

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN Y ADHERENCIA DE UN
RECUBRIMIENTO DEPOSITADO MEDIANTE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN
TÉRMICA POR COMBUSTIÓN A BAJA VELOCIDAD SOBRE UN ACERO
AISI/SAE 1020 UTILIZADO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN DE LA PRENSA
EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA**

**MARLON ESNEIDER FLOREZ HERNANDEZ
JUAN CARLOS RUIZ QUIJANO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN Y ADHERENCIA DE UN
RECUBRIMIENTO DEPOSITADO MEDIANTE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN
TÉRMICA POR COMBUSTIÓN A BAJA VELOCIDAD SOBRE UN ACERO
AISI/SAE 1020 UTILIZADO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN DE LA PRENSA
EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA**

**MARLON ESNEIDER FLOREZ HERNANDEZ
JUAN CARLOS RUIZ QUIJANO**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

**SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA
PhD. En Corrosión**

Co-director

**MAURICIO RINCÓN ORTIZ
Doctor en Ciencia y Tecnología mención materiales**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO- QUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

*Este logro lo dedico primeramente a **Dios** por llenar mi vida de sabiduría, esperanza y amor a lo que hago y por la fortaleza dada para levantarme cada día con el ánimo de seguir siempre adelante.*

*A mi madre **Ana Rosa Hernández** por confiar y creer en mis expectativas, por demostrarme su amor infinito y su compañía en cada una de las situaciones vividas, por sus consejos, sus valores, su esfuerzo y su dedicación, por ser una motivación constante y por anhelar siempre lo mejor para mi vida.*

*A mi padre **Alfonso Flórez** por ser mi ejemplo y mi respaldo en los momentos difíciles y por el apoyo incondicional que me brindo para cumplir esta meta.*

*A mi hermano **Kevin Flórez** por estar presente en esta etapa de mi vida, por aportar cosas buenas y ser partícipe de mi felicidad a diario.*

*A mis **cuatro abuelos** por ser promotores de valores y de esfuerzo, por el amor que me han demostrado siempre y por sentirse orgullosos de mí a lo largo de mi vida, a mis demás familiares por ser constantes con sus buenos deseos y por acompañarme durante esta etapa.*

*A mi compañero y amigo **Juan Carlos** por el compromiso, dedicación y paciencia para que esta etapa se hiciera realidad, por su sincera amistad y por cada uno de los días de compañía, de trabajo y de apoyo moral para culminar este proceso.*

*A mis amigos **Kate, An, Silvana, Clau, Caro, Aleja, Omar, Sebastián, Miguel, Os** y demás por ser parte de este proceso de formación, por estar en los buenos y malos momentos, por creer en mí, por ser un apoyo fundamental en mi vida, por contribuir con mi crecimiento personal y profesional y por todo el cariño que me han demostrado siempre.*

A mi novia que me acompañó, me motivo y me dio su apoyo incondicional en cada instante para sacar adelante este proceso.

Marlon Esneider Flórez Hernández

DEDICATORIA

*Quiero primordialmente darle gracias a **Dios** por este gran logro que he alcanzado, gracias a Él por darme la fuerza para seguir adelante a pesar de las adversidades y dificultades que trae la vida, por regalarme la sabiduría para enfrentar cada reto y el amor que permitió levantarme y sentirme con ganas de luchar.*

*A mis padrinos **Álvaro Ruiz y Nubia Macías** quiero ofrecerles este triunfo. Gracias por el apoyo incondicional y fraternal que siempre recibí, por los consejos y valores inculcados desde mi niñez, por el calor de hogar y el papel de padres que con mucho cariño quisieron representar, infinitas gracias por el esfuerzo y la confianza que depositaron en mi para llegar a ser un profesional.*

*A mis padres **Juan Carlos Ruiz e Irene Quijano** por regalarme la vida, gracias por nunca abandonar y apoyar las metas que he podido alcanzar, gracias por los consejos y el cariño que siempre me han demostrado para poder continuar.*

*A mis primos **Álvaro Hernán y Silvia Juliana** por ser dos grandes ejemplos de vida para mí, gracias por el cariño y la compañía de hermanos que siempre me brindaron, por los mil y un consejos que me obsequiaron para ser una gran persona y profesional.*

*A mi hermano **Pedro Pablo** quiero dedicar este logro y espero que sea un ejemplo para que ahora que empieza su vida universitaria entienda que todo se puede lograr con persistencia y dedicación.*

*A Mis Abuelos **Álvaro Quijano e Irene Hernández** gracias por esa confianza que siempre depositaron en mí, gracias por enseñarme como se saca adelante una familia, el esfuerzo y la fuerza que ponen los dos frente a todo es muy grande.*

*A mi compañerito **Marlon Esneider** por acompañarme sin dudar en esta etapa final de nuestra carrera, gracias por las ganas y el esfuerzo depositado en este proyecto, gracias por esta nueva amistad y gracias a su familia que me acogió y nos apoyó en todo este proceso.*

*A mis amigos **Jefferson, Juan Sebastián, Julián Moreno** y a todos aquellos que no alcanzo a nombrar y que fueron un apoyo en este proceso de estudiantes de ingeniería, gracias por esos días y noches de estudio que permitieron que fuéramos superando cada asignatura y finalmente llegar a ser buenos profesionales.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Dios Padre creador todo poderoso

A nuestra directora de proyecto la PhD. Sandra Judith García Vergara, por su gran aporte a nuestro conocimiento, consejos y valores que nos otorgó para la realización de este proyecto. A nuestro codirector el Dr. Mauricio Rincón Ortiz por su colaboración y apoyo en esta investigación.

Al Dr. Fabio Vargas por brindarnos su colaboración y empeño para la realización de este proyecto. A la Ingeniera Maryory Gómez y al Ingeniero Edwin Cadavid por su cooperación en las pruebas, junto a la UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA por los servicios prestados.

A la Ingeniera Liliana Meneses por su completa ayuda, paciencia y conocimiento otorgado para llevar a cabo este proyecto.

A Juan Domingo por su paciencia, colaboración y asistencia a lo largo de todo este tiempo en la elaboración de esta tesis.

Al parque tecnológico Guatiguará de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por su contribución y los servicios prestados para la realización de esta investigación.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por permitirnos formarnos y crecer como profesionales en este tiempo, gracias por todo lo brindado para la realización de este proyecto.

Y cada una de las personas que contribuyeron para la construcción de esta investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. MARCO TEÓRICO	19
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
3.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL SUSTRATO	24
3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLVOS DEL RECUBRIMIENTO	24
3.3 PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS	25
3.4 DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO	26
3.5 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL RECUBRIMIENTO FINAL	27
3.6 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DEL RECUBRIMIENTO	27
3.6.1 Medición de espesores	28
3.6.2 Porosidad del recubrimiento	28
3.7 FASES PRESENTES EN LA CAPA DE Al_2O_3 -13% TiO_2	28
3.8 ENSAYO DE ADHERENCIA DEL RECUBRIMIENTO	29
3.9 CARACTERIZACIÓN DEL TORNILLO TIPO SIN FIN	29
3.10 ENSAYOS DE MICRODUREZA DEL TORNILLO TIPO SIN FIN Y DEL RECUBRIMIENTO PROPUESTO	30
3.11 PRUEBA DE DESGASTE PARA EL TORNILLO TIPO SIN FIN Y EL RECUBRIMIENTO PROPUESTO	30
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
4.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL SUSTRATO	32
4.2 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LAS MUESTRAS DE ACERO AISI/SAE 1020	32
4.3 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DEL RECUBRIMIENTO	33
4.3.1 Morfología	33

4.3.2 Medición de espesores	33
4.4 FASES PRESENTES EN LA CAPA DE Al_2O_3 -13% TiO_2	35
4.5 ENSAYO DE ADHESIÓN DEL RECUBRIMIENTO	35
4.6 CARACTERIZACIÓN DEL TORNILLO TIPO SIN FIN	38
4.6.1 Composición química	38
4.7 MICRODUREZA DEL RECUBRIMIENTO Y DEL TORNILLO TIPO SIN FIN	39
4.8 ANÁLISIS DE DESGASTE RECUBRIMIENTO Y TORNILLO TIPO SIN FIN	41
5. CONCLUSIONES	46
6. RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	48
BIBLIOGRAFIA	52

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química polvo de Níquel y Al_2O_3 - 13% TiO_2 (% en peso)	25
Tabla 2. Parámetros principales para la proyección de las capas del recubrimiento	27
Tabla 3. Parámetros utilizados para los ensayos de desgaste.	31
Tabla 4. Resultados del ensayo de adhesión del recubrimiento	37
Tabla 5. Composición química del tornillo tipo sin fin de referencia	38
Tabla 6. Medida de microdureza en escala Vickers para las capas del recubrimiento, sustrato y tornillo tipo sin fin	40
Tabla 7. Resultados de los ensayos de desgaste con carga de 4.90 N y 9.81 N	42

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del proceso de proyección térmica por combustión en polvo	22
Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento experimental	23
Figura 3. Micrografía electrónica de barrido realizada al corte transversal de las capas del recubrimiento depositadas sobre el sustrato de AISI-SAE 1020. 1000x	34
Figura 4. Micrografía electrónica del recubrimiento Ni y Al ₂ O ₃ -13% TiO ₂ depositado sobre el acero AISI/SAE 1020. 500x	34
Figura 5. Superficie de fractura de las probetas ensayadas para el ensayo de adhesión.	36
Figura 6. Gráfica fuerza vs desplazamiento soportado por el recubrimiento durante el ensayo de adhesión.	37
Figura 7. Micrografías ópticas del tornillo tipo sin fin de referencia. a) 100x, b) 1000x	39
Figura 8. Perfil de microdureza a) Sección transversal de las capas del recubrimiento y del sustrato. b) Tornillo tipo sin fin de referencia	40
Figura 9. Coeficiente de fricción en función del tiempo a) Recubrimiento. b) Tornillo tipo sin fin de referencia. Carga 4.90 N	41
Figura 10. Micrografías ópticas de las superficies luego del ensayo de desgaste a 4.90 N. a) Recubrimiento (sin debris) b) Recubrimiento (con debris). c) Tornillo tipo sin fin (sin debris). d) Tornillo tipo sin fin (con debris)	44

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN Y ADHERENCIA DE UN RECUBRIMIENTO DEPOSITADO MEDIANTE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN TÉRMICA POR COMBUSTIÓN A BAJA VELOCIDAD SOBRE UN ACERO AISI/SAE 1020 UTILIZADO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN DE LA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA

AUTORES: JUAN CARLOS RUIZ QUIJANO, MARLON ESNEIDER FLOREZ HERNANDEZ**

PALABRAS CLAVE: Proyección térmica, Desgaste, Recubrimiento, Adherencia.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se comparó el desgaste sufrido por un tornillo tipo sin fin utilizado en la prensa extractora de aceite de palma africana con un recubrimiento metal-cerámico (Ni, Al₂O₃-13% TiO₂) depositado sobre un acero AISI/SAE 1020 mediante la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad realizando la prueba de desgaste "Pin-on-Disk".

Con el fin de determinar los mecanismos de desgaste, estudiar la adherencia y características del recubrimiento depositado y el tornillo tipo sin fin, se tomaron muestras significativas bajo norma para realizar los ensayos. Dicho tornillo está constituido por una matriz austenítica con carburos en su límite de grano que brindan una resistencia al desgaste favorable. El recubrimiento metal-cerámico presentó una morfología con espesores adecuados, buena adherencia entre el sustrato y la capa homogénea de Ni y una capa de Al₂O₃-13% TiO₂ porosa y con defectología propia de las características del polvo depositado. La Microdureza Vickers determinada para la capa de Al₂O₃-13% TiO₂ obtuvo valores mucho más altos comparados con la superficie del tornillo tipo sin fin.

Se concluye que el recubrimiento (Ni, Al₂O₃-13% TiO₂) obtuvo buenas tasas de desgaste frente a las del tornillo utilizado en la prensa extractora, creando la posibilidad de implementar el recubrimiento para dicho fin. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el producir un tornillo tipo sin fin con recubrimiento es más costoso debido a los insumos que se necesitan para la proyección térmica y la geometría del sustrato metálico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Directora: Sandra Judith García Vergara.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE RESISTANCE TO THE ABRASION AND ADHERENCE OF A COATING DEPOSIT THROUGH THE LOW VELOCITY OXY-FUEL THERMAL SPRAY TECHNIQUE ON AN AISI / SAE 1020 STEEL USED IN THE ENDLESS-TYPE SCREWS OF THE AFRICAN PALM OIL EXTRACTOR PRESS.

AUTHOR: JUAN CARLOS RUIZ QUIJANO, MARLON ESNEIDER FLOREZ HERNANDEZ**

KEYWORDS: Thermal Spray, Wear, Coating, Adherence.

DESCRIPTION

In this paper the wear suffered by an endless-type screw used in the extraction press of African palm oil was compared with a metal-ceramic coating (Ni, Al₂O₃-13% TiO₂) deposited on a Steel AISI/SAE 1020 using the low velocity oxy-fuel thermal spray technique doing the "Pin on Disk" wear test.

In order to determine the mechanisms of wear, study the adhesion and characteristics of the deposited coating and the endless-type screw, Significant samples were taken under standard for the tests. Said screw is constituted by an austenitic matrix with carbides in the grain boundary that provide a favorable wear resistance. The metal-ceramic coating presented a morphology with suitable thicknesses, good adhesion between the substrate and the homogeneous layer of Ni and a porous layer of Al₂O₃-13% TiO₂ with own defectology of the characteristics of deposited dust. Vickers microhardness determined for Al₂O₃-13% TiO₂ layer obtained much higher values compared to the surface of the endless-type screw.

It is concluded that the coating (Al₂O₃-13% TiO₂) got good wear rates against the screw used in the extraction press, creating the possibility of implementing the coating for that purpose. However, it should be noted that producing a screw with coating is more expensive because of the supplies needed for thermal spraying and geometry of the metal substrate.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Directora: Sandra Judith García Vergara.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria de aceite de palma africana en Colombia presenta un panorama bastante favorable a nivel mundial. Esta industria se ha convertido en una fuente de desarrollo tecnológico, social y económico importante y durante los últimos años nuestro país ha tomado como referencia a grandes productores de la industria con el fin de desarrollar y analizar modelos de competitividad que permitan mantener a Colombia con fuerza en el mercado y demanda mundial [5].

Teniendo como reto aumentar la productividad en la industria del aceite de palma, uno de los principales temas de estudio son las plantas de beneficio, ya que allí se han encontrado falencias relacionadas con la falla prematura de piezas indispensables para la maquinaria y el procesamiento continuo del fruto. La etapa de prensado en el procesamiento del fruto de palma, presenta actualmente uno de los problemas de falla prematura de piezas. Los tornillos tipo sin fin utilizados en las prensadoras encargadas de aprisionar los frutos de la palma compuestos por nueces y fibras han sufrido considerables problemas de desgaste y son una de las principales fuentes de pérdida en la producción y rendimiento del proceso de extracción del aceite [5].

Una forma de aumentar la resistencia al desgaste de los tornillos de prensado, consiste en la aplicación de recubrimientos superficiales sobre los sustratos de acero. Hay diversas formas de aplicar dichos recubrimientos, pero en general todos confieren mejores propiedades a la superficie del metal recubierto. El presente trabajo tiene como objeto estudiar el fenómeno de desgaste sufrido por un tornillo sin fin fabricado en acero colado actualmente utilizado en las prensas extractoras de aceite de palma y propone el estudio de un recubrimiento desarrollado por la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad

que pueda utilizarse y/o proponerse como solución frente a los problemas de deterioro de los tornillos sin fin de prensado.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la resistencia a la abrasión y adherencia de un recubrimiento depositado mediante la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad sobre un acero AISI/SAE 1020 utilizado en los tornillos tipo sin fin de la prensa extractora de aceite de palma africana.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Depositar un recubrimiento doble capa de Ni y $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$ (Níquel y Alúmina con 13% de dióxido de titanio), sobre un acero AISI/SAE 1020 por la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad.
- ❖ Caracterizar el recubrimiento mediante ensayos metalográficos, composición química, microdureza y pruebas de adhesión siguiendo la norma ASTM C633.
- ❖ Determinar la resistencia a la abrasión de un tornillo tipo sin fin utilizado actualmente en la industria de la palma africana siguiendo la norma ASTM G99-05.
- ❖ Determinar la resistencia a la abrasión del recubrimiento doble capa depositado por proyección térmica y comparar con el tornillo tipo sin fin problema.

2. MARCO TEÓRICO

En el proceso de extracción de aceite de palma intervienen diferentes etapas en las cuales se involucran procesos físicos y químicos antes de llegar al producto final. Estos procesos son la esterilización, el desfrutado, la digestión, el prensado, la clarificación y la palmistería. La maquinaria y equipos utilizados para el procesamiento del fruto de palma durante las diferentes etapas son sometidos a condiciones de trabajo bastante exigentes, en donde se presentan partículas abrasivas como fibras y nueces, altas temperaturas y medios corrosivos. Todos estos factores generan cambios en las propiedades de los materiales de cada equipo y un desgaste progresivo que con el tiempo puede causar bajos rendimientos y ocasionar paradas no programadas en los tiempos de producción [7, 2].

Es en la etapa de prensado en la cual se busca extraer la fracción líquida de los frutos provenientes de los digestores. Ésta fase líquida está compuesta por aceite de pulpa, agua y algunos sólidos en suspensión. La otra parte resultante es una masa compuesta por fibras y nueces que continuará a las siguientes etapas del proceso. El mecanismo de prensado consta principalmente de dos tornillos tipo sin fin que giran paralelamente en sentido contrario y aprisionan los frutos, éstos tornillos son considerados como los componentes con mayor criticidad debido a la alta frecuencia de fallas y los altos costos por pérdidas de producción, paradas y reducción en la capacidad de prensado; luego es en ésta etapa en donde se revelan los mayores índices de desgaste [7, 2].

Empresas como Cenipalma, Fedepalma y el Sena en Colombia han desarrollado trabajos de investigación que ayudan al conocimiento de los fenómenos de desgaste de los tornillos y sus posibles soluciones. El fenómeno que ocurre en la operación de los tornillos es complejo debido a que implica varios mecanismos de

desgaste actuando de manera simultánea. Este desgaste es producto de la fricción y el continuo contacto entre materiales de trabajo. Se logra identificar notoriamente cuando existen daños superficiales en el material, influyendo en la eficiencia del trabajo que ejecuta el tornillo, siendo necesario hacer intervenciones sobre el componente para garantizar que continúe realizando el trabajo deseado en las condiciones necesarias de la operación [7,10].

Con frecuencia el tipo de desgaste que se genera sobre estos tornillos es el desgaste por deslizamiento, el cual consiste en el movimiento relativo entre superficies de contacto aplicando una carga que produce una deformación plástica en la superficie gastada. Adicionalmente el desgaste abrasivo contribuye rápidamente al inicio de una falla, ya que este se caracteriza por la remoción o desplazamiento de material por acción de frotamiento entre superficies con protuberancias duras o por material particulado entre las superficies en acción. Otro tipo de desgaste al cual están expuestos los tornillos sin fin es el desgaste adhesivo. Este desgaste sucede por la formación de fuertes uniones entre dos superficies que se encuentran en contacto y en el momento en que ocurren deslizamientos se produce un desprendimiento de material de la superficie más débil [2,9].

Para contrarrestar el desgaste se ha recurrido a aumentar la resistencia mecánica superficial por medio de recubrimientos. Diferentes formas de deposición como electrodeposición, pinturas poliméricas, soldadura y proyección térmica, brindan distintas posibilidades en cuanto a materiales para recubrir, geometrías, costos y facilidad de deposición [16]. La aplicación de recubrimientos superficiales es uno de los métodos para mejorar el desempeño de las piezas metálicas que operan en un proceso industrial y que tendrán un deterioro inevitable. Si se realiza un diseño óptimo de los recubrimientos, las piezas podrán mejorar su rendimiento, aumentar su ciclo de vida en los procesos y por lo tanto disminuir la frecuencia de reparación

y reemplazo, por lo cual es necesario realizar un correcto estudio de los principales factores que afectan dichas piezas [4].

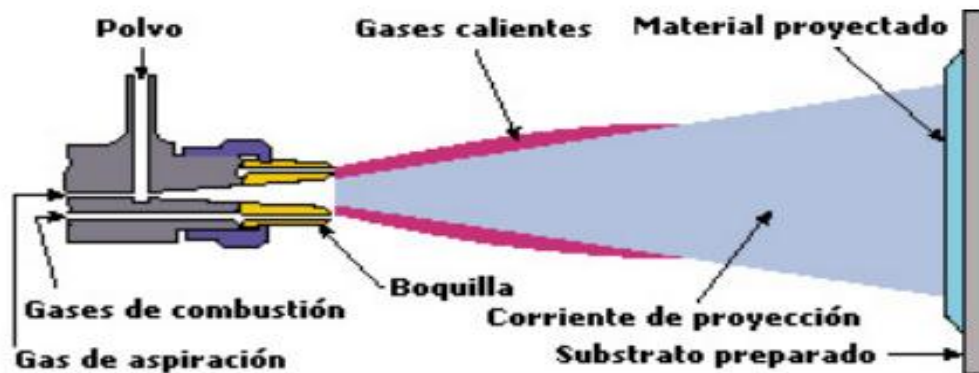
La proyección térmica (también conocida como rociado térmico) que se basa en el impacto consecutivo de un material fundido o semi-fundido sobre la superficie a recubrir, se ha convertido actualmente en una técnica muy utilizada en cuanto a propiedades superficiales demandadas y su aplicación es bastante amplia. Existen varios tipos de proyección térmica, entre los que se incluye la proyección térmica por llama, arco eléctrico, plasma, alta y baja velocidad oxicom bustible y detonación [2,17]. La diferencia entre cada tipo radica principalmente en la forma como se genera la energía térmica, las velocidades que alcanzan las partículas y la manera en cómo se alimenta el material a recubrir. La proyección térmica es una técnica muy versátil ya que permite depositar cualquier tipo de material sobre, prácticamente, cualquier tipo de sustrato; es una técnica económica, que permite altas velocidades de deposición, y posibilidad de automatización [15,16].

En los últimos años las tecnologías de proyección térmica han evolucionado generando nuevos procedimientos de deposición y creando algunas variaciones que solucionen limitaciones existentes, la proyección fría o proyección en estado sólido es uno de estos avances ya que hace posible la deposición de materiales susceptibles a la oxidación como son metales reactivos como el aluminio, cobre o titanio o materiales sensibles a la temperatura como es el caso de polvos nanoestructurados o amorfos [12].

La proyección térmica por combustión a baja velocidad es una técnica diferente pero basada en los mismos fundamentos de la proyección térmica por combustión a altas velocidades o HVOF (High Velocity Oxy Fuel). Esta consiste en proyectar las partículas a depositar a una velocidad mayor a 200 m/s y menor a la del sonido (340 m/s) mediante la aceleración de un flujo de gas a alta presión [14]. Para este tipo de proyección el proceso por combustión utiliza una mezcla de un combustible gaseoso o líquido (propano, hidrógeno, propileo, keroseno, etanol, etc.), y un gas

oxidante para generar una reacción de ignición continua dentro de una cámara de combustión. Los gases de escape resultantes de la reacción de combustión, junto con las partículas de polvo viajan a través de una boquilla hasta impactarse en la superficie a recubrir [15]. Actualmente se han implementado gran cantidad de recubrimientos utilizando esta técnica, buscando mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión de los aceros de baja aleación, usando materiales cerámicos como la alúmina (Al_2O_3), carburos de silicio (SiC), Zirconia (Zr) y compuestos metal-cerámicos como $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Ni-SiC y Ni-WC, que han presentado excelentes resultados. Sin embargo, se siguen estudiando variaciones en las composiciones de los diferentes compuestos para buscar un mejor rendimiento [19,20].

Figura 1. Esquema del proceso de proyección térmica por combustión en polvo



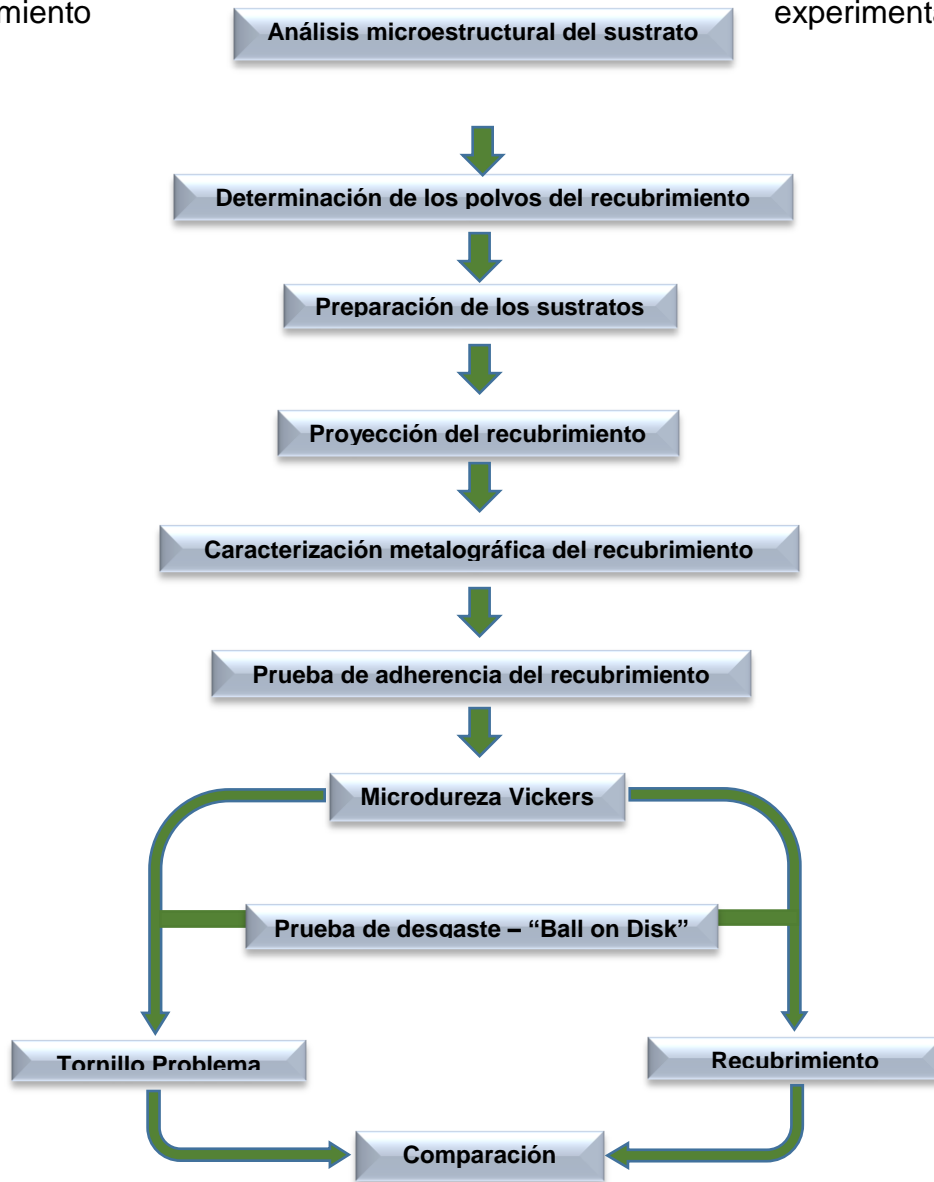
Fuente: [16]

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 2 se muestra el procedimiento experimental que se llevó a cabo para la realización del trabajo de investigación.

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento

de flujo del experimental



3.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL SUSTRATO

Teniendo en cuenta los tornillos sin fin utilizados en las prensas extractoras de aceite de palma, los cuales consisten comúnmente en aceros de bajo carbono con recubrimientos de cromo duro en su superficie, se tomó como sustrato para depositar el recubrimiento de estudio un acero al carbono de baja aleación AISI/SAE 1020. El análisis microestructural del sustrato se realizó siguiendo la norma ASTM E3. Se tomaron muestras transversales y longitudinales para observar su microestructura y a su vez su proceso de conformado. Las muestras fueron desbastadas utilizando papel abrasivo de SiC hasta llegar a una granulometría de 1200, seguido de un pulido con pasta de alúmina de 0.05 micras. Finalmente, las muestras pulidas fueron atacadas químicamente con Nital al 5% (5 ml NHO_3 – 95 ml de Etanol) con el fin de revelar su microestructura (Norma ASTM E407).

Para analizar la microestructura revelada se utilizó el microscopio óptico Olympus GX-71 ubicado en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander. También se determinó el tamaño de grano presente en la estructura revelada utilizando el método de comparación con rejilla a 100x según la norma ASTM E-112 y se estudió el contenido inclusiones no metálicas presentes en el sustrato (Norma ASTM E-45).

3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS POLVOS DEL RECUBRIMIENTO

Para la producción del recubrimiento se usó polvo de Níquel referencia **Eutectic Castolin CPM 1205/21021** como capa de anclaje y polvo de Al_2O_3 - 13% TiO_2 referencia **Saint Gobain SG – 107**. La composición química de los polvos de recubrimiento fue determinada por fluorescencia de rayos X usando un equipo marca Thermo - ARL OPTM'X, los análisis fueron realizados en la Universidad de Antioquia (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química polvo de Níquel y Al₂O₃ - 13% TiO₂ (% en peso)

Polvo de Níquel - Eutectic Castolin CPM 1205/21021		Polvo de Al ₂ O ₃ - 13% TiO ₂ - Saint Gobain SG – 107	
Elemento	Porcentaje en peso (%)	Compuesto	Porcentaje en peso (%)
Ni	97.62 ± 0.08	Al ₂ O ₃	84.74 ± 0.18
Si	1.79 ± 0.07	TiO ₂	14.32 ± 0.18
Fe	0.337 ± 0.017	Otros óxidos	0.94 ± 0.025
Al	0.181 ± 0.023		
Cu	0.071 ± 0.013		

3.3 PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS

Se cortaron muestras cilíndricas de acero AISI/SAE 1020 de diferentes dimensiones de acuerdo con el análisis a realizar. Muestras de 2.54 cm de diámetro y 1 cm de longitud para la caracterización química (Norma ASTM E1920-97), muestras de 2.54 cm de diámetro y 3.81 cm de longitud para el ensayo de adherencia (Norma ASTM C633-13) y muestras de 3.81 cm de diámetro y 1 cm de longitud para la prueba de desgaste “Ball on Disk” (Norma ASTM G99-05).

Algunas muestras fueron sometidas a un proceso de chorro abrasivo usando un corindón de tamaño de partículas entre malla pasante N° 14 y retenido de malla N° 20; este proceso fue realizado en una cámara hermética marca TRYNCO de la Universidad de Antioquia y se trabajó con una presión de aire constante a 65 psi, proyectando las partículas directamente sobre la superficie de los sustratos a recubrir. Lo anterior con el propósito de aumentar la rugosidad superficial y favorecer la adhesión del recubrimiento [1].

Finalmente, las muestras después de quedar rugosas fueron limpiadas con un baño ultrasónico, sumergiendo las probetas en un baño de alcohol y a una frecuencia de 10 hertz durante 10 minutos. Terminado este tiempo las probetas limpias fueron secadas rápidamente con el fin de evitar una posible oxidación con el medio.

Seguido de la limpieza de las probetas se procedió a medir la rugosidad de la superficie transversal o superficie en la cual va a proyectarse el recubrimiento, usando un rugosímetro marca Mitutoyo SJ – 201 (Norma ASTM D7127). Se realizaron diez (10) mediciones de la rugosidad promedio en zonas aleatorias de la superficie de las probetas.

3.4 DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

La deposición del recubrimiento por la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad sobre las muestras sometidas al chorro abrasivo de acero AISI/SAE 1020 se realizó en dos etapas, inicialmente se aplicó una capa de anclaje utilizando el polvo de Níquel, seguido por una capa final con polvo de Al_2O_3 -13% TiO_2 . Cada una de las proyecciones fue realizada sobre 11 muestras de sustrato de acero con las diferentes dimensiones anteriormente enunciadas. El recubrimiento fue llevado a cabo en la cámara ARESTE 1, desarrollada por el grupo de investigación GIPIMME de la Universidad de Antioquia, la cual cuenta con un software Jets et Poudres [3]. Las muestras fueron ensambladas en el portamuestras y como parámetros de proyección se usaron los descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros principales para la proyección de las capas del recubrimiento

Parámetros para la Proyección Térmica	Níquel Eutectic Castolin CPM 1205/21021	Al₂O₃ -13% TiO₂ Saint Gobain SG – 107
Distancia de proyección (cm)	13	8.5
Relación de gases (acetileno: oxígeno)	1:1.2	1:3.2
Pases de precalentamiento	2	3
Pases de proyección	4	4
Flujo de polvo (g/min)	21	13.2

3.5 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL RECUBRIMIENTO FINAL

Después de haber realizado la proyección de las dos capas del recubrimiento se estudió su rugosidad de la forma descrita en el apartado 3.3. La medición de la rugosidad promedio se realizó a una de los tres tipos de probetas proyectadas que serán utilizadas para los ensayos y análisis posteriores de evaluación [1,3].

3.6 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA DEL RECUBRIMIENTO

Las muestras recubiertas fueron preparadas metalográficamente según la norma ASTM E1920-97; se analizó un corte transversal de precisión para la muestra montada en resina, este corte se realiza después del montaje debido a que se debe evitar que el recubrimiento sufra algún desprendimiento de partículas durante el corte. Seguido del montaje y corte, se llevó a cabo el desbastado y pulido. El proceso de desbaste tuvo que hacerse con una particularidad que consiste en aplicar la fuerza en compresión, es decir en una misma dirección,

luego cada vez que se cambia el papel abrasivo debe mantenerse el mismo sentido del desbaste anterior. Este desbaste se realizó con papel abrasivo de SiC 240 hasta 1500. Terminado el desbastado se hizo un pulido de la muestra con pasta de diamante de granulometría 0.03 micras. Una vez que la muestra fue pulida se llevó al microscopio óptico Olympus GX-71 y se realizó la toma de las micrografías respectivas a diferentes aumentos. También se hizo el ataque químico de la muestra con nital al 2% esto con el fin de revelar nuevamente la microestructura del sustrato de acero y observar si las zonas cercanas a la superficie del recubrimiento sufrieron algún cambio en su estructura.

3.6.1 Medición de espesores. La medición de espesores del recubrimiento se realizó utilizando el software que utiliza el microscopio óptico Olympus GX-71, se obtuvo una micrografía a 100x de la misma sección transversal del recubrimiento y sobre ésta se realizó un barrido sobre cada una de las dos capas, tomando cincuenta (50) mediciones y así obtener el espesor promedio de cada capa.

3.6.2 Porosidad del recubrimiento. Para determinar el porcentaje de porosidad del recubrimiento se utilizó el método de comparación directa o método A, propuesto por la norma ASTM E2109-01. Usando las micrografías a diferentes aumentos se compararon los niveles de porosidad presentados por la norma con los revelados en las micrografías. Los niveles de porosidad establecidos por la norma van desde 0.5% a 15% [24].

3.7 FASES PRESENTES EN LA CAPA DE Al_2O_3 -13% TiO_2

El análisis cualitativo de fases presentes en la capa de Al_2O_3 -13% TiO_2 se realizó mediante la técnica de Difracción de Rayos X con incidencia rasante sobre la muestra de caracterización sin realizar ningún tipo de preparación. El análisis se hizo con un difractómetro de polvo marca BRUKER Modelo D8 DISCOVER del Edificio de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander.

3.8 ENSAYO DE ADHERENCIA DEL RECUBRIMIENTO

Las muestras para determinar la adherencia del recubrimiento siguieron la norma ASTM C633-13. Las muestras recubiertas fueron unidas por medio de un agente adhesivo de alta resistencia mecánica en su sección transversal a sustratos sin recubrimiento, alineando el sistema con una abrazadera y eliminando el exceso del agente adhesivo el cual tuvo un tiempo de secado de 24 horas. Después del secado se ensamblaron las probetas con dos tornillos en sus extremos los cuales permitirían el agarre de las mordazas de la maquina universal de ensayos y poder someter el sistema a una carga de tensión axial. Este ensayo se realizó utilizando la máquina universal de ensayos marca SHIMADZU del Laboratorio de Metalurgia Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Se evaluaron ocho (8) muestras para tener una reproducibilidad adecuada de la prueba.

3.9 CARACTERIZACIÓN DEL TORNILLO TIPO SIN FIN

Con el propósito de comparar la efectividad del recubrimiento propuesto en el presente trabajo, se estudió un tornillo sin fin de los actualmente usados en una planta extractora de aceite palma africana fabricado por la empresa Franco García Ingeniería S.A.S. Se cortó una muestra de 2.54 x 2.54 cm para el análisis de composición química y dos (2) muestras para caracterización microestructural y toma de microdureza.

La composición química se determinó por Espectrometría de Emisión Óptica por Chispa, utilizando el equipo Q4 Tasman – BRUKER perteneciente al Laboratorio de Espectroscopía del Edificio de Investigaciones de la Universidad Industrial de Santander. La preparación para realizar la caracterización metalográfica del acero se llevó acabo siguiendo lo mencionado en el apartado 3.6, a diferencia que el ataque químico necesario para revelar la microestructura se realizó mediante ataque electrolítico con ácido oxálico al 10% durante 90 segundos.

3.10 ENSAYOS DE MICRODUREZA DEL TORNILLO TIPO SIN FIN Y DEL RECUBRIMIENTO PROPUESTO

El ensayo de microdureza Vickers fue realizado siguiendo la norma ASTM E384-11 usando un equipo marca NEXUS 400 de Innovatest, con un indentador piramidal de diamante. La preparación de las muestras con recubrimiento se llevó a cabo siguiendo el procedimiento mencionado en el apartado 3.6. La muestra del tornillo tipo sin fin no fue montada en acrílico. Para la muestra con recubrimiento las indentaciones se realizaron en las dos capas del recubrimiento y en el sustrato base, para la muestra de tornillo sin fin las indentaciones se hicieron en la matriz y los límites de grano. El ensayo se realizó bajo las mismas condiciones para las dos muestras, realizando cinco (5) tomas de microdureza con valor de fuerza, entre 100 y 500 gf con un tiempo de indentación de 15 segundos [3].

3.11 PRUEBA DE DESGASTE PARA EL TORNILLO TIPO SIN FIN Y EL RECUBRIMIENTO PROPUESTO

Para la prueba de desgaste se prepararon dos (2) muestras del tornillo sin fin y dos (2) muestras del recubrimiento depositado sobre el acero al carbono, siguiendo la norma ASTM G99-05; se realizaron ensayos por triplicado para dos valores de carga diferentes (4.9 N y 9.81 N) con el fin de tener una buena reproducibilidad de la prueba. Las muestras tenían como dimensiones 3.8 cm de diámetro y 1.2 cm de espesor con una rugosidad superficial promedio de 7.46 μm para el recubrimiento y de 7.03 μm para el acero. Los parámetros utilizados para los ensayos de desgaste se muestran en la Tabla 3.

Para hallar la tasa de desgaste se determinó el peso de cada probeta antes y después de las pruebas tribológicas y esta pérdida de masa se dividió entre la distancia total deslizada en el ensayo y la carga normal aplicada. La profundidad

de la huella fue medida por medio de perfilometría y se realizó para tener una idea si la huella ya había llegado al sustrato.

Tabla 3. Parámetros utilizados para los ensayos de desgaste.

Carga (N)	Ensayo		Distancia recorrida (m)	23
	1	2	Ciclos	1800
	4,90	9,81	Periodo de Muestreo (ms)	500
T (°C)	22 ± 2 °C		Radio de Trayectoria (mm)	2
Humedad Relativa	HR 45 ± 5%		Contra cuerpo	Bola Alúmina
Tiempo (min)	30		Diámetro del Contra cuerpo (mm)	6
Velocidad (rev/min)	60			
Velocidad (m/s)	0.0125			

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL SUSTRATO

Las micrografías obtenidas por medio del microscopio óptico del sustrato de acero AISI/SAE 1020 confirmaron que la microestructura del sustrato corresponde a una microestructura perlítica en matriz de ferrita característica de los aceros al carbono de baja aleación, con un tamaño de grano N° 7. También se revela el proceso de conformado de la varilla de acero mostrando el alargamiento de los granos de ferrita y los valles perlíticos en dirección al proceso de laminación.

Adicionalmente se pudo observar el contenido de las inclusiones no metálicas presentes en el acero analizando la sección longitudinal sin ataque químico. Las inclusiones no metálicas encontradas fueron inclusiones tipo A (sulfuro) en mayor cantidad e inclusiones tipo C (silicatos) y tipo D (óxidos globulares) en proporciones muy pequeñas. La presencia de estas inclusiones no metálicas no representan un problema significativo en las propiedades del acero ya que el grado de severidad que se determinó fue de nivel 3 para inclusiones tipo A y nivel 1 para inclusiones tipo C y D.

4.2 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LAS MUESTRAS DE ACERO AISI/SAE 1020

Los valores obtenidos de rugosidad promedio (Ra) de los tres (3) tipos de muestras indicaron que no hubo una variación considerable entre ellas durante la preparación superficial realizada por granallado, obteniendo un valor promedio de rugosidad de 5.7 μm . Este valor de rugosidad en el sustrato es adecuado para la deposición del recubrimiento según los criterios para una buena adhesión recomendados por la literatura, ya que según estudios realizados esta debe ser

2.5 veces el diámetro medio de las lamelas formadas por las partículas depositadas y para materiales cerámicos este diámetro varía entre 1 y 3 μm [1,3].

4.3 CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DEL RECUBRIMIENTO

4.3.1 Morfología. La morfología del recubrimiento depositado se puede observar en la Figura 3. El recubrimiento consiste de lamelas o laminillas superpuestas unas sobre otras las cuales presentaron defectos como partículas sin fundir o semifundidas, porosidades, desprendimiento de algunas partículas, falta de cohesión entre lamelas, entre otros. Los defectos encontrados en este tipo de recubrimientos son producto de varios factores, como la composición de las partículas del polvo proyectado, morfología de las partículas, propiedades del material y parámetros del proceso de deposición por proyección térmica [1].

Teniendo en cuenta el método de comparación directa se pudo apreciar que la presencia de mayor porosidad está en la capa de Al_2O_3 -13% TiO_2 en comparación con la capa de Níquel. Esto se debe a que el Níquel posee una mayor ductilidad, mayor coeficiente de expansión térmica y menor temperatura de fusión, que le permiten que las partículas impacten al sustrato con mayor plasticidad generando una capa más homogénea. El porcentaje de porosidad para la capa de Níquel se estimó alrededor de 1% y de 6% para la capa de Al_2O_3 -13% TiO_2 [24].

4.3.2 Medición de espesores. Después de las medidas realizadas sobre la sección transversal del recubrimiento, el espesor promedio obtenido para la capa de níquel fue de 65.09 μm y 183.22 μm para la capa de Al_2O_3 -13% TiO_2 (Figura 4).

Figura 3. Micrografía electrónica de barrido realizada al corte transversal de las capas del recubrimiento depositadas sobre el sustrato de AISI-SAE 1020. 1000x

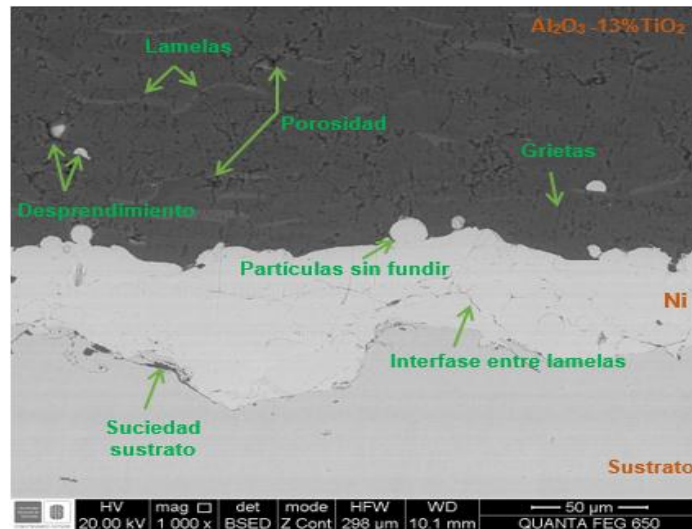
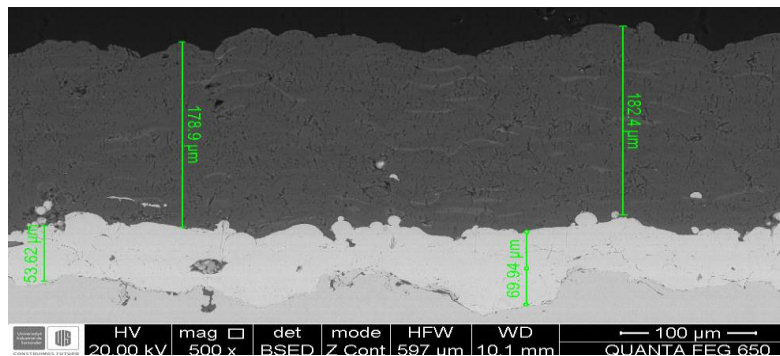


Figura 4. Micrografía electrónica del recubrimiento Ni y Al₂O₃ -13% TiO₂ depositado sobre el acero AISI/SAE 1020. 500x



La microestructura revelada en la zona cercana a la interfase sustrato-recubrimiento después de realizada la proyección de las partículas del recubrimiento no sufrió ningún cambio con respecto a la inicial del acero base, dado que el precalentamiento necesario para realizar la deposición del recubrimiento no alcanza temperaturas muy altas que puedan producir cambio microestructural. A su vez la temperatura con la cual impactan las partículas del

recubrimiento tampoco es alta, de ahí que el anclaje adhesivo y cohesivo que ocurre entre las partículas y el sustrato es más mecánico que térmico [1].

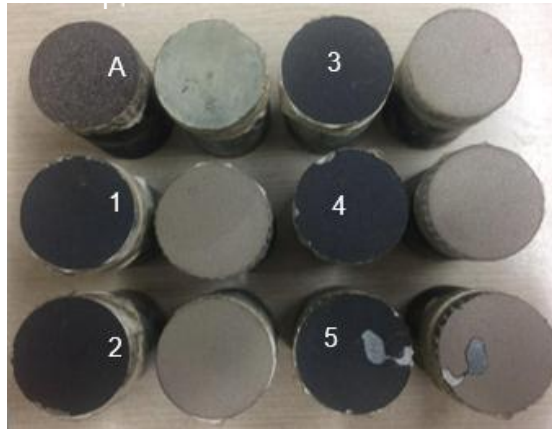
4.4 FASES PRESENTES EN LA CAPA DE Al_2O_3 -13% TiO_2

De acuerdo con los resultados de los análisis de difracción de rayos X se pudo establecer que las fases presentes en la capa depositada Al_2O_3 -13% TiO_2 fueron alúmina (Al_2O_3) en forma de corindón, dióxido de titanio (TiO_2) en forma de rutilo, eta-óxido de aluminio ($\text{Al}_{2.144}\text{O}_{3.2}$) y óxido de titanio (TiO).

4.5 ENSAYO DE ADHESIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Para llevar a cabo el ensayo de adherencia del recubrimiento, se determinó inicialmente la resistencia mecánica del pegante adhesivo necesario para evaluar el recubrimiento, esto se hizo ensayando dos probetas sin recubrimiento unidas solo por el pegante, obteniendo un valor de resistencia a la adhesión de 13.42 MPa (Tabla 4). Después de evaluar el pegante se procedió a realizar los ensayos con las muestras recubiertas. En la Figura 5, se observan las superficies de fractura después de haber sido ensayadas las muestras, allí se puede identificar que las probetas 1, 2, 3 y 4 presentan una falla adhesiva interna, ya que el desprendimiento se presentó en la interfase de las capas de Níquel y Al_2O_3 - 13% TiO_2 y no presentaron una falla cohesiva entre las partículas de cada capa, como si se puede observar en la superficie de fractura de la probeta 5 en donde existe falla adhesiva y cohesiva [21].

Figura 5. Superficie de fractura de las probetas ensayadas para el ensayo de adhesión.



En la Figura 6 se observa el comportamiento de las probetas frente al ensayo realizado, el valor máximo de esfuerzo soportado se dio para el ensayo del pegante adhesivo, lo cual está acorde según la norma ASTM C633-13 para poder evaluar el recubrimiento. Los ensayos para las probetas 1,2 y 3 registraron un esfuerzo cercano al pegante lo cual indica que tiene buena adherencia respecto a este. Los ensayos de las probetas 4 y 5 tienen valores inferiores y distantes del pegante indicando que la posible causa fue el no adecuado precalentamiento antes de hacer la deposición de Al_2O_3 -13% TiO_2 y se ve reflejado en que ocurre la falla rápidamente (Tabla 4).

Figura 6. Gráfica fuerza vs desplazamiento soportado por el recubrimiento durante el ensayo de adhesión.

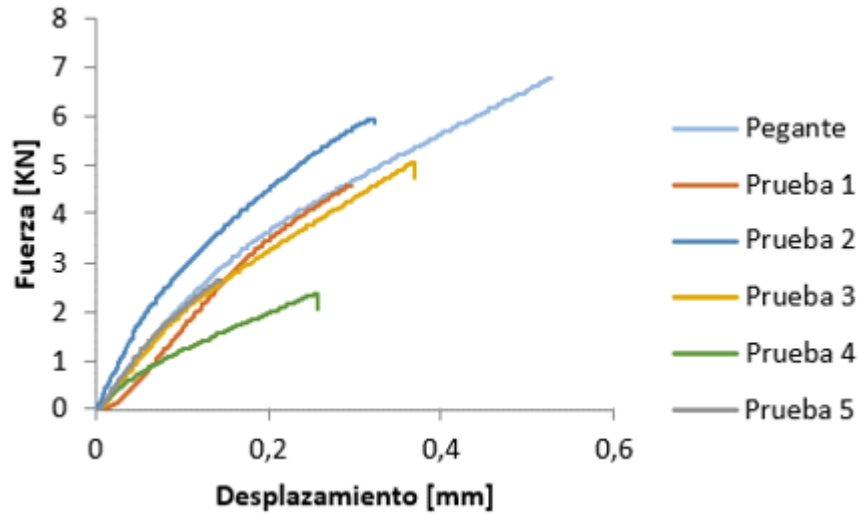


Tabla 4. Resultados del ensayo de adhesión del recubrimiento

	Adhesivo	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5
Fuerza de Adhesión [KN]	6.80	5,59	5,95	5,08	2,38	2,67
Esfuerzo Adhesión [MPa]	13,42	11,04	11,74	10,02	4,69	5,27

Los resultados reportados de resistencia a la adhesión o cohesión por este recubrimiento doble capa (Ni / Al₂O₃- 13% TiO₂) pueden variar dependiendo del método utilizado para evaluarlos como son el método de barra simple (SB-Single Bar), el método de doble barra (DB-Double Bar) y el método de arranque (Pull-off Method), así como de la capacidad que presentan los recubrimientos depositados ante el pegante adhesivo utilizado y la densidad del recubrimiento. Según la literatura para el método de adhesión bajo tensión el rango de esfuerzos soportados para un recubrimiento de Ni-5Al/Alúmina esta entre 60 y 15 MPa [1]. Otros estudios de adherencia realizados para recubrimientos de Al₂O₃- TiO₂ reportan valores entre 8 y 20 MPa para diferentes tipos de polvos depositados; así

como los recubrimientos que contienen una capa de anclaje de níquel y sobre ella una capa de Al_2O_3 que soportaron esfuerzos de 5.28 ± 0.49 MPa, lo cual indica que el recubrimiento propuesto en este proyecto tiene una buena adherencia ya que supero los valores reportados anteriormente [3,15].

4.6 CARACTERIZACIÓN DEL TORNILLO TIPO SIN FIN

4.6.1 Composición química. Los resultados de composición química elemental obtenidos por el ensayo de espectroscopia de emisión óptica por chispa que se muestran en la Tabla 5 presentan porcentajes de elementos de aleación poco comunes en aceros. Esto no permite clasificarlo bajo norma, pero revela una tendencia clara a obtener propiedades resistentes al desgaste y la corrosión necesarias para la aplicación del mismo [18].

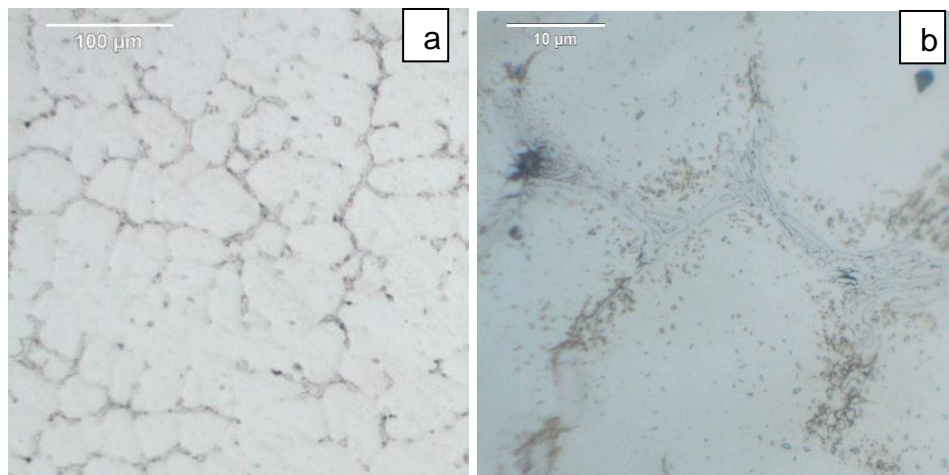
Ele.	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	V	P	W	Ti	Ta	N
%	0.573	0.588	0.532	0.150	18.64	0.251	7.664	0.189	0.005	0.059	0.0029	0.519	0.039

Tabla 5. Composición química del tornillo tipo sin fin de referencia

Los porcentajes de Carbono, Cromo y Níquel, indican que el tornillo tipo sin fin está fabricado en un acero inoxidable tipo austenítico, dado el alto contenido de níquel (gran estabilizador de la fase gamma), junto la presencia de manganeso. A su vez la presencia de Carbono, Wolframio, Molibdeno y Titanio, como elementos formadores de carburos hacen de éste un acero modificado con propiedades particulares, ya que el porcentaje de carbono cercano al 0.6 por ciento tiende a facilitar la formación y precipitación de carburos en los límites de grano, los cuales se encargarán de brindar mejores propiedades mecánicas [18].

La microestructura revelada del acero (Figura 7) corresponde claramente a una estructura de matriz austenítica (zona blanca) con precipitación de carburos definidos en sus límites de grano, esta estructura se forma gracias al proceso de recocido realizado a los tornillos después de su proceso de colada [18].

Figura 7. Micrografías ópticas del tornillo tipo sin fin de referencia. a) 100x, b) 1000x



4.7 MICRODUREZA DEL RECUBRIMIENTO Y DEL TORNILLO TIPO SIN FIN

Los resultados de microdureza Vickers de las dos capas de recubrimiento, del sustrato y del tornillo tipo sin fin de referencia se muestran en la Tabla 6. Con estos resultados del recubrimiento-sustrato se hizo un perfil de microdureza, el cual representa el comportamiento para cada una de zonas indentadas a las cargas aplicadas, como se muestra en la Figura 8(a). De allí se observa que la capa de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%TiO}_2$ utilizada para brindar resistencia al desgaste es la más dura por su carácter metal-cerámico, oponiendo mayor resistencia a ser penetrado. Para la capa de Ni, y el sustrato de acero, los valores disminuyeron considerablemente debido a que tienen características metálicas blandas y de poca resistencia mecánica [3].

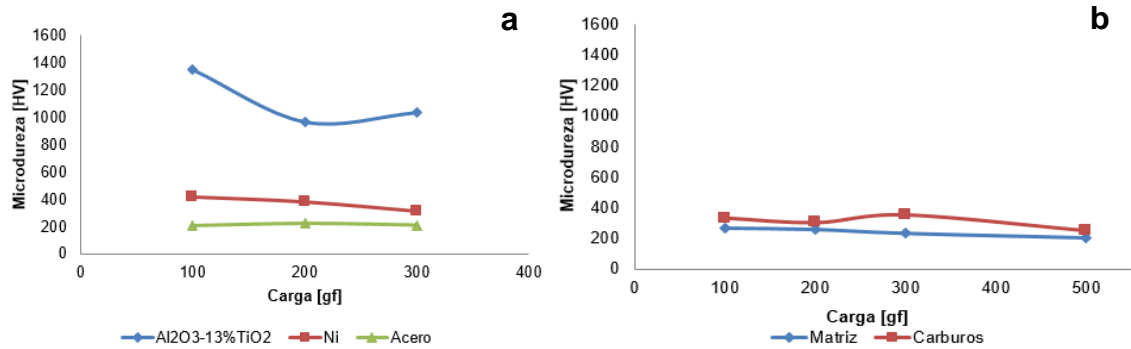
Al igual que con la muestra del recubrimiento se realizó un perfil de microdureza para el tornillo, indentando dos zonas que corresponden a la matriz austenítica y a la red de carburos que componen su microestructura anteriormente estudiada. Se destaca que los valores de la matriz son inferiores con respecto a la red de carburos y disminuyen paulatinamente con el aumento de la carga aplicada (Figura 8(b)).

Comparando la muestra del recubrimiento con la del tornillo sin fin, se destaca que el recubrimiento presenta una microdureza muy elevada respecto al tornillo sin fin de referencia.

Tabla 6. Medida de microdureza en escala Vickers para las capas del recubrimiento, sustrato y tornillo tipo sin fin

Carga (gf)	Microdureza (HV)				
	Recubrimiento-Sustrato			Tornillo	
	Al ₂ O ₃ -13%TiO ₂	Ni	Sustrato	Matriz	Carburos
100	1352,54 ± 139,65	412,83 ± 8,17	206,12 ± 9.26	270,89 ± 11,75	333,91 ± 57,30
200	965,87 ± 103,23	378,51 ± 23,52	225,80 ± 13.43	261,21 ± 33,99	305,08 ± 106,02
300	1034,29 ± 8,67	313,46 ± 17,54	211,13 ± 25,87	233,914 ± 26,11	353,73 ± 61,50
500	---	---	---	201,62 ± 3,14	255,07 ± 17.18

Figura 8. Perfil de microdureza a) Sección transversal de las capas del recubrimiento y del sustrato. b) Tornillo tipo sin fin de referencia

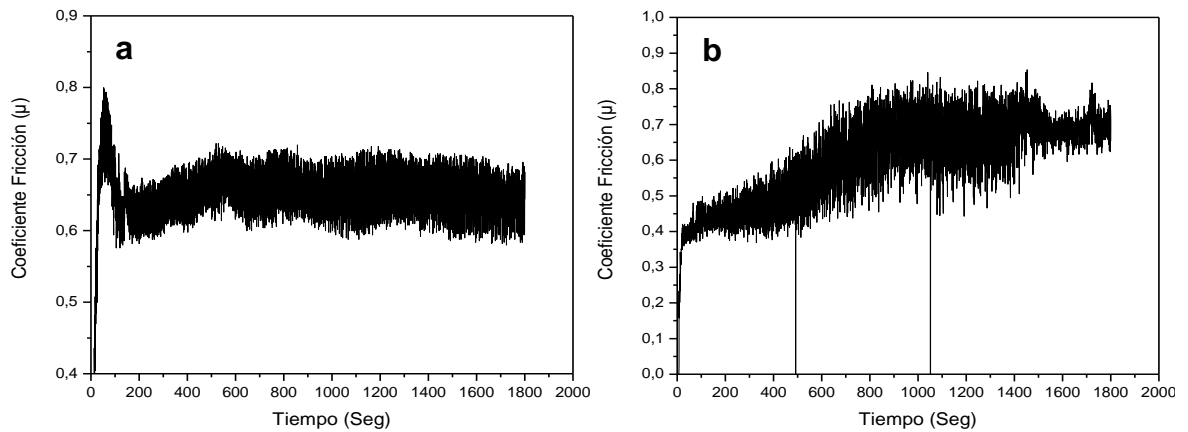


4.8 ANÁLISIS DE DESGASTE RECUBRIMIENTO Y TORNILLO TIPO SIN FIN

Se tomaron las medidas de rugosidad promedio (Ra) de las muestras antes de realizar los ensayos de desgaste, obteniendo un valor de 7.46 micras para el recubrimiento y 7.06 micras para el tornillo, siendo muy similares al momento de iniciar la prueba.

En la Figura 9 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción para cada una de las muestras ensayadas. La muestra del recubrimiento inicia la prueba presentando una resistencia alta al movimiento, alcanzando un valor de aproximadamente 0.8, pero generando rápidamente una estabilización del mismo entre 0.6 y 0.7 al cabo de 120 ciclos y permaneciendo dentro de este rango hasta finalizar la prueba (1800 ciclos). Mientras que la muestra del tornillo tipo sin fin inicia con valores inferiores a 0.5 y tarda alrededor de 600 ciclos en tratar de estabilizarse. Para el ensayo con carga de 9.81 N el comportamiento del coeficiente de fricción a lo largo de la prueba muestra una gran similitud con el ensayo a 4.90 N, corroborando una mayor estabilidad para la muestra del recubrimiento durante los 1800 ciclos.

Figura 9. Coeficiente de fricción en función del tiempo a) Recubrimiento. b) Tornillo tipo sin fin de referencia. Carga 4.90 N



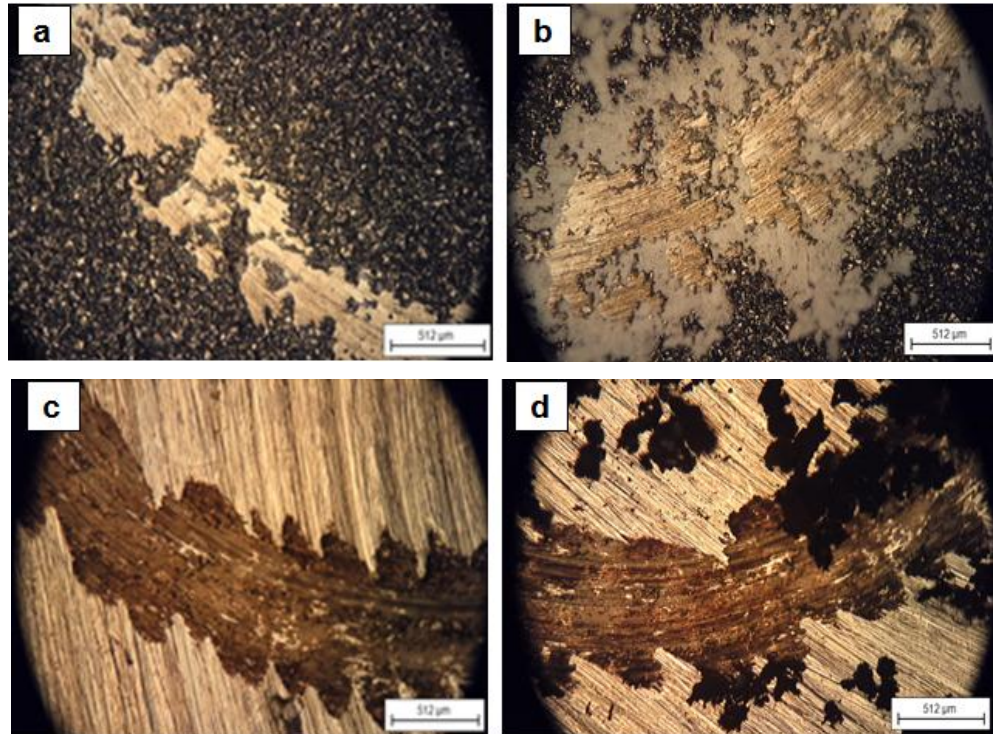
Obteniendo los resultados de la tasa de desgaste y profundidad alcanzada para cada una de las muestras (Tabla 7), se evidencia que tanto la muestra del recubrimiento como del tornillo tipo sin fin presentaron una baja tasa de desgaste, siendo menor para el recubrimiento en el ensayo a una carga de 4.90 N sin presentar una diferencia significativa, el cual a su vez presenta una menor reducción de espesor en la trayectoria de desgaste; para el ensayo a una carga de 9.81 N los valores de la tasa de desgaste fueron más altos para el recubrimiento en comparación con el tornillo tipo sin fin, aun así no presento una diferencia importante.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de desgaste con carga de 4.90 N y 9.81 N

Muestra	Carga 4.90 N		Carga 9.81 N	
	Recubrimiento	Tornillo	Recubrimiento	Tornillo
Tasa de desgaste (m ³ /Nm)	1,08 X 10 ⁻¹³ ± 5,00 x10 ⁻¹⁵	1,56 X 10 ⁻¹³	2,51 x10 ⁻¹³ ± 9,12 x10 ⁻¹⁴	1,51 X 10 ⁻¹³ ± 3,28 x10 ⁻¹⁴
Profundidad mínima (μm)	3,19 ± 0,65	3,25	11,83 ± 4,02	6,34 ± 2,01

Profundidad máxima (μm)	$11,85 \pm 2,08$	6,16	$15,83 \pm 4,17$	$8,6 \pm 2,01$
Pérdida de masa – contracuerpo (gr)	$0,0026 \pm 2,38 \times 10^{-4}$	0,0032	$0,0064 \pm 1,84 \times 10^{-3}$	$0,0083 \pm 8,57 \times 10^{-4}$

Figura 10. Micrográficas ópticas de las superficies luego del ensayo de desgaste a 4.90 N. a) Recubrimiento (sin debris) b) Recubrimiento (con debris). c) Tornillo tipo sin fin (sin debris). d) Tornillo tipo sin fin (con debris)



Observando las micrográficas anteriores se puede identificar que el mecanismo de desgaste al realizar el ensayo está dado principalmente por abrasión, causada por la acción del contra cuerpo (bola de alúmina), produciendo el desprendimiento de partículas que a su vez generan un desgaste sobre la misma superficie durante los ciclos siguientes. En la Figura 10(b) y 10(d), se aprecia el desprendimiento de partículas (debris) que ocasionan la abrasión sobre el mismo material.

Otro mecanismo que se desarrolla durante el ensayo es el desgaste adhesivo producto de la fricción no lubricada entre cuerpos, en donde al deslizarse una con la otra se desprende diminutos fragmentos de material el cual produce rugosidad en la superficie y contribuye a que el desgaste sea mayor. (Figura 10(a) y 10(c)) [7]. Estos mecanismos de desgaste se ven influenciados gracias a la morfología

propia de las muestras, alta rugosidad y porosidad presente, generando que a mayor carga (9.81 N) la tasa de desgaste aumente de manera respectiva al ensayo con 4.90 N.

5. CONCLUSIONES

- ❖ Fue posible lograr un recubrimiento de Ni y Al_2O_3 - 13% TiO_2 sobre el acero AISI/SAE 1020 mediante la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad.
- ❖ El recubrimiento doble capa depositado presentó una morfología libre de grietas entre las interfases del sustrato y las capas del recubrimiento, con espesores de 65.09 μm para la capa de Ni y 183.22 μm para la capa de Al_2O_3 -13 TiO_2 y con baja porosidad.
- ❖ Se determinó al realizar la prueba de adherencia que el recubrimiento presenta una buena cohesión de las partículas proyectadas, ya que la falla producida fue totalmente adhesiva entre la interfase de las capas de Níquel y Al_2O_3 - 13% TiO_2 . La interfase sustrato – níquel por el contrario demostró una buena adhesión garantizando su funcionamiento como capa de anclaje.
- ❖ Las muestras con recubrimiento presentan alta dureza superficial en la capa de Al_2O_3 - 13% TiO_2 alcanzando un valor representativo de 1030HV.
- ❖ La resistencia al desgaste de las muestras con recubrimiento es alta dado que su tasa de desgaste es TD: $1,08 \times 10^{-13} \pm 4,08 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{Nm}$ para la carga de 4.90 N.
- ❖ El recubrimiento propuesto en el presente trabajo es una alternativa para mejorar la resistencia al desgaste de los tornillos tipo sinfín utilizados en la prensa extractora de aceite de palma africana.

6. RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar el análisis de costos reales de fabricación de un tornillo tipo sin fin con recubrimiento utilizando la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad y comparar con los procesos actuales.
- ❖ Evaluar otro tipo de recubrimiento por la técnica de proyección térmica por combustión a baja velocidad.
- ❖ Realizar el recubrimiento a un tornillo sin fin a escala real e implementar su aplicación en una prensa extractora de aceite de palma africana.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. FAUCHAIS, Pierre L.; HEBERLEIN, Joachim V.R. y BOULOS, Maher I. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. New York: Springer, 2014. ISBN 978-0-387-28319-7
2. MONTERO VEGA, José Carlos, et. Al. Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos para prensas de aceite crudo de palma y recubrimientos como alternativa para extender su vida útil [en línea]. En: Boletín Técnico No 32. Convenio No 0337/11 SENA. Centro de Investigación en Palma de Aceite, CENIPALMA. Bogotá, 2013. [Consultado 13 septiembre 2016]. Disponible en:<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/download/10694/10680>.
3. VARGAS, Fabio. Elaboration de couches ceramiques epaisses a structures micrometriques et nanometriques par projections thermiques pour des applications tribologiques. Thèse de doctorat en Matériaux céramiques et traitements de surface. Soutenue, 2010.
4. PAWLOWSKI, Lech. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (Second Edition). Jhon wiley and Sons, Ltd., 2008
5. MARTÍNEZ PELÁEZ, Gabriel. Seminario La agroindustria de la palma de aceite: Un negocio sostenible e inclusivo. Fedepalma, APE y Universidad de la Sabana. Bogotá, 2013.
6. COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Aceite de palma. En: Boletín de Análisis por Producto, Boletín No. 2, febrero de 2010.

7. DELGADO RODRÍGUEZ, Francisco Claver. PALMA DE ACEITE: Innovaciones extracción aceite de palma [en línea]. En: Primer Congreso Palmero Latinoamericano (CPAL), Guatemala, octubre de 2013. [Citado 10 septiembre 2016]. Disponible en: <http://palmaceite.webcindario.com/palma/product.html>
8. IBARRA ECHEVERRIA, Mauricio; NÚÑEZ SOLÍS, Eduardo y HUERTA IBÁÑEZ, José Miguel. Manual de Mantenimiento: Manual para la recuperación y protección antidesgaste de piezas. Cerillos, Chile. INDRUA S.A, 2010, p. 17-20
9. MILLÁN, F. y MUÑOZ, N. Determinantes de la competitividad del sector de la palma de aceite, aceites, grasas vegetales, oleoquímica y biocombustibles en Malasia. En: Revista Palmas, vol. 36(1), 2015, p. 13-24. ISSN 0121-2923
10. IWASZKO, Józef. Surface remelting treatment of plasma-sprayed AL_2O_3 + 13wt. % TiO_2 coatings. February, 2006.
11. DAVIS, Guy D. and VENABLES, John D. Surface treatments of metal adherends. Chapter 21, p. 947-1008.
12. MIGUEL, J. M., et al. Recubrimientos de materiales compuestos metal-cerámico obtenidos por nuevas tecnologías de proyección térmica: Proyección fría (CGS) y su resistencia al desgaste [en línea]. En: Revista de Metalurgia, vol. 47, No. 5, septiembre-octubre, 2011, p. 390-401, 2011. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1206>
13. GONZÁLEZ, Andrés G., et al. Estudio de la resistencia a la corrosión y al choque térmico de recubrimientos a base de circona elaborados por proyección térmica por plasma atmosférico. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5.

Medellín, 2013, p. 263-269. [Citado 15 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/.../16667>

14. PALACIOS, Claudia, et al. Estudio de las propiedades mecánicas de un recubrimiento de $Al_2O_3 - TiO_2$ a partir tres métodos de medida [en línea]. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5. Medellín, 2013, p. 284-290. [Citado 15 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/19609/16670>

15. FERRER, Martha, et al. Depósito y caracterización de recubrimientos cerámicos de Al_2O_3 sobre acero 1020 por termorrociado [en línea]. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5. Medellín, 2013, p. 317-322. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/19609/16670>

16. NAVAS GUZMÁN, María del Carmen. Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y el desgaste [en línea]. Tesis Doctoral Ingeniería química, Universidad de Granada. Granada, 2007. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://hera.ugr.es/tesisugr/16608951.pdf>

17. AGÜERO, A. Ingeniería de superficies y su impacto medioambiental [en línea]. En: Revista de Metalurgia, vol. 43 (1) enero-febrero, 2007, p. 63-75. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/53/52> ISSN: 0034-8570.

18. ASM HANDBOOK. Metallography and Microstructures (9th Edition). Volume 9. ASM International. 1985

19. ECHEVERRI, Sergio; BEDOYA, Juliana y VARGAS, Fabio. Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección

térmica sobre acero al carbono [en línea]. En: Scientia et Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira. Septiembre de 2007, p. 181-186. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view File/4887/2757>

20. ARAQUE-PABÓN, Marilse; PEÑA-RODRÍGUEZ, Gabriel y VARGAS-GALVIS, Fabio. Desempeño mecánico y tribológico de baldosas cerámicas de arcilla roja recubiertas por proyección térmica a partir de alúmina [en línea]. En: Tecno Lógicas, vol. 18, No.35. Julio-diciembre de 2015, p. 125-135, 2015. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n35/v18n35a 12.pdf>

21. ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. C633-2013.

22. ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. G99-2015.

23. ASTM INTERNATIONAL. Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings. E1920 – 1997.

24. ASTM INTERNATIONAL. Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings. E2109-2001.

25. MARULANDA A., José Luddey; ZAPATA MENESES, Alberto y ISAZA VELÁSQUEZ, Enrique. Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico [en línea]. En: Scientia et Technica Año XIII, No 34, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Mayo de 2007. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/ 849/84934040.pdf>

BIBLIOGRAFIA

AGÜERO, A. Ingeniería de superficies y su impacto medioambiental [en línea]. En: Revista de Metalurgia, vol. 43 (1) enero-febrero, 2007, p. 63-75. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/53/52> ISSN: 0034-8570.

ARAQUE-PABÓN, Marilse; PEÑA-RODRÍGUEZ, Gabriel y VARGAS-GALVIS, Fabio. Desempeño mecánico y tribológico de baldosas cerámicas de arcilla roja recubiertas por proyección térmica a partir de alúmina [en línea]. En: Tecno Lógicas, vol. 18, No.35. Julio-diciembre de 2015, p. 125-135, 2015. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n35/v18n35a12.pdf>

ASM HANDBOOK. Metallography and Microstructures (9th Edition). Volume 9. ASM International.1985

ASTM INTERNATIONAL. Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings. E1920 – 1997.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. C633-2013.

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. G99-2015.

ASTM INTERNATIONAL. Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings. E2109-2001.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Aceite de palma. En: Boletín de Análisis por Producto, Boletín No. 2, febrero de 2010.

DAVIS, Guy D. and VENABLES, John D. Surface treatments of metal adherends. Chapter 21, p. 947-1008.

DELGADO RODRÍGUEZ, Francisco Claver. PALMA DE ACEITE: Innovaciones extracción aceite de palma [en línea]. En: Primer Congreso Palmero Latinoamericano (CPAL), Guatemala, octubre de 2013. [Citado 10 septiembre 2016]. Disponible en: <http://palmaceite.webcindario.com/palma/product.html>

ECHEVERRI, Sergio; BEDOYA, Juliana y VARGAS, Fabio. Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados mediante proyección térmica sobre acero al carbono [en línea]. En: Scientia et Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira. Septiembre de 2007, p. 181-186. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/4887/2757>

FAUCHAIS, Pierre L.; HEBERLEIN, Joachim V.R. y BOULOS, Maher I. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. New York: Springer, 2014. ISBN 978-0-387-28319-7

FERRER, Martha, et al. Depósito y caracterización de recubrimientos cerámicos de Al_2O_3 sobre acero 1020 por termorrociado [en línea]. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5. Medellín, 2013, p. 317-322. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/19609/16670>

GONZÁLEZ, Andrés G., et al. Estudio de la resistencia a la corrosión y al choque térmico de recubrimientos a base de circona elaborados por proyección térmica

por plasma atmosférico. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5. Medellín, 2013, p. 263-269. [Citado 15 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/.../16667>

IBARRA ECHEVERRIA, Mauricio; NÚÑEZ SOLÍS, Eduardo y HUERTA IBÁÑEZ, José Miguel. Manual de Mantenimiento: Manual para la recuperación y protección antidesgaste de piezas. Cerillos, Chile. INDRUA S.A, 2010, p. 17-20

IWASZKO, Józef. Surface remelting treatment of plasma-sprayed $AL_2O_3 + 13wt. \%TiO_2$ coatings. February, 2006.

MARTÍNEZ PELÁEZ, Gabriel. Seminario La agroindustria de la palma de aceite: Un negocio sostenible e inclusivo. Fedepalma, APE y Universidad de la Sabana. Bogotá, 2013.

MARULANDA A., José Luddey; ZAPATA MENESES, Alberto y ISAZA VELÁSQUEZ, Enrique. Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico [en línea]. En: Scientia et Technica Año XIII, No 34, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Mayo de 2007. [Citado 20 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/849/84934040.pdf>

MIGUEL, J. M., et al. Recubrimientos de materiales compuestos metal-cerámico obtenidos por nuevas tecnologías de proyección térmica: Proyección fría (CGS) y su resistencia al desgaste [en línea]. En: Revista de Metalurgia, vol. 47, No. 5, septiembre-octubre, 2011, p. 390-401, 2011. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1206>

MILLÁN, F. y MUÑOZ, N. Determinantes de la competitividad del sector de la palma de aceite, aceites, grasas vegetales, oleoquímica y biocombustibles en Malasia. En: Revista Palmas, vol. 36(1), 2015, p. 13-24. ISSN 0121-2923

MONTERO VEGA, José Carlos, et. Al. Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos para prensas de aceite crudo de palma y recubrimientos como alternativa para extender su vida útil [en línea]. En: Boletín Técnico No 32. Convenio No 0337/11 SENA. Centro de Investigación en Palma de Aceite, CENIPALMA. Bogotá, 2013. [Consultado 13 septiembre 2016]. Disponible en: <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/download/10694/10680>.

NAVAS GUZMÁN, María del Carmen. Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y el desgaste [en línea]. Tesis Doctoral Ingeniería química, Universidad de Granada. Granada, 2007. [Citado 18 septiembre 2016]. Disponible en: <http://hera.ugr.es/tesisugr/16608951.pdf>

PALACIOS, Claudia, et al. Estudio de las propiedades mecánicas de un recubrimiento de $Al_2O_3 - TiO_2$ a partir tres métodos de medida [en línea]. En: Revista Colombiana de Materiales No. 5. Medellín, 2013, p. 284-290. [Citado 15 septiembre 2016]. Disponible en: <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/viewFile/19609/16670>

PAWLOWSKI, Lech. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings (Second Edition). Jhon wiley and Sons, Ltd., 2008

VARGAS, Fabio. Elaboration de couches ceramiques epaisses a structures micrometriques et nanometriques par projections thermiques pour des applications tribologiques. Thèse de doctorat en Matériaux céramiques et traitements de surface. Soutenue, 2010.