, G. J., Marimuthu, S., & Kannan, M. (2018). *Textbook on fundamentals and applications of nanotechnology*. Daya Publishing House.
- Sun, Z., Lv, Y., & Tong, Z. (2016). Effects of particle size on bidirectional reflectance factor measurements from particulate surfaces. *Optics Express*, 24(6), A612-34. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A612>
- Surface Modes in Small Particles. (2007). En *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (pp. 325–380). Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Trejo-Trejo, L., Zurita-Álvarez, M. del C., Legorreta-García, F., Pérez-González, N. K., & Díaz-Guzmán, D. (2021). Obtención de α -Al₂O₃ a partir de escoria de aluminio. *PÁDI boletín científico de ciencias básicas e ingenierías del ICBI*, 9(Especial2), 82–85. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iespecial2.7998>
- United Nations. (s/f). *Datos y cifras*. United Nations. Recuperado el 9 de marzo de 2026, de <https://www.un.org/es/actnow/facts-and-figures>
- XRD for the analyst Getting acquainted with the principles por: Martin Ermrich Detlef Opper.* (s/f).

Gonzalez, M. A. O., Urbiola, E. A. C., García, F. L., Ramírez, M. V., Hernández, D. F., Reyes, G. U., & Terven, J. (2024). Innovations in solar energy: Synthesis and evaluation of diffuse booster reflector ceramic coating for enhancing thermal and photovoltaic systems performance. *Energy Reports*, 12, 2224–2231. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.022>