

**ANÁLISIS DEL DETERIORO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN USADOS EN
UNA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA**

**JONATHAN ALEXANDER FLÓREZ ANGARITA
JESSICA ANDREA VARÓN VEGA**

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

2014

**ANÁLISIS DEL DETERIORO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN USADOS EN
UNA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA**

**JONATHAN ALEXANDER FLÓREZ ANGARITA
JESSICA ANDREA VARÓN VEGA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO METALÚRGICO**

Director

Ph.D. SANDRA JUDITH GARCÍA VERGARA

Codirector

Ing. RICARDO ANDRES GARCÍA VERGARA

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

2014

DEDICATORIA

*Este proyecto está dedicado en primer lugar al **Gran Arquitecto Del Universo** y a **mis amados padres** junto con mis familiares.*

*A **Dios** por ser el dador de mis capacidades y talentos, y a **mis padres** por siempre ser ese apoyo incondicional para poder cumplir las metas que he trazado en mi camino.*

*Además a la Licenciada **Diana García** por su entera disposición y colaboración en la edición de este proyecto, y por supuesto, a mi compañera de proyecto **Jessica Varón** por su compromiso, entusiasmo y dedicación para poder culminar satisfactoriamente esta etapa.*

*A mis compañeros de estudio **Clarita, Karensita, Julian, Stefy, Laurita** y demás, que contribuyeron de alguna manera en mi crecimiento personal y profesional.*

JONATHAN ALEXANDER FLÓREZ ANGARITA

DEDICATORIA

A **Dios**, porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza y sabiduría para continuar, él mi guía y mi refugio.

A **mis padres Pedro y María**, que a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo incondicional, depositando su entera confianza en cada reto que se me presenta sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad, ellos han forjado de mí una profesional integral.

A mi hermano **Miguel** y mi **cuñada** por su apoyo y cariño, a **Santi** por ser el destello de alegría para nuestra familia.

A **Javi**, por su paciencia, compromiso, respaldo, protección, y su noble Amor, porque en los días difíciles brindó una oración de paz y sabiduría para mi vida.

A mi compañero **Jony**, por su ánimo, empeño y perseverancia.

Jessica Varón

AGRADECIMIENTOS

Al gran jefe nuestro Dios todo poderoso.

A nuestra directora de proyecto la Dr. Sandra Judith García, por su gran aporte a nuestro conocimiento y el valor agregado de sus consejos a esta investigación. A nuestro codirector el Ing. Ricardo García Vergara y al Ing. Luis Carlos Franco que con su colaboración hicieron posible el cumplimiento de esta investigación.

Al Ingeniero Ambrosio Carrillo y a Domingo por ser la columna vertebral de esta tesis, gracias por su completo apoyo y la paciencia a largo de este tiempo.

A Diana, por cooperación en la realización de nuestro libro.

Y a cada una de las personas que contribuyeron a la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMISTE.	21
2.1.1 Esterilización	22
2.1.2 Desfrutado.....	22
2.1.3 Digestión	23
2.1.4 Prensado.....	23
2.1.5 Clarificación.....	24
2.1.6 Deshidratación y almacenamiento	24
2.2 DESGASTE DE PIEZAS	24
2.2.1 Mecanismos de desgaste:.....	25
3. METODOLOGÍA	30
3.1 RECEPCIÓN Y CORTE DE LAS PIEZAS.....	31
3.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA	32
3.3 PREPARACIÓN METALOGRAFICA DE LAS MUESTRAS Y CLASIFICACIÓN DE INCLUSIONES NO METÁLICAS.....	32
3.4 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.....	33
3.5 MEDIDAS DE MICRODUREZA	34
3.6 MEDIDAS DE DUREZA	34

3.7	MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD	35
3.8	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE PALMISTE POR ESPECTROFOTOMETRÍA INFRARROJA.....	35
3.9	ENSAYO DE INMERSIÓN EN ACEITE DE PALMISTE.....	35
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
4.1	INSPECCIÓN VISUAL	37
4.1.1	Tornillo tipo sin fin nuevo.....	37
4.1.2	Tornillo tipo sin fin deteriorado (120 h de servicio).....	39
4.2	ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA	39
4.3	CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA	41
4.3.1	Tornillo tipo sin fin nuevo.....	41
4.4	MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL TORNILLO TIPO SIN FIN	50
4.6	ENSAYOS DE INMERSIÓN EN EL ACEITE DE PALMISTE.....	52
4.5	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE PALMISTE POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA.....	55
4.7	SOLUCIONES VIABLES PARA MITIGAR EL DETERIORO DE LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN DE LA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMISTE	57
5.	CONCLUSIONES.....	59
6.	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	62
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
	ANEXOS.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema descriptivo de la extracción del aceite de palmiste.	22
Figura 2. Esquema de los diferentes mecanismos de desgaste que se pueden presentar en piezas metálicas.	29
Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo metodológico del presente proyecto.	30
Figura 4. Fotografía de los tornillos tipo sin fin en cada uno de sus estados. (a) Tornillo tipo sin fin nuevo. (b) Tornillo tipo sin fin deteriorado.	32
Figura 5. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo (a) 50X. (b) 100X. Sin ataque.	38
Figura 6. Micrografía óptica del tornillo tipo sin fin nuevo en el metal base a 100X. (a) Óxidos. (b) Alúmina. (c) Sulfuro.	42
Figura 7. Micrografía óptica del metal base del tornillo tipo sin fin nuevo. (a) 100X (b) 500X. Ataque con Nital al 2%.	43
Figura 8. Micrografía óptica de la interface metal base-recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo. (a) 200X (b) 50X (c) 100X. Ataque con Nital al 2%.	43
Figura 9. Micrografía óptica de la interface metal base – recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 500X. Ataque con Nital al 2%.	44
Figura 10. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 100X. Ataque con Nital al 2%.	45
Figura 11. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 500X, ataque con Nital al 2%.	45
Figura 12. Micrografía electrónica del recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo.	46
Figura 13. Análisis puntual con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona A indicada en la Figura 12.	47
Figura 14. Análisis puntual con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona B indicada en la Figura 12.	47

Figura 15. Micrografía óptica del metal base del tornillo sin fin deteriorado a 100X. Sin ataque.....	48
Figura 16. Micrografía óptica del metal base del tornillo tipo sin fin deteriorado a 100X. Ataque con Nital al 2%.	48
Figura 17. Micrografía electrónica de la interface metal base-recubrimiento del tornillo tipo sin fin deteriorado.	49
Figura 18. Análisis con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona A. indicada en la Figura 17.....	49
Figura 19. Perfil de microdureza en escala Vickers para la sección transversal de una muestra del tornillo tipo sin fin nuevo, en el punto 1.	51
Figura 20. Perfil de microdureza en escala Vickers para la sección transversal de una muestra del tornillo tipo sin fin nuevo, en el punto 2.	52
Figura 21. Espectro infrarrojo del aceite de palmiste virgen.	55
Figura 22. Espectros infrarrojos comparativos de las muestras de aceite de palmiste virgen a 120, 240 y 360 h de inmersión a 90 °C.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del tornillo tipo sin fin nuevo (% peso).	39
Tabla 2. Composición química del tornillo tipo sin fin deteriorado (% peso).	40
Tabla 3. Medidas de dureza en escala Rockwell para el metal base y el recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo y deteriorado.	50
Tabla 4. Datos obtenidos por inmersión del tornillo tipo sin fin nuevo, en aceite de palmiste a diferentes tiempos y temperaturas.	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados de espectrofotometria infrarroja para cada muestra individual de aceite de palmiste.	70
Anexo B. Cálculo de la velocidad de corrosión.....	72
Anexo A. Composición general de ácidos grasos del aceite de palmiste.	73

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL DETERIORO EN LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN USADOS EN UNA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA AFRICANA. *

AUTORES: FLÓREZ ANGARITA, Jonathan Alexander. VARÓN VEGA, Jessica Andrea. **

PALABRAS CLAVES: Tornillo sin fin, prensa extractora, aceite de palmiste, recubrimiento duro, agrietamiento en caliente, metal base.

DESCRIPCIÓN:

El proceso de extracción de aceite de palmiste se ve interrumpido por el constante mantenimiento que se realiza a la prensa, la cual posee varios tornillos sin fin compuestos por un acero y un recubrimiento duro que se deterioran rápidamente durante este proceso y necesitan ser reemplazados constantemente. Este trabajo de investigación se enfoca en el estudio físico y químico del deterioro de los tornillos sin fin con el propósito de estudiar las causas del deterioro prematuro y proponer alternativas que mitiguen el mismo. Para ello se caracterizaron dos muestras del tornillo sin fin, la primera en su estado nuevo y la segunda deteriorada después de haber estado 120 h en servicio. Se emplearon técnicas como microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, y espectroscopía de emisión óptica para este propósito. Además se caracterizó el aceite de palmiste por medio de espectrofotometría infrarroja, y se realizaron ensayos de inmersión de muestras del tornillo sin fin nuevo a 90° C por 120, 240 y 360 h para evaluar la pérdida de peso.

Se encontró que el tornillo sin fin no es fabricado con los mismos materiales y posee altos contenidos de azufre, que promueven el agrietamiento intergranular en caliente durante su fabricación, causándole notorias grietas al recubrimiento. Además se pudo evidenciar que el metal base es susceptible a la corrosión en presencia de los ácidos grasos característicos de los aceites de palmiste y finalmente para mitigar el deterioro que presentan los tornillos sin fin, se propusieron diferentes alternativas factibles.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Ph.D. Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ricardo Andres García Vergara.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE DETERIORATION OF THE WORM SCREWS USED IN PALM OIL EXPELLER PRESSING.

AUTHORS: FLÓREZ ANGARITA, Jonathan Alexander. VARÓN VEGA, Jessica Andrea**

KEY WORDS: worm screws, expeller pressing, palm kernel oil, hard coating, heat cracking, base metal.

DESCRIPTION:

The process of palm kernel oil is being interrupted by the constant maintenance that is done to the expeller pressing, which has some worm screws composed by Steel and hard coating that get damaged rapidly during this process and need to be replaced constantly. This Project focuses on the physical and chemical study of the worm screws deterioration in order to find out the causes of the early damage and propose alternatives that helps reducing this problem. To do so, two samples of the worm screws were characterized. The first without being used and the second deteriorated after being used for 120 h. optical microscopy, scanning electronic microscopy and energy dispersive spectroscopy were done for this purpose. Besides, the palm kernel oil was characterized using infrared spectroscopy and immersion tests were conducted to the new worm screws samples to 90° for 120, 240, 360 h in order to calculate their weight loss.

It was found that the worm screws are not made with the same materials and they have high contents of sulfur that cause the intergranular cracking in heat during their manufacture which produce notorious cracks in the coating. Furthermore, it was shown that the base metal is vulnerable to the corrosion in the presence of fatty acids characteristic of palm kernel oil, and finally, different feasible alternatives were proposed to mitigate the damage of the worm screws.

* Degree project

** Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Ph.D. Sandra Judith García Vergara. Codirector: Ricardo Andres García Vergara.

INTRODUCCIÓN

La industria de la palma en Colombia ha alcanzado un gran auge durante los últimos años, aportando un importante espacio para la generación de empleo y desarrollo de regiones fértiles, extendiéndose a más de 360.000 ha de producción para el 2010 y situándose como el país líder en producción de aceite en América Latina y el cuarto a nivel mundial. Al mismo tiempo, los cultivos sembrados generan un aporte al medio ambiente de manera favorable reduciendo el calentamiento global (1).

Los principales productos que se obtienen de la palma *Elaeis Guineensis* Jacq, es el aceite de palma y de palmiste, los cuales son extraídos a partir de la pulpa del fruto y de la almendra respectivamente. El aceite de palma es usado en la producción de biodiesel, aceites para mesa y cocina y grasas industriales, mientras que el aceite de palmiste es usado principalmente en la producción de cosméticos, jabones y margarinas. Es así como la producción de aceite de palma alcanzó 1.041.000 t y la de aceite de palmiste 85.000 t en 2013 (2).

En la actualidad, la mayoría de empresas que se dedican a esta actividad económica presentan inconvenientes con respecto a un proceso en particular, denominado prensado, en el que mediante el uso de tornillos tipo sin fin se obtiene por presión el aceite de palmiste, alojado en la almendra que proviene del fruto de la palma africana. El principal problema reportado en la prensa extractora de aceite de palmiste y que implica un gasto continuo para las empresas, es el recambio constante de los tornillos tipo sin fin, normalmente fabricados en acero al carbono y recubiertos con una capa metálica rica en cromo, que tienen una duración de alrededor de 120 h, a causa de un deterioro considerado como prematuro.

Por esta razón, y en cumplimiento de la visión institucional, este proyecto pretende investigar el posible deterioro por corrosión que sufren los tornillos tipo sin fin, utilizados en la prensa extractora de aceite de palmiste. Esto se llevará a cabo mediante la caracterización metalográfica de las piezas, que corresponden a un tornillo tipo sin fin nuevo y uno deteriorado, además de la realización de ensayos de inmersión de las muestras del tornillo tipo sin fin nuevo en el aceite de palmiste a temperatura ambiente y a 90 °C, durante diferentes tiempos de exposición.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el deterioro en los tornillos tipo sin fin usados en una prensa extractora de aceite de palmiste

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análisis metalográfico y de composición química del tornillo, antes y después del servicio para observar su estado microestructural.
- Analizar el deterioro de la pieza mediante ensayos de inmersión en el aceite de palmiste.
- Proponer un método para mitigar el daño causado en los tornillos tipo sin fin.

2. MARCO TEÓRICO

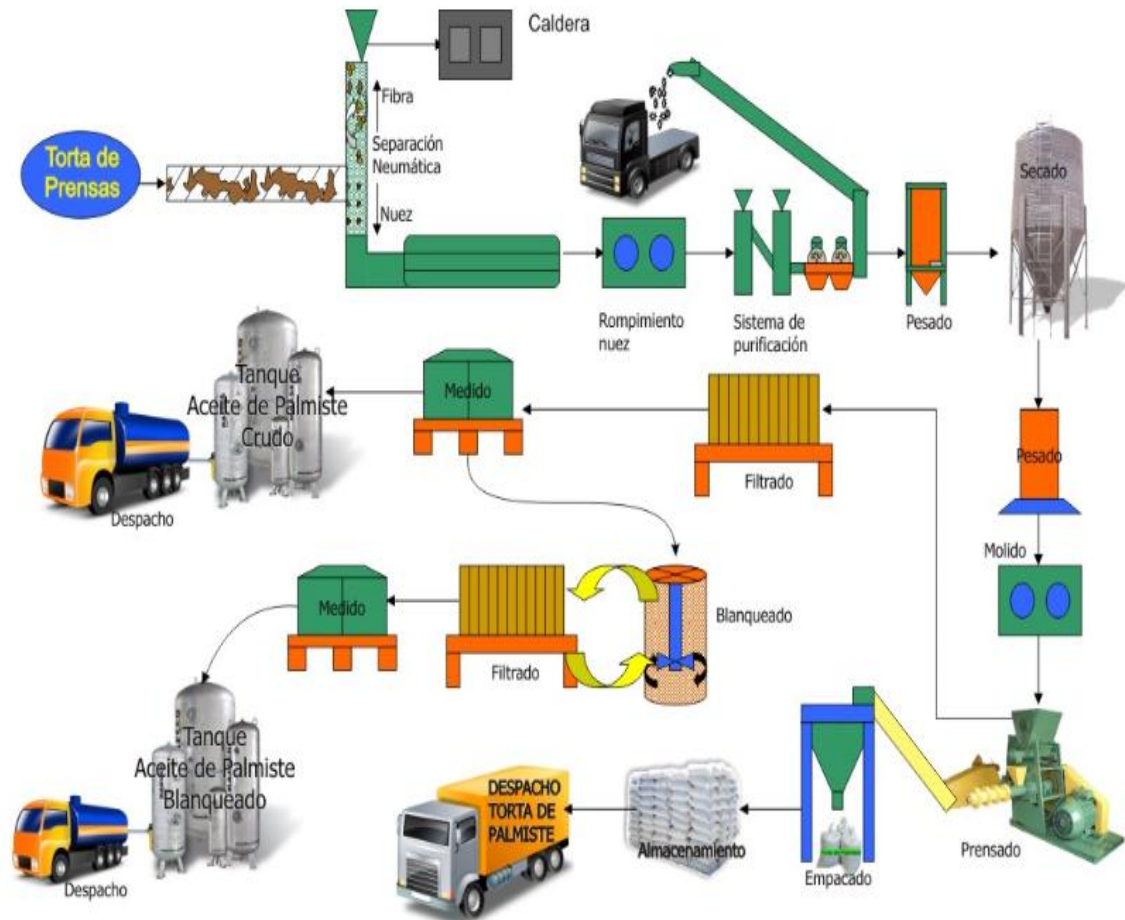
Los tornillos tipo sin fin usados en la prensa extractora de aceite de palmiste son piezas importadas, fabricadas en acero al carbono y recubiertas con una capa dura rica en cromo. Las piezas son maquinadas para darle las dimensiones adecuadas y recubiertas con una aleación de cromo depositado posiblemente mediante proyección térmica (3), debido a las dimensiones y características del depósito.

El tornillo tipo sin fin es una pieza característica de una prensa utilizada para la extracción mecánica del aceite de palmiste. Cumple dos funciones dentro de la máquina. La primera función es transportar las nueces hacia el centro de la máquina donde se ubican los tornillos complementarios y luego ejercer presión sobre la almendra y así obtener el aceite contenido en ella. Cabe resaltar que el parámetro que diferencia los tornillos es el paso con el que son diseñados.

2.1 GENERALIDADES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMISTE

El proceso de extracción de aceite de palmiste inicia cuando el fruto de la palma aceitera cuya especie pertenece a *Eleais Guineensis* Jacq se encuentra maduro y listo para ser cosechado, entonces es cortado y trasladado en tolvas hacia la planta de beneficio. A continuación, se describen los diversos pasos del proceso (Figura 1) (4).

Figura 1. Esquema descriptivo de la extracción del aceite de palmiste.



Fuente: Aceite S.A; Santa Marta, Colombia

2.1.1 Esterilización: El racimo es sometido a cocción en cilindros cerrados por medio de vapor de agua con el fin de evitar la acidificación del aceite, facilitar el desprendimiento de los frutos y la extracción del aceite. Las variables que intervienen en el proceso como la temperatura, presión de vapor y tiempo son inspeccionadas frecuentemente logrando una cocción homogénea del racimo (5).

2.1.2 Desfrutado: A través de puentes grúa es conducido el racimo hacia el tambor desfrutador que gira a una velocidad constante y se encarga de separar el fruto de la tuza la cual será utilizada posteriormente como abono en las

plantaciones. El fruto desgranado es conducido por un tornillo tipo sin fin a un elevador de cangilones encargado de dosificar los digestores (5).

2.1.3 Digestión: Con un previo calentamiento del fruto empieza la digestión, proceso en el cual se macera y golpea el tejido del fruto en un equipo que posee unas paletas encargadas de preparar el producto para el prensado, lo que resulta de la digestión es una masa pastosa y espesa que permite un menor desperdicio del aceite de palma y su vez un fácil acceso a la prensa.

2.1.4 Prensado: La pulpa resultante de la digestión anterior es guiada a la prensa con el fin de lavar la fibras y lograr que la extracción del aceite de palma sea lo más eficientemente posible y mantener las pérdidas de aceite dentro de los estándares.

Después de extraer el aceite de palma, se obtiene una mezcla sólida de la nuez y fibras, de allí se extrae el aceite de palmiste. La nuez es separada de la fibra por medio de una columna de aire y mandada a los quebradores, después de quebrada la nuez se procede a separar la almendra de la cáscara por medio de un ciclón, la almendra es mandada a un secador donde se le elimina la humedad para luego ser almacenada con una humedad no mayor del 5 % y la cáscara es enviada por medio de un transportador sinfín a la caldera para ser utilizada como combustible. La almendra producida se prensa y se extrae 40 % de aceite sobre almendra y 50 % harina sobre almendra y un 10 % humedad sobre almendra.

La prensa encargada de extraer el aceite de palmiste, consta de tornillos tipo sin fin que giran en sentido opuesto y la aprisionan para llevar a cabo la extracción del aceite. Estos tornillos logran sustraer el aceite con una gran eficiencia, separando la torta de palmiste del fluido. Este proceso resulta vital y costoso en la industria palmífera, debido al frecuente deterioro de los tornillos tipo sin fin y, por supuesto,

a la mano de obra especializada encargada de sustituir constantemente las piezas deterioradas de la prensa (6).

2.1.5 Clarificación: El aceite de palmiste se purifica en dos etapas. La primera es la clarificación estática, que permite separar la mayor parte del aceite por decantación y, a su vez, ser depositado en el fondo y bombeado a la segunda etapa denominada clarificación dinámica en la que es sometido a centrifugado, recuperando una cantidad de aceite significativa (7).

2.1.6 Deshidratación y almacenamiento: Con el fin de eliminar la humedad adquirida en las diferentes etapas y, además, finalizar el proceso, el aceite es sometido a un aumento de temperatura donde el agua presente se evapora y luego pasa al deshidratador que posee una turbina que finaliza la extracción de la humedad y es llevado finalmente a la zona de almacenamiento (7).

2.2 DESGASTE DE PIEZAS

El desgaste de un material se define como una pérdida progresiva dimensional y de masa del mismo. El exceso de deformación de una pieza puede hacer que no pueda funcionar correctamente, por lo tanto se debe intentar reparar o reemplazar. Puede ser que los resultados del desgaste al final sean los mismos pero las causas de él pueden llegar a ser muy distintas (8).

Es esencial entender los mecanismos de desgaste involucrados antes de tomar una decisión sobre la aleación que se empleará en la recuperación o el recubrimiento de la pieza. Si una aleación de recubrimientos presentará un solo mecanismo de desgaste sería muy sencillo seleccionar una en particular. Sin embargo, la gran mayoría de las piezas metálicas se desgastan generalmente por la combinación de dos o más mecanismos de desgaste. Por lo tanto, en

condiciones reales de trabajo podemos considerar que este argumento puede ser trascendental a la hora de la selección (8).

Las aleaciones empleadas en la recuperación y recubrimientos de piezas se deben elegir en base al compromiso existente entre cada mecanismo de desgaste. El conducto regular a seguir es centrarse en el mecanismo de desgaste principal y a continuación deben examinarse los secundarios (9).

2.2.1 Mecanismos de desgaste:

- **Abrasivo.** Este mecanismo de desgaste se produce por materiales extraños los cuales friccionan contra la pieza metálica, según las estadísticas corresponde al 55% o 60% del desgaste de los componentes industriales. Este tipo de desgaste se puede dividir en tres categorías principales (10):

- *Abrasión pura o de baja tensión:* Generalmente es el tipo de abrasión menos severa. Las piezas de metal se desgastan debido a la acción del desgarramiento repetitivo que producen partículas duras y con bordes afilados moviéndose a través de la superficie del metal con una velocidad variable. Los factores que se combinan para influir en este tipo de desgaste son la velocidad, la dureza, el filo de los rebordes, el tamaño y el ángulo en el que interactúan con la superficie. Aleaciones con contenido de carburos son útiles para resistir este tipo de desgaste y también los aceros con altos contenidos de carbono y cromo son adecuados para piezas expuestas a este tipo de abrasión debido a la ausencia de impacto (11).

El material que genera la abrasión se desliza a través de la superficie y la va desgarrando levemente, produciendo un desgaste progresivo y ocasionando un desprendimiento de pequeños filamentos del metal o recubrimiento.

- *Abrasión de alta tensión o esfuerzo*: Este tipo de abrasión es más complejo que el anterior y se origina cuando partículas duras, pequeñas y abrasivas son presionadas contra la superficie del metal con una fuerza suficiente para triturar la partícula. Este esfuerzo generado es de compresión y se presenta en dos componentes metálicos que aprisionan el elemento abrasivo. Algunas aleaciones resistentes a este tipo de desgaste son las de manganeso Austenítico, aceros Martensíticos y algunas aleaciones que contienen ciertos carburos pequeños repartidos sobre toda la matriz tenaz.

- *Abrasión por desgarramiento*: Este tipo de abrasión es la combinación de las dos anteriores acompañada con algún grado de impacto y carga con resultados mucho más perjudiciales generando un desgaste extremo. Cuando en la superficie del metal o recubrimiento se producen grandes deformaciones e incluso surcos ocasionados por objetos masivos se presenta una pérdida considerable de superficie. Para contrarrestar la abrasión por desgarramiento se usan aleaciones con alta tenacidad reemplazando las de alta dureza y resistencia al desgaste. Aleaciones a base de carburos de cromo son eficaces siempre y cuando se apliquen sobre una matriz tenaz como por ejemplo un acero al manganeso Austenítico (8).

- **Por impacto.** Se conoce como impacto a la aplicación de una carga compresiva que produce momentáneamente una tensión mecánica extremadamente alta sobre una pieza metálica. Si esta tensión excede la zona elástica del metal, se deforma en dirección lateral a partir de un punto a lo largo de la superficie. Los materiales muy frágiles no pueden soportar deformación excesiva haciendo que puedan presentar grietas a causa de un golpe muy fuerte o de la repetición de golpes suaves. Si el metal es suficientemente dúctil para que no se agriete, impactos sucesivos comprimen la superficie haciendo que tome una forma diferente en los bordes y eventualmente se rompa (12).

Los aceros al manganeso austeníticos (11 a 20% Mn), son la mejor elección para resistir impactos fuertes, debido a sus características de endurecimiento por deformación mecánica.

- **Adhesivo (metal-metal).** El desgaste adhesivo comprende un 15% del desgaste general en la industria, que se manifiesta por la fricción no lubricada entre piezas metálicas. La superficie de cualquier material presenta rugosidad aun a niveles microscópicos sin importar lo impecable de la superficie. Generalmente, las superficies del metal se mantienen en contacto y se deslizan una sobre otra rompiendo las superficies altas, desprendiendo diminutos fragmentos de metal. Las aleaciones más comunes para prevenir este tipo de desgaste son las martensíticas o aquellas a base de cobalto (12).
- **Por alta temperatura.** El calor afecta la microestructura del metal y generalmente reduce su durabilidad. La superficie de una pieza expuesta a altas temperaturas por largos periodos de tiempo es deteriorada significativamente. La resistencia al desgaste va ligada a la temperatura, disminuyendo a medida que esta aumenta, esto es común para la gran mayoría de aleaciones debido a la pérdida de propiedades ocasionadas por este factor.

La fatiga térmica es la principal causa de la falla en los metales que se ven expuestos a altas temperaturas (agrietamiento por temperatura). Esta se genera al someter un metal a ciclos repetitivos de altas temperaturas seguidos de enfriamientos rápidos. Las expansiones y contracciones sufridas por el metal pueden con el tiempo exceder la capacidad del metal a recuperarse, promoviendo la formación de grietas profundas (11).

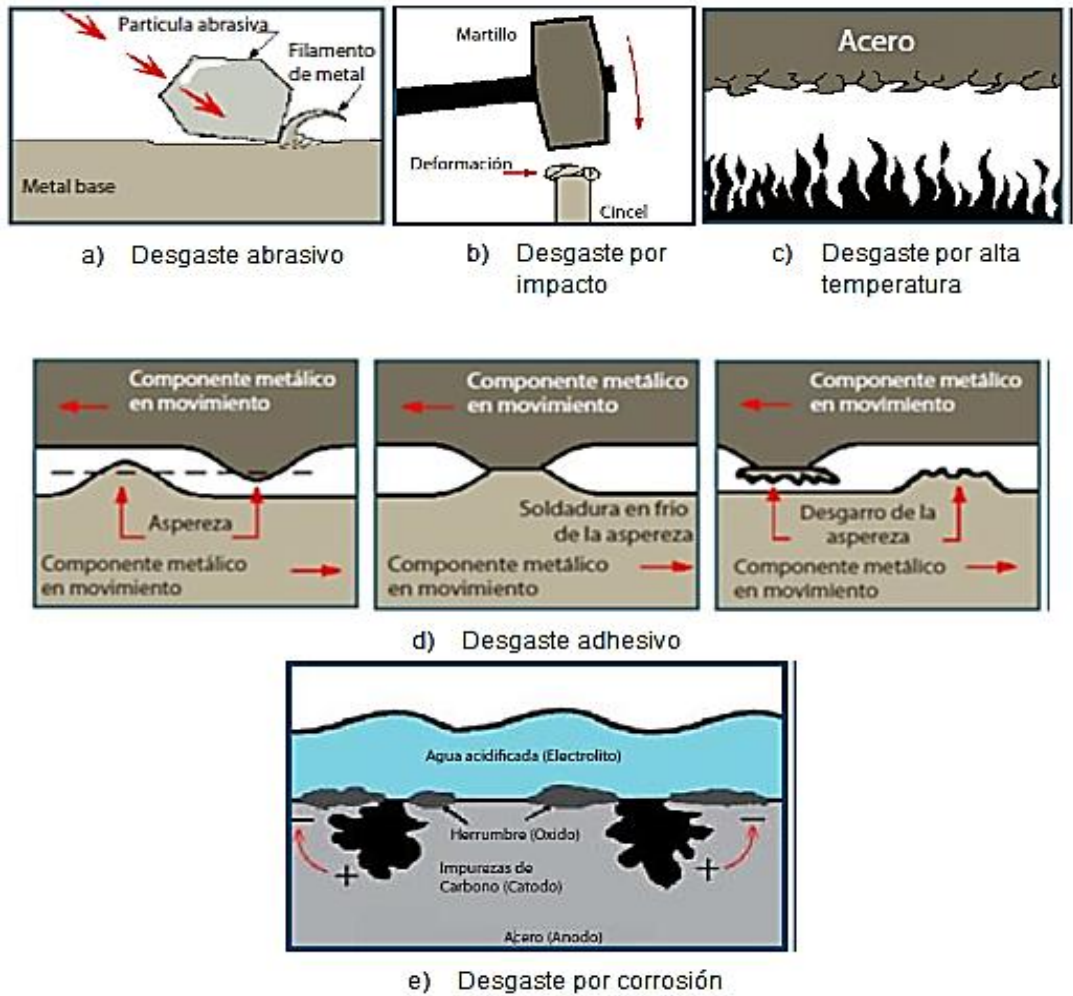
- **Por corrosión.** Los metales ferrosos están expuestos a muchas formas de corrosión y cada una puede causar daño al material por desgaste. Uno de los más habituales es la oxidación, definida como la transformación de la superficie del metal en óxido formando una cáscara que es muy frágil y al levantarse ocasiona la pérdida del material y la disminución del espesor original de la pieza. Este fenómeno se considera un factor secundario de desgaste. Aunque muchos tipos de aleaciones para recubrimientos ofrecen cierta protección contra la corrosión, deben conocerse las condiciones de ambiente específicas a las que va a estar sometido (13).

El agua en contacto directo con el acero produce micro celdas eléctricas. La humedad acidificada (electrolito) ataca la superficie del acero transformándolo gradualmente en óxido. También puede ocurrir que al aplicar recubrimientos se presenten pares galvánicos los cuales generan corrosión debido a la diferencia de potencial que puede existir entre los materiales puestos en contacto.

- **Por erosión.** Está definido como el proceso de eliminación del material provocado por incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. Este tipo de desgaste puede ser deliberado y las variables que determinan el desgaste es el ángulo de incidencia de las partículas con respecto a la superficie del metal. Un ejemplo muy común de este tipo de desgaste es la limpieza de los cascos de los barcos mediante chorro de arena (8).

La Figura 2 presenta los diferentes tipos de desgaste mediante esquemas, proporcionando una referencia general del comportamiento de las piezas en las cuales se presenta este fenómeno (11).

Figura 2. Esquema de los diferentes mecanismos de desgaste que se pueden presentar en piezas metálicas.

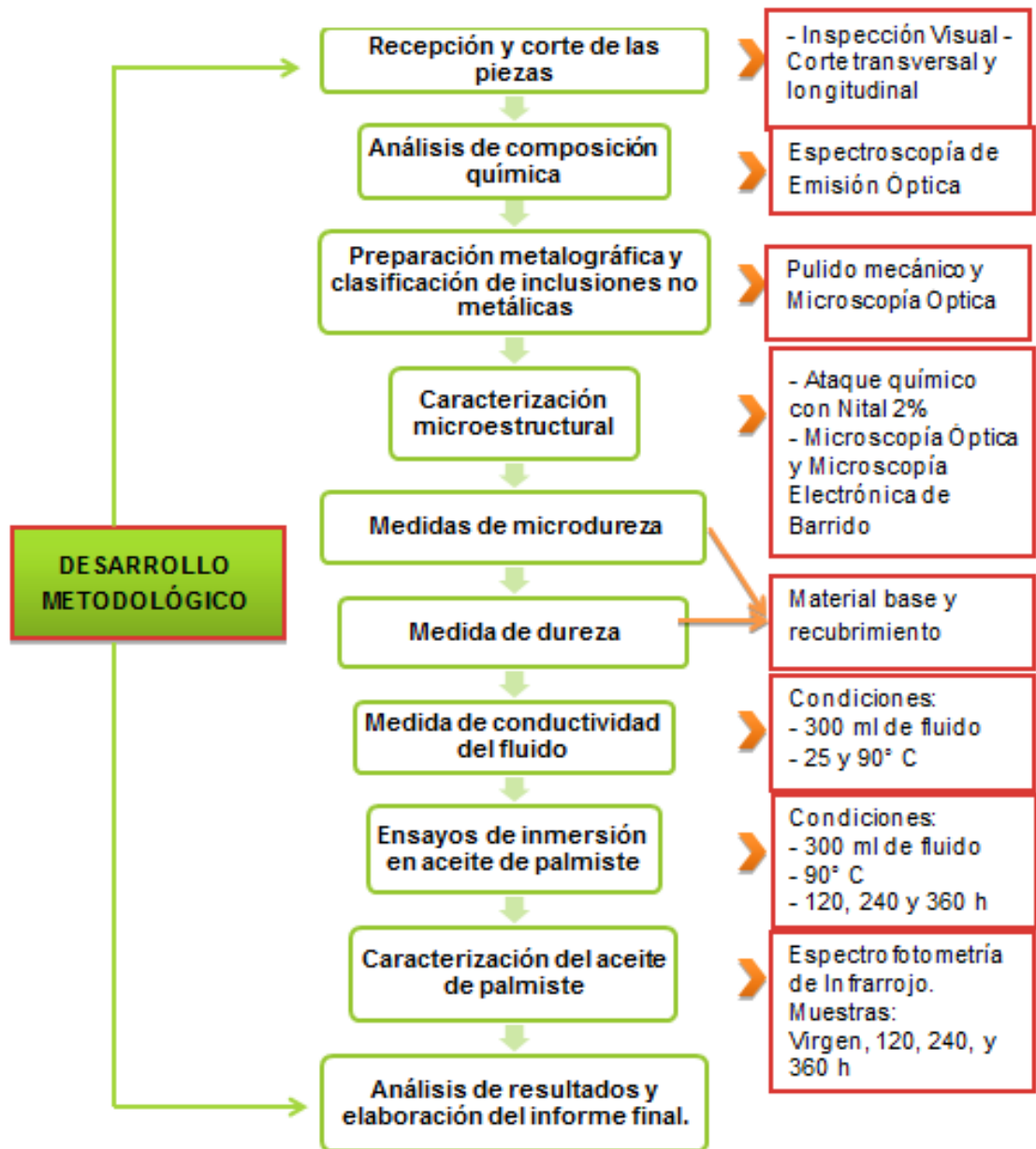


Fuente: Manual de Mantenimiento, INDURA S.A.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3 se describe la metodología seguida para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo metodológico del presente proyecto.



3.1 RECEPCIÓN Y CORTE DE LAS PIEZAS

Las piezas que se estudiaron en este proyecto corresponden a dos tornillos tipo sin fin (Figura 4). Una de las piezas se encuentra en estado nuevo, mientras que la otra pieza ya fue sometida a servicio durante 120 h, en la prensa extractora de aceite de palmiste. Las piezas fueron proporcionadas junto con una muestra de 3 L de aceite de palmiste, obtenido de la almendra.

Teniendo en cuenta el código ASME sección V, se inició con una limpieza mecánica de las muestras del tornillo tipo sin fin, haciendo uso de la pulidora DWALT-D28114, y posteriormente las muestras fueron secadas al aire. Luego se hizo una inspección visual directa de los dos tornillos tipo sin fin.

En la Figura 4(a) se observa el tornillo tipo sin fin en estado nuevo, este presenta una pintura de color vino tinto que fue aplicada al final del proceso de fabricación. Su principal objetivo es preservar la superficie del tornillo durante el transporte desde Malasia, contra la corrosión y el rayado de la pieza al momento de la manipulación.

La pieza observada en la Figura 4(b) corresponde al tornillo tipo sin fin deteriorado luego de 120 h de uso continuo en la prensa. Se puede observar que no existe la pintura presente en el tornillo tipo sin fin nuevo, debido a que esta capa se eliminó durante el servicio de la pieza. Son característicos en esta los desprendimientos de material en la hélice del tornillo y el evidente deterioro de la superficie.

Después de inspeccionadas las piezas, se realizaron cortes a través de la sección transversal y longitudinal de la hélice en los dos tornillos tipo sin fin, haciendo uso de una tronzadora Cs 315 Optimum. Luego fueron extraídas muestras con dimensiones de aproximadamente 2 x 2 x 2,5 cm de cada una de las piezas.

Figura 4. Fotografía de los tornillos tipo sin fin en cada uno de sus estados. (a) Tornillo tipo sin fin nuevo. (b) Tornillo tipo sin fin deteriorado.



3.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA

Las muestras del tornillo tipo sin fin fueron sometidas a análisis de composición química mediante espectroscopía de emisión óptica. Para ello, se usó una muestra plana de 2 x 2 x 2,5 cm de cada uno de los tornillos. El análisis se realizó en un espectrómetro de emisión óptica Q4 – Tasman de Bruker, en la zona del metal base y del recubrimiento de las dos muestras.

3.3 PREPARACIÓN METALGRÁFICA DE LAS MUESTRAS Y CLASIFICACIÓN DE INCLUSIONES NO METÁLICAS

La preparación metalográfica de las piezas se realizó siguiendo la norma **ASTM E3-01** (14). El pulido mecánico se llevó a cabo con papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) marca 3M[®], con granulometría 180, 240, 320, 400 y 600, realizando un giro de 90° para cada cambio de lija y manteniendo un flujo de agua constante.

Para completar la preparación se pulieron las muestras en paño grueso y paño fino con pulimentos de alúmina (Al_2O_3) de 0,5 μm y 0,05 μm respectivamente, logrando así un acabado superficial homogéneo y de excelente calidad tipo espejo, apto para el análisis microscópico.

A continuación, se efectuó el análisis de inclusiones en la sección longitudinal del metal base del tornillo tipo sin fin, siguiendo las indicaciones presentadas en la norma **ASTM E45-05** (15). Posteriormente, se procedió a la identificación y clasificación de los diferentes tipos de inclusiones no metálicas presentes en este material en el microscopio Olympus SZ.

3.4 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Después de pulidas y analizadas las inclusiones en las muestras se procedió a la caracterización microestructural de las muestras en sus dos estados, esto se realizó mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB). Para el estudio de las secciones se usaron muestras de los tornillos tipo sin fin previamente pulidas, y se procedió al ataque químico con el reactivo Nital al 2% compuesto por 2 ml de ácido nítrico y 110 ml de alcohol etílico durante aproximadamente 30 s, con el fin de revelar las distintas fases formadas.

La primera inspección de las muestras se realizó con la ayuda del microscopio óptico Olympus GX71. Después se hizo un análisis morfológico con ayuda del microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Quanta FEG 650 de FEI. Este equipo posee un sistema de microanálisis por espectroscopía de energía dispersiva (EED), que permitió la evaluación cualitativa de los elementos químicos en un punto específico de las muestras.

3.5 MEDIDAS DE MICRODUREZA

El ensayo de microdureza Vickers fue realizado siguiendo la norma **ASTM E384-11** (16), en dos puntos de una muestra del tornillo tipo sin fin nuevo. Se usó un penetrador con forma de pirámide construido en diamante, que realiza una marca sobre el material que es observada mediante un microscopio que permite tomar las medidas de las diagonales. Además, con la ayuda de un software adaptado al equipo de microdureza se calculó la dureza en escala Vickers. El equipo utilizado para la realización de este ensayo fue el micro durómetro Vickers NEXUS 400 de Innovatest. La distancia de separación entre las indentaciones realizadas fue de 0,400 mm y la cantidad de indentaciones fue de doce para realizar un análisis completo del tornillo tipo sin fin nuevo. Se realizaron tres perfiles para cada uno de los puntos escogidos.

3.6 MEDIDAS DE DUREZA

Para obtener medidas de dureza superficial en escala Rockwell, se utilizó un durómetro marca Wilson que debe ser calibrado previo a la toma de medidas de dureza, usando bloques de dureza ya establecidos. Este equipo presiona la muestra, que debe ser plana, contra el indentador cónico de diamante con una carga previa de 150 kg en caso del recubrimiento. Para el material base la carga previa fue de 100 kg y el indentador de esfera de 1/16 pulg de diámetro, debido a que es un material con menor dureza.

Seguidamente, se aplicó la carga principal y se mantuvo durante un tiempo, y posteriormente, se retiró la carga principal y se leyó en la parte superior del equipo la dureza en escala Rockwell, correspondiente al tipo de indentador. Se tomaron tres medidas y se promedió el resultado.

3.7 MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD

Posteriormente, se llevó a cabo la medida de conductividad de la muestra de aceite de palmiste donde se utilizó el conductímetro marca OrionStar A212 y la celda 013005MD. Se realizaron tres tomas para medir conductividad a 25 y 90° C respectivamente. Para ello se tomaron 300 ml de aceite de palmiste, y se llevaron a la temperatura correspondiente con la ayuda de la plancha de calentamiento IKA C-MAG y, simultáneamente, se hizo un seguimiento de la temperatura con un termómetro de laboratorio. Se efectuaron las medidas y se calculó el promedio de las mismas a las concernientes temperaturas.

3.8 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE PALMISTE POR ESPECTROFOTOMETRÍA INFRARROJA

Se tomaron muestras de 100 ml del aceite de palmiste virgen y 100 ml después de 120, 240 y 360 h de inmersión. Cada muestra fue sometida a análisis de composición mediante espectrofotometría infrarroja. Para ello se introdujo cada muestra en una celda de KBr y se llevó al equipo, allí se establecieron las condiciones necesarias y los respectivos resultados fueron enviados a un ordenador y procesados por el software Win-Bomen Easy. El análisis se realizó en un espectrofotómetro infrarrojo ETIR-8400S marca Shimadzu.

3.9 ENSAYOS DE INMERSIÓN EN ACEITE DE PALMISTE

Los ensayos de inmersión se realizaron siguiendo la norma **ASTM G1**. Estos ensayos de inmersión se realizaron usando diferentes condiciones. El primero a 90° C por 120 h, que son las condiciones de servicio, el segundo ensayo se realizó aumentando el tiempo de inmersión por 240 y 360 h. Y el último se llevó a

cabo a temperatura ambiente por 360 h, permitiendo comparar el efecto de la temperatura en la velocidad de corrosión.

Se seleccionaron doce muestras pulidas del tornillo tipo sin fin en su estado nuevo cuya área de exposición fue de 1 cm². Las muestras fueron sumergidas en jabón alcalino durante 10 min y luego se realizó un lavado usando cepillos de cerdas plásticas. Se finalizó el procedimiento de limpieza con un baño de agua destilada y secado en aire caliente. Las muestras se colocaron en el desecador durante 3 h y, posteriormente, se extrajeron para tomar los pesos en la balanza Aisnwoth 24N antes de ser inmersas en el aceite.

Además, se midieron 300 ml de aceite de palmiste en cuatro vasos de precipitado, tres de los cuales fueron ubicados en planchas de calentamiento IKA C-MAG, hasta lograr la temperatura mencionada e inmediatamente fueron sumergidas nueve muestras del tornillo tipo sin fin nuevo. En el tercer vaso de precipitado se introdujeron tres muestras a temperatura ambiente. Después del tiempo cumplido para cada ensayo se retiraron de a tres muestras, y se repitió el procedimiento de limpieza mencionado inicialmente, se ubicaron en el desecador y, posteriormente, se tomaron los pesos de cada muestra en la balanza de precisión. De esta manera se encontró la diferencia de peso, y se calculó la velocidad de corrosión para las muestras en mm/año.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual es una de las formas más asequibles y rápidas para tener una noción inicial de las piezas que se estudian en este proyecto. A continuación se describe detalladamente el estado en que fueron entregadas las piezas y su posible proceso de fabricación.

El tornillo tipo sin fin nuevo posee las siguientes medidas aproximadamente: 9 cm de diámetro interno, 17,5 cm de diámetro externo y 8,5 cm de largo. Está fabricado en acero y recubierto con una capa dura que posee un espesor entre 2 y 3 mm aproximadamente.

Esta pieza es sólo una de varias ubicadas en la prensa extractora de aceite de palmiste, diferenciándose unas de otras por el tamaño del paso con que son construidas, que permite determinar si el tornillo es usado en transporte o por el contrario es el elemento encargado de ejercer presión a la almendra contenida en el fruto de la palma de aceite.

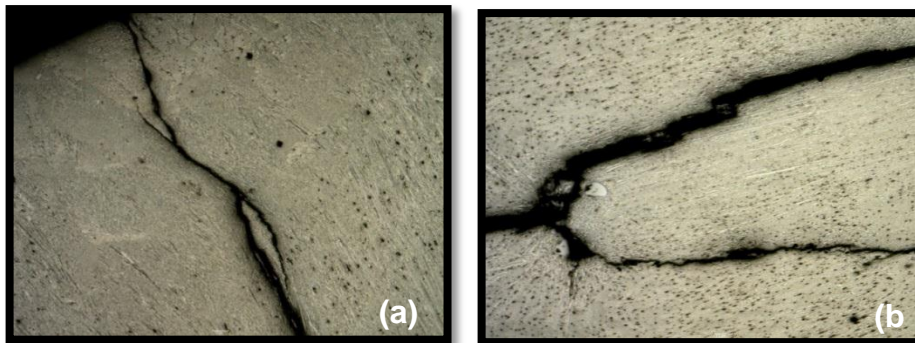
Se hizo recepción de dos tipos de muestras, un tornillo tipo sin fin nuevo y un segundo tornillo tipo sin fin que ha estado previamente en servicio. A continuación se presentan los resultados de la inspección realizada para cada uno de ellos.

4.1.1 Tornillo tipo sin fin nuevo: El tornillo tipo sin fin en su estado nuevo cuenta con una superficie cubierta por una pintura de color vino tinto (Figura 4(a)). Esta se aplica a la pieza al terminar su fabricación con el fin de proteger la superficie durante su transporte y posterior almacenamiento (17).

Después de retirada la capa de pintura que cubre la pieza, se puede observar que el recubrimiento del tornillo tipo sin fin muestra una superficie bastante irregular, con presencia de poros y una gran cantidad de grietas de las cuales algunas son largas y profundas, y posiblemente inician durante el proceso de fabricación (Figura 5) (18, 19). Estas grietas pueden estar contribuyendo al deterioro prematuro del tornillo durante el servicio debido a que las grietas sometidas a esfuerzos pueden convertirse en concentradores de los mismos y conllevar a una falla prematura de la pieza (18).

El recubrimiento es aplicado sobre el metal base, probablemente mediante proyección térmica (19), debido a las características como el espesor, la buena adherencia entre el metal base y el recubrimiento, la solidez de la capa y además los defectos nombrados anteriormente que se presentan usualmente en este tipo de procesos (20). El proceso de proyección térmica generalmente se lleva a cabo con la ayuda de una pistola especial, en la que se produce calor por la combustión de un gas, originando así la fuente térmica destinada a fundir el material que se desea depositar. Posteriormente, el material fundido es atomizado y proyectado hacia el metal base por un chorro de aire comprimido, donde finalmente se lleva a cabo el enfriamiento (21).

Figura 5. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo (a) 50X. (b) 100X. Sin ataque.



La velocidad a la que se lleva a cabo este enfriamiento es la causa de la aparición de grietas en el recubrimiento, debido a que los coeficientes de dilatación térmica entre el recubrimiento y el metal base son muy diferentes. Por tanto este enfriamiento debe ser muy lento e inspeccionado constantemente con el fin de evitar la propagación de grietas en el recubrimiento (22).

4.1.2 Tornillo tipo sin fin deteriorado (120 h de servicio): En el tornillo tipo sin fin deteriorado el metal base se fabrica probablemente por fundición, y posee medidas similares a encontradas en el metal base del tornillo tipo sin fin nuevo, por lo que se podría inferir que no varía su espesor.

El recubrimiento del tornillo tipo sin fin presenta abolladuras y desprendimientos de fragmentos, existiendo gran cantidad de zonas donde el metal base ha quedado visiblemente expuesto a la atmósfera. La sección más afectada durante el servicio es la hélice del tornillo tipo sin fin, debido a que se encuentra rodeada de profundas ramificaciones de grietas, gran cantidad de poros y además rayas y porosidades, como se muestra en la Figura 4(b).

4.2 ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN POR ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA

La composición química del metal base y del recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo y deteriorado se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Composición química del tornillo tipo sin fin nuevo (% peso).

Elemento	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al
Base	0,241	0,124	0,470	0,008	0,150	0,005	0,010	0,005	0,005	0,005
Recubrimiento	5,408	4,528	1,257	0,332	0,452	21,078	0,509	6,665	1,464	1,517

Tabla 2. Composición química del tornillo tipo sin fin deteriorado (% peso).

Elemento	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al
Base	0,890	0,150	0,639	0,029	0,155	0,009	0,010	0,005	0,014	0,011
Recubrimiento	5,614	2,988	1,306	0,235	0,350	19,279	0,291	3,330	0,015	0,981

De acuerdo a los valores obtenidos para la pieza nueva, el metal base corresponde a un acero de bajo carbono, utilizado en estas piezas por su bajo costo (23). La composición química se ajusta a la del acero AISI/SAE 1023 (24), compuesto por una matriz ferrítica con granos de perlita fina, y su dureza se encuentra alrededor de 111-121 Brinell (120 – 129 Vickers).

El recubrimiento presente en el tornillo tipo sin fin nuevo tiene un alto contenido de cromo que proporciona alta dureza por ser fuerte formador de carburos. Por lo tanto, la presencia de carburos de cromo será notoria en su microestructura debido a que además, el alto contenido de carbono en el recubrimiento favorece la formación de estos (25). Así mismo, la presencia de cromo y níquel le otorgan al recubrimiento del tornillo tipo sin fin alta resistencia a la corrosión y tenacidad respetivamente (26), y el manganeso aumenta considerablemente la resistencia al desgaste.

Esos recubrimientos duros se aplican a los tornillos tipo sin fin con el propósito de mejorar considerablemente las propiedades superficiales, por ello contienen elevadas cantidades de elementos aleantes que le confieren excelentes propiedades. Es importante resaltar que el contenido de azufre se encuentra fuera del rango permitido para la fabricación de acero donde el máximo de este elemento debe ser 0,050% (p/p). Mayores cantidades de este disminuyen la soldabilidad del acero y propician agrietamiento intergranular en caliente del recubrimiento durante el proceso de solidificación (27).

Al observar la composición del metal base y del recubrimiento del tornillo tipo sin fin deteriorado, se hace evidente que la composición química es diferente comparada con la observada en el tornillo tipo sin fin nuevo. Por esta razón, se deduce que se trata de dos piezas totalmente diferentes y por ende se tomara un nuevo rumbo en la caracterización de las piezas, estudiando cada una de manera independiente.

En cuanto al metal base, el contenido de carbono para el tornillo tipo sin fin deteriorado es de 0,890% (p/p), por lo que se infiere que no se trata del mismo acero. La composición química obtenida para el metal base se ajusta a la de un acero AISI/SAE 1090 (24), que responde a un acero de alto carbono, por lo que se espera tener en su microestructura una red de cementita entre granos, que rodea un gran cantidad de colonias de perlita. La dureza que correspondería a este acero esta alrededor de 197 – 248 Brinell (206 – 255 Vickers).

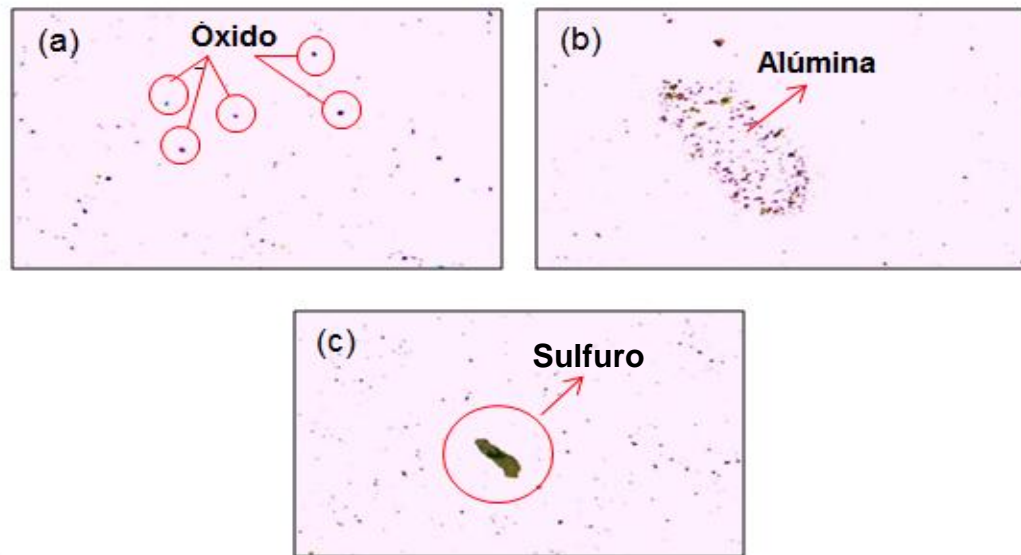
La composición química del recubrimiento del tornillo tipo sin fin deteriorado no es semejante a la obtenida para el tornillo tipo sin fin nuevo, ya que aleantes como el silicio, el molibdeno y níquel han cambiado drásticamente, pasando de 4,528%, 0,509% y 6,665% a 2,988%, 0,291% y 3,330% (p/p), respectivamente.

4.3 CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA

4.3.1 Tornillo tipo sin fin nuevo: Para las muestras del tornillo tipo sin fin nuevo se observa que las inclusiones que presenta en su gran mayoría son óxidos, como se muestra en la Figura 6(a), resultado del proceso de fabricación del metal base durante su fundición, la solidificación o al moldear el material. Además, también se puede observar en la Figura 6(b) la presencia de una minoría de inclusiones de

alúmina y en la Figura 6(c) se observa la existencia de sulfuros en pequeñas cantidades.

Figura 6. Micrografía óptica del tornillo tipo sin fin nuevo en el metal base a 100X. (a) Óxidos. (b) Alúmina. (c) Sulfuro.



Después de efectuado el ataque químico a la muestra, se comprueba la microestructura del metal base, verificándose que efectivamente se trata de un acero de bajo carbono (Figura 7). La microestructura de este acero hipoeutectoide está compuesta por una matriz ferrítica y el inicio de la nucleación de perlita laminar fina, distribuida en pequeñas islas a través de toda la microestructura. Por la forma de los granos y la ausencia de una orientación preferente, se puede deducir que existe un tratamiento térmico de normalizado y alivio de tensiones sobre el metal base del tornillo tipo sin fin (28).

la Figura 8 se presentan las micrográficas de la interface metal base-recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo. Se observa que en la interface existe una tercera zona de color más claro (Figura 8(a)), donde son visibles las ramificaciones dendríticas, como se observa en la Figura 8 (b), y cuya dirección de crecimiento es paralela a la dirección del máximo gradiente de temperatura. Cerca de esta zona,

se encuentra que el metal base se ha enriquecido de carbono, debido a que existe un aumento de la perlita adyacente a este lugar. En la Figura 8(c) se observa la distorsión y crecimiento de los granos característicos del material base.

Figura 7. Micrografía óptica del metal base del tornillo tipo sin fin nuevo. (a) 100X (b) 500X. Ataque con Nital al 2%.

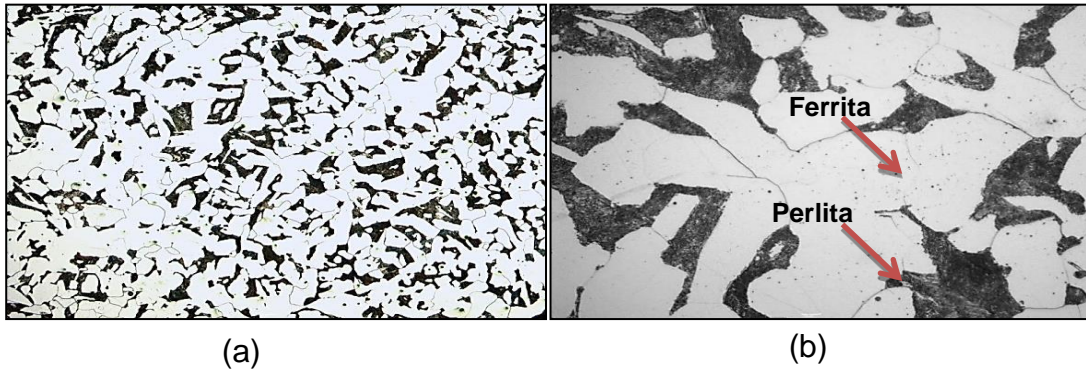
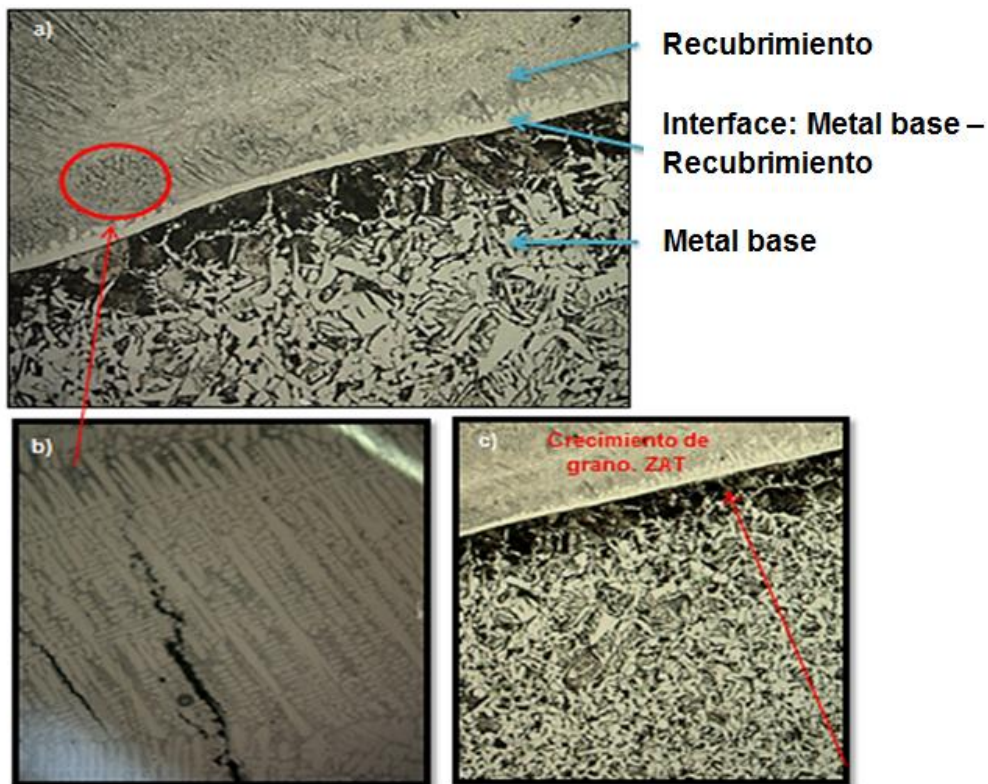
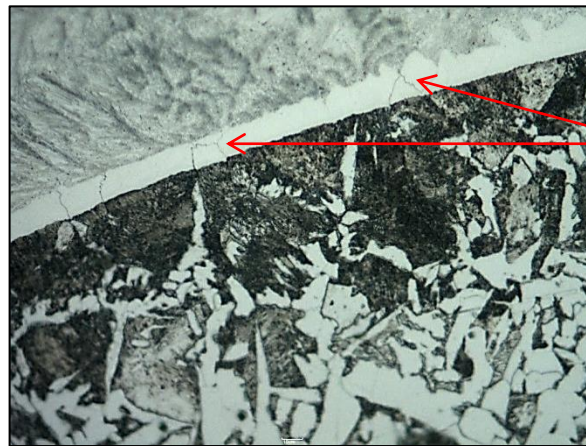


Figura 8. Micrografía óptica de la interface metal base-recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo. (a) 200X (b) 50X (c) 100X. Ataque con Nital al 2%.



Existe buena adherencia entre el metal base y las capas del recubrimiento presentes ya que no hay discontinuidades a lo largo de la zona inspeccionada. Pero se observa la presencia de microgrietas que podrían ser la causa del debilitamiento de la interface y, por tanto, del rompimiento y desprendimiento de la unión, como se observa en la Figura 9.

Figura 9. Micrografía óptica de la interface metal base – recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 500X. Ataque con Nital al 2%.



Microgrietas
en la interface

La zona del recubrimiento que se encuentra retirada de la interface (Figura 10) es la sección del recubrimiento que se caracteriza por poseer una morfología acicular, con importante presencia de porosidades y zonas ricas en cromo y hierro, como se demuestra a continuación mediante MEB y EED.

El agrietamiento en caliente presente en el recubrimiento del tornillo sin fin nuevo, debido posiblemente a la presencia de altos contenidos de azufre se puede apreciar en la Figura 11.

Figura 10. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 100X. Ataque con Nital al 2%.

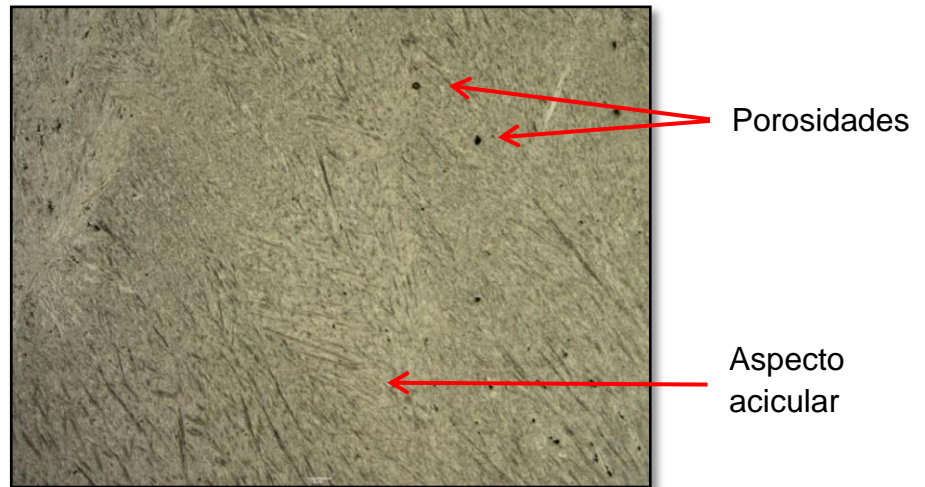
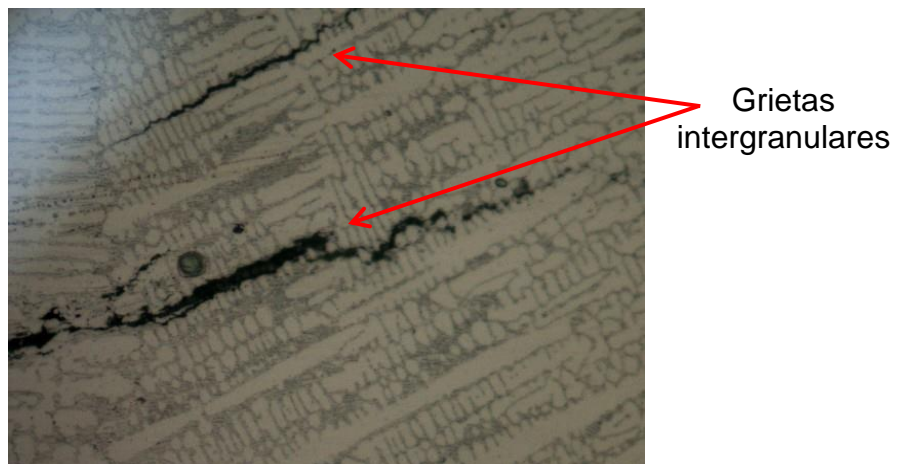


Figura 11. Micrografía óptica del recubrimiento del tornillo sin fin nuevo a 500X, ataque con Nital al 2%.

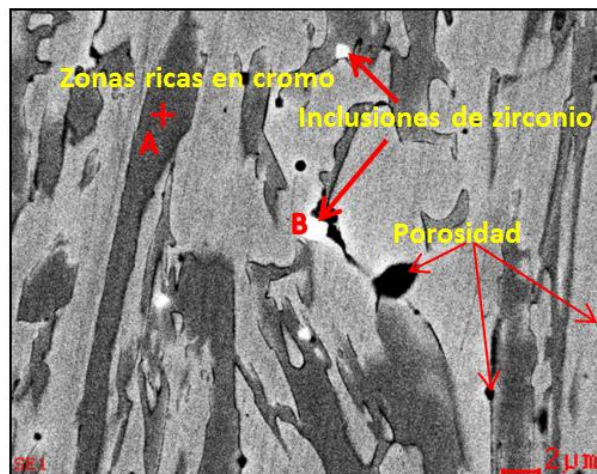


La influencia que ejerce el azufre se debe a su combinación con otros metales para formar sulfuros, usualmente constituyen eutécticos de bajo punto de fusión que se localizan en el borde del grano del material, creando zonas de debilidad en éste y permitiendo la aparición de grietas intergranulares durante la solidificación (27).

En la Figura 12 obtenida mediante MEB, se observa la presencia de zonas grises oscuras, en estas zonas el contenido de cromo y hierro es elevado (Figura 13), lo que nos permite inferir que se podría tratar de carburos de cromo (31), que se forman por las elevadas temperaturas y la alta cantidad de cromo contenida en el electrodo usado para la obtención del recubrimiento. La posible formación de carburos de cromo distribuidos en diferentes tamaños en una matriz acicular, le confiere al recubrimiento alta dureza y resistencia al desgaste.

Además, en la Figura 12 se observan regiones blancas, que se identifican mediante EED (Figura 14), se trata de zonas ricas en hierro y zirconio que son visibles en la microestructura del recubrimiento como inclusiones, derivadas probablemente del electrodo usado para el depósito del recubrimiento.

Figura 12. Micrografía electrónica del recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo.



La micrografía electrónica del tornillo sin fin nuevo (Figura 12), registra la presencia de una significativa cantidad de porosidades repartidas en la zona del recubrimiento, apreciadas en diferentes tamaños y muy cerca de las zonas ricas en cromo.

Figura 13. Análisis puntual con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona A indicada en la Figura 12.

Element	Wt%	At%
C	5,89	21,95
Cr	44,12	37,98
Fe	49,99	40,07
Matrix	Correction	ZAF

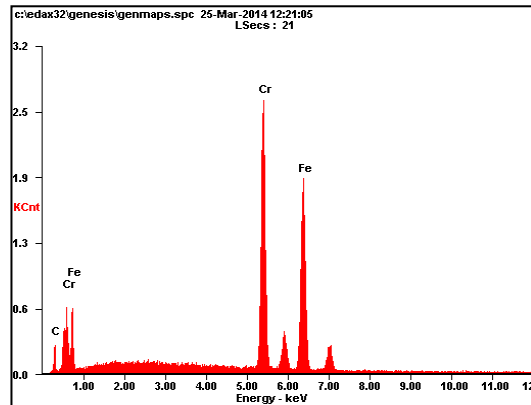
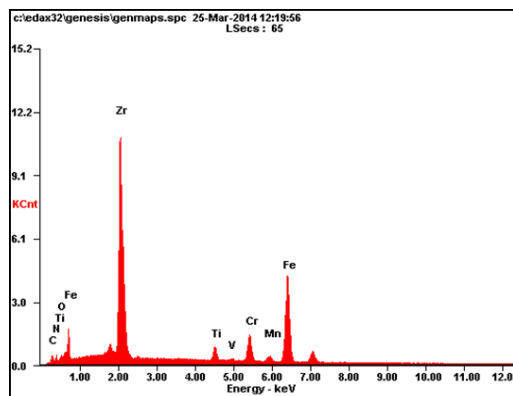


Figura 14. Análisis puntual con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona B indicada en la Figura 12.

Element	Wt%	At%
C	4,55	18,78
N	2,99	10,56
O	1,8	5,59
Zr*	47,1	25,57
Ti	2,64	2,73
V	0,05	0,05
Cr	7,32	6,97
Mn	0,72	0,65
Fe	32,83	29,11
Matrix	Correction	ZAF



4.3.2 Tornillo tipo sin fin deteriorado: Las inclusiones encontradas en el metal base del tornillo tipo sin fin deteriorado son óxidos, como se observa en la Figura 15, estos al igual que en la muestra del tornillo tipo sin fin nuevo, provienen de su proceso de fabricación.

La Figura 16 muestra la microestructura del metal base para el tornillo tipo sin fin deteriorado, según su composición se trata de un acero AISI/SAE 1090 (24) de alto carbono (Tabla 2). En su microestructura se aprecian principalmente granos

de perlita, rodeados por cementita proeutectoide que aparece como el constituyente blanco.

Figura 15. Micrografía óptica del metal base del tornillo sin fin deteriorado a 100X. Sin ataque.

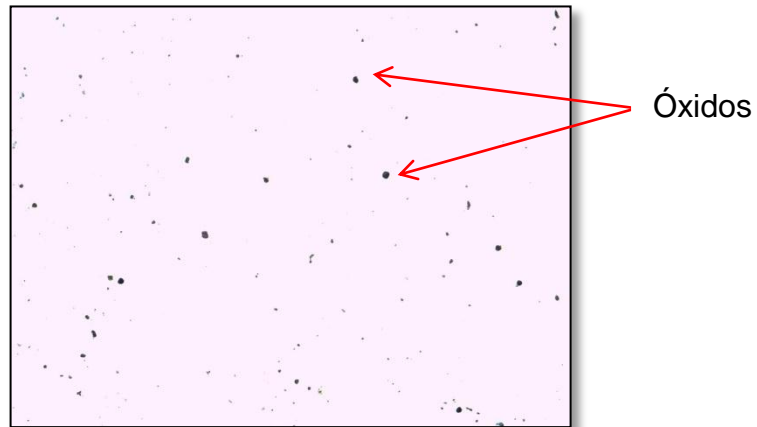
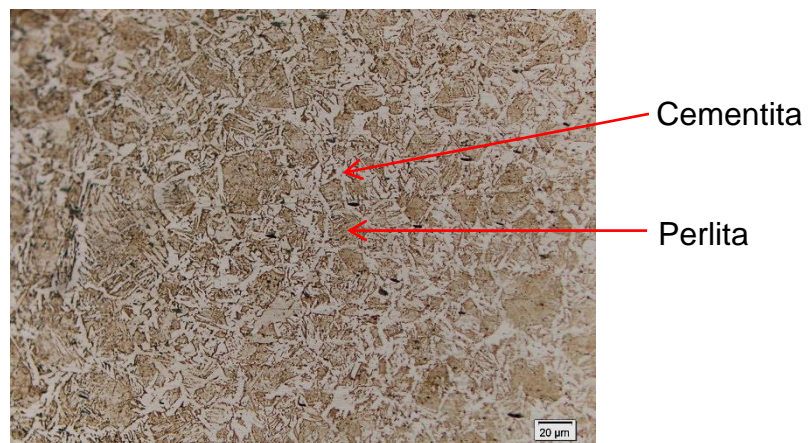


Figura 16. Micrografía óptica del metal base del tornillo tipo sin fin deteriorado a 100X. Ataque con Nital al 2%.



La presencia de numerosa porosidad y grietas muy profundas limitan el análisis por microscopía óptica del recubrimiento, y por tanto su microestructura no se

presenta con claridad. Únicamente se puede observar una microestructura heterogénea compuesta principalmente acículas finas y dispersas.

Los resultados obtenidos mediante MEB muestran la interface metal base-recubrimiento (Figura 17), allí es apreciable la formación de dendritas columnares en el recubrimiento. Según el análisis por EED la zona A se encuentra altamente enriquecida en hierro y cromo y posee un cierto contenido de silicio (Figura 18), estos elementos son característicos de la formación y estabilización de carburos de cromo (29).

Figura 17. Micrografía electrónica de la interface metal base-recubrimiento del tornillo tipo sin fin deteriorado.

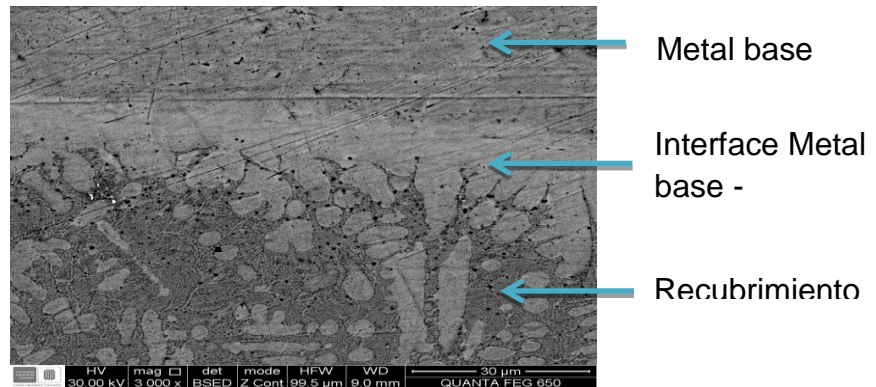
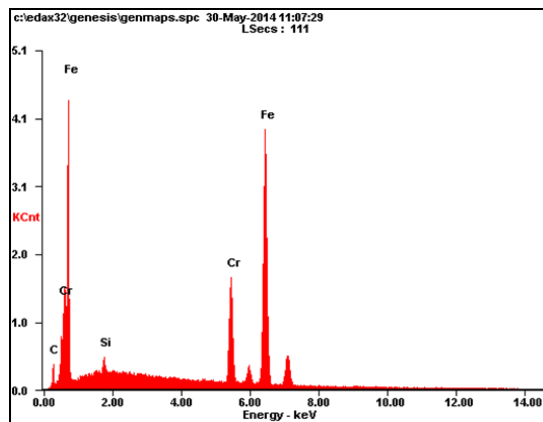


Figura 18. Análisis con EED del recubrimiento del tornillo tipo sin fin en la zona A. indicada en la Figura 17.

Element	Wt%	At%
C	02.49	10.42
Si	00.78	01.40
Cr	17.33	16.74
Fe	79.40	71.43
Matrix	Correction	ZAF



4.4 MEDICIÓN DE LA DUREZA DEL TORNILLO TIPO SIN FIN

La Tabla 3 muestra los resultados de dureza en escala Rockwell para las muestras del tornillo tipo sin fin nuevo y deteriorado, junto con su equivalencia en microdureza Vickers.

Tabla 3. Medidas de dureza en escala Rockwell para el metal base y el recubrimiento del tornillo tipo sin fin nuevo y deteriorado.

Medidas de Dureza	Sin Fin Nuevo		Sin Fin Deteriorado	
Recubrimiento	62 RC	765 Vickers	60 RC	717 Vickers
Base	39 RA	107 Vickers	44 RC	434 Vickers

Se observa que para el tornillo tipo sin fin nuevo la dureza del recubrimiento es elevada, debido al cromo presente como aleante en su composición. En el caso del metal base la dureza obtenida es baja, alrededor de 39 RA (107 Vickers), ya que se trata de un acero de bajo carbono como se observó en los resultados anteriores.

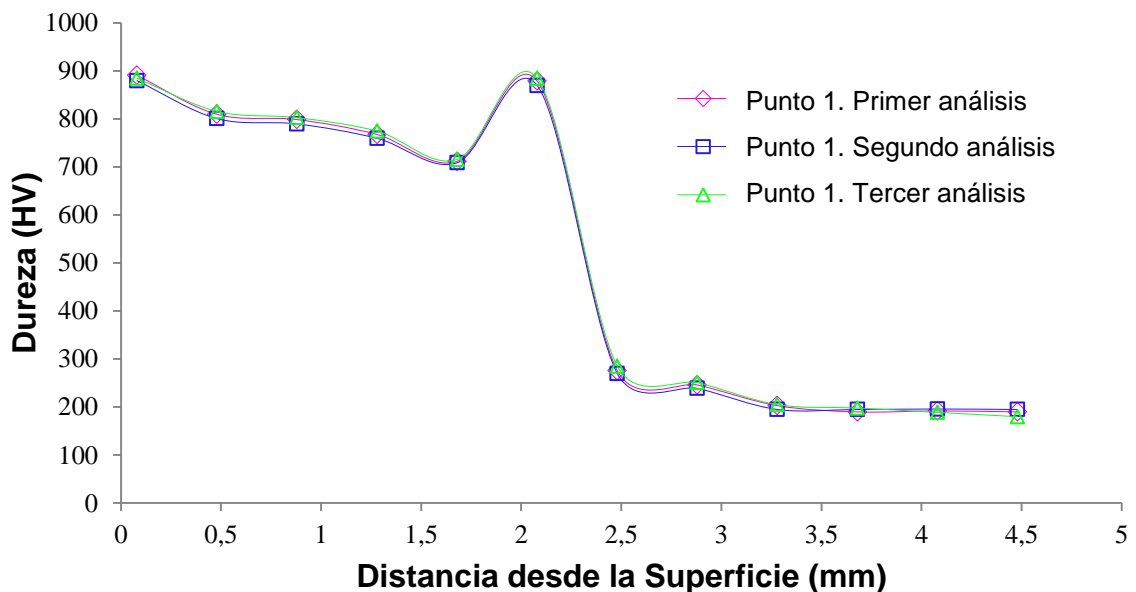
Para la muestra del tornillo tipo sin fin deteriorado el metal base corresponde a un acero de alto carbono que posee una dureza más elevada que la obtenida para el metal base del tornillo tipo sin fin nuevo (44 RC) por la presencia de cementita en su microestructura.

Se puede observar que a pesar de que la composición de los recubrimientos es diferente, la dureza obtenida para el tornillo tipo sin fin nuevo (62 RC) y deteriorado (60 RC) es similar, debido a que poseen una microestructura semejante.

En la Figura 19 se muestran los perfiles de microdureza en escala Vickers encontrados para la sección perpendicular al recubrimiento del tornillo tipo sin fin

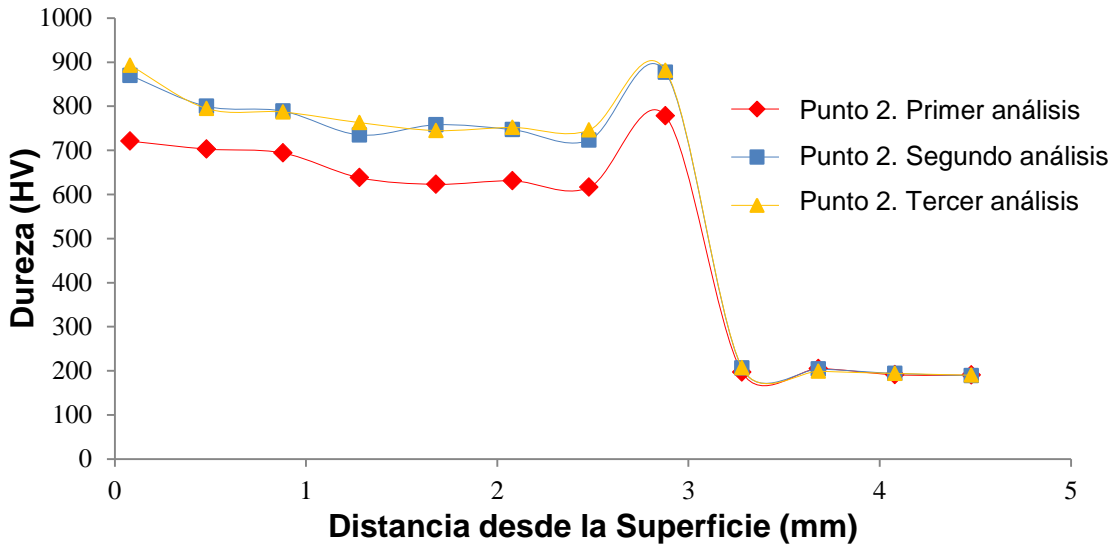
nuevo. En el primer punto analizado se observa que la mayor dureza se sitúa en torno a 890 Vickers, justo en el extremo del recubrimiento. Sin embargo, los valores no se mantienen constantes a lo largo del recubrimiento sino que la tendencia es a disminuir progresivamente hasta alcanzar un pico ubicado en la interface metal base-recubrimiento. Finalmente la microdureza decae al valor característico del metal base y se mantiene constante.

Figura 19. Perfil de microdureza en escala Vickers para la sección transversal de una muestra del tornillo tipo sin fin nuevo, en el punto 1.



En la Figura 20, se presentan los perfiles de microdureza realizados a la misma muestra en un segundo punto. Allí podemos observar una tendencia similar a la mostrada en la Figura 19 donde la máxima dureza se presenta en la superficie del recubrimiento. La dureza disminuye paulatinamente y luego se presenta un pico de aumento de la misma para posteriormente decaer hasta exhibir la dureza característica del material base.

Figura 20. Perfil de microdureza en escala Vickers para la sección transversal de una muestra del tornillo tipo sin fin nuevo, en el punto 2.



Los perfiles de microdureza Vickers obtenidos para el punto uno y dos son similares entre sí. Cabe resaltar que la presencia del pico de dureza en la interfase metal base-recubrimiento se debe principalmente al cambio microestructural que se produce en esta zona a causa de que el recubrimiento no posee un espesor constante a través de toda la muestra representativa del tornillo tipo sin fin nuevo. La interfase no se sitúa a una misma distancia desde la superficie puesto que la posición del pico de durezas en el punto uno se encuentra a 2 mm, mientras que en el punto dos se sitúa a 2,8 mm desde la superficie.

4.5 ENSAYOS DE INMERSIÓN EN EL ACEITE DE PALMISTE

El ensayo de conductividad hecho al aceite de palmiste, arrojó resultados de aproximadamente 0,01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para las temperaturas escogidas de 25 y 90 °C, lo

que permite inferir que el aceite no se comporta como un medio conductor de electricidad (30).

Se procede a realizar las pruebas de inmersión bajo diferentes condiciones en el aceite de palmiste, y los resultados se presentan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos obtenidos por inmersión del tornillo tipo sin fin nuevo, en aceite de palmiste a diferentes tiempos y temperaturas.

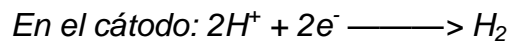
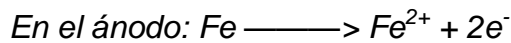
Temperatura [°C]	Tiempo [h]	Pérdida de peso [g]	Velocidad de Corrosión [mpy]
≈ 25	360	0,00470±0,00274	3,1
90	120	0,00833±0,00076	15,6
90	240	0,00897±0,00291	11,3
90	360	0,00554±0,00122	6,7

Se observó que a temperatura ambiente la velocidad de corrosión es aproximadamente la mitad de la que se obtiene cuando se expone el tornillo tipo sin fin nuevo a una temperatura de 90 °C. Además, si se mantiene una temperatura constante de 90 °C y se varía el tiempo de inmersión es notable que la velocidad de corrosión disminuye a medida que aumenta el tiempo.

Debido a la naturaleza sólida del aceite de palmiste a temperatura ambiente y en ausencia de movimiento del aceite, el deterioro de la muestra se restringe a la superficie expuesta al aceite de palmiste y a la atmósfera. Esto originó una velocidad de corrosión de 3,1 mpy, relativamente baja, comparada con la obtenida a 90 °C durante el mismo tiempo de exposición la cual fue de 6,7 mpy (31).

Existe don opciones, primero que se genere un fenómeno de corrosión que inicia debido a que el recubrimiento presenta gran cantidad de grietas, lo que permite el contacto directo del aceite de palmiste en estado líquido con el metal base a causa de la temperatura utilizada para el estudio.

Según estudios, los ácidos grasos presentes en el aceite de palmiste tales como el ácido láurico (45 - 55%), el ácido mirístico (14 – 18%) y el ácido cáprico (2,6 – 5%) contribuyen al fenómeno de la corrosión a causa de su naturaleza corrosiva (32) (33). Lo anterior se asocia con la velocidad de corrosión que se presenta en las muestras del tornillo tipo sin fin donde el metal base posiblemente está siendo atacado por los ácidos grasos presentes en el aceite de palmiste (34). Por consiguiente, se genera una corrosión de naturaleza anódica que se evidencia en un aumento de cero a 2⁺ en el estado de oxidación del hierro sólido conformando así la celda funcional:



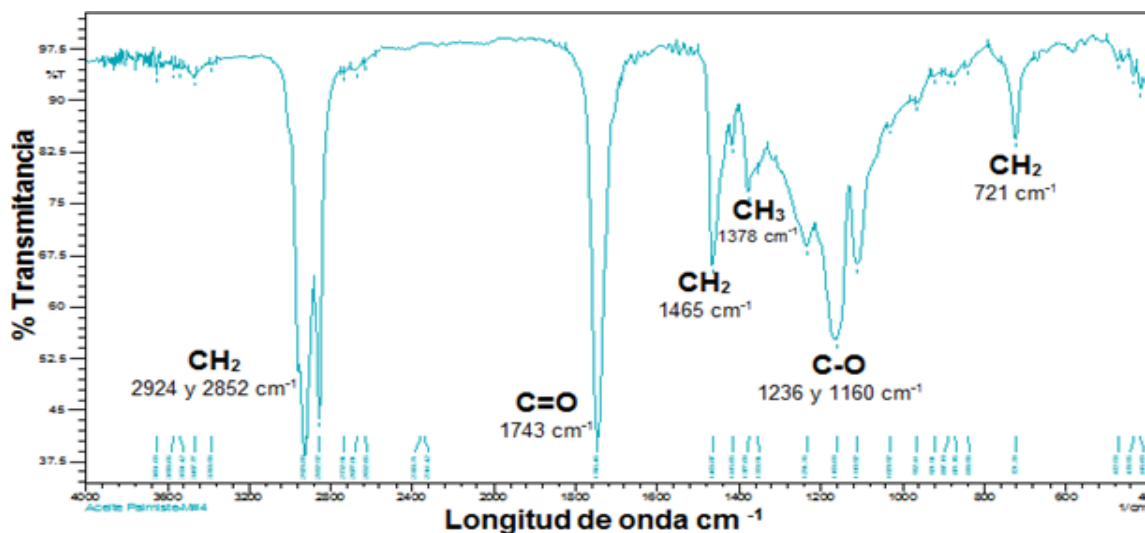
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se contempla la aparición de corrosión en las muestras del tornillo tipo sin fin nuevo, sin embargo la incertidumbre es alta y por ello como segunda opción se contempla la posibilidad de pérdida de pequeños fragmentos del recubrimiento durante el ensayo, como resultado del desprendimiento por la gran cantidad de defectos presentes en esta zona.

Debido al poco tiempo de exposición del tornillo sin fin en aceite de palmiste, no se puede afirmar que el deterioro por corrosión sea la principal causa del daño durante el servicio, debido a que durante su uso se presenta desprendimiento de fragmentos del recubrimiento por efectos mecánicos. Por ello, se debe estudiar la influencia del desgaste en estas piezas.

4.6 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE PALMISTE POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

Los espectros de infrarrojo obtenidos para las diferentes muestras de aceite de palmiste se muestran a continuación. En la Figura 21 se observa el espectro de la muestra inicial o virgen de aceite de palmiste que revela los grupos funcionales y modos de vibración. La primera banda comprendida entre 2924 y 2852 cm^{-1} , corresponde al estiramiento de los enlaces del grupo metileno ($-\text{CH}_2$). La banda a 1743 cm^{-1} pertenece al grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) propio de los ésteres, las bandas que se presentan a 1465 cm^{-1} y 1378 cm^{-1} indican las vibraciones de flexión de los grupos alifáticos CH_2 y CH_3 respectivamente y la otra banda a 1417 cm^{-1} vibraciones de enlaces CH de olefinas. La banda presente entre 1236 y 1160 cm^{-1} es característica de los estiramientos $\text{C}-\text{O}$, y finalmente la banda a 721 cm^{-1} se debe a la superposición de la vibración de balanceo de CH_2 y la vibración de la flexión fuera del plano de las olefinas. Este espectro muestra las características típicas de las bandas de absorción de triglicéridos comunes, y por tanto demuestra que el aceite de palmiste consiste en una mezcla de triglicéridos formados por ácidos grasos saturados e insaturados (35) (36).

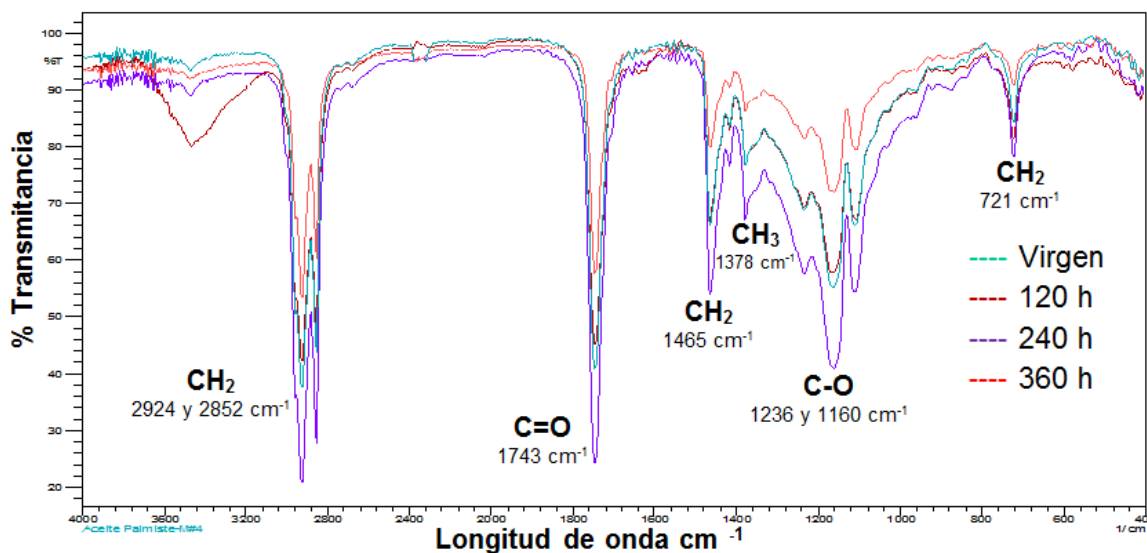
Figura 21. Espectro infrarrojo del aceite de palmiste virgen.



Adicionalmente, se realizaron análisis por espectrofotometría de infrarrojo a las muestras de palmiste obtenidas después de 120, 240 y 360 h de inmersión a 90° C, para comparar por medio de sus espectros si existió alguna variación en las longitudes de onda de las bandas representativas, y así determinar si durante ese tiempo existió algún cambio significativo en la estructura del aceite (Figura 22).

Inicialmente existe una interferencia en la muestra de 120 h, que no resulta significativa debido a la posible presencia de impurezas durante el ensayo. En cuanto a los resultados de este análisis se evidenció que las tres muestras de aceite de palmiste, presentaron los mismos picos de absorción que presentó el aceite de palmiste virgen, evidenciando que en su composición final no tiene relevancia alguna el tiempo que transcurrió este aceite a 90 °C. La diferencia de las profundidades de los picos, se debe principalmente al tipo de intensidad de absorción, perteneciente a las vibraciones percibidas, y además no se observa la presencia de agua en las diferentes muestras.

Figura 22. Espectros infrarrojos comparativos de las muestras de aceite de palmiste virgen a 120, 240 y 360 h de inmersión a 90 °C.



4.7 SOLUCIONES VIABLES PARA MITIGAR EL DETERIORO DE LOS TORNILLOS TIPO SIN FIN DE LA PRENSA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMISTE

Según los resultados obtenidos en el transcurso de este proyecto se pudo observar que los tres principales inconvenientes que presentan los tornillos tipo sin fin son: primero, la gran cantidad de grietas formadas durante el proceso de fabricación. Segundo, el poco contenido de elementos tales como Si, Ni, B, Mn, Mo, V, entre otros, los cuales permiten la estabilización de compuestos de alta dureza. Y tercero, la probable presencia de corrosión en el metal base por el contacto con los ácidos grasos presentes en el aceite de palmiste. Por consiguiente, estos son los aspectos que se han tenido en cuenta al proponer las soluciones para mitigar el deterioro de los tornillos tipo sin fin.

En primera instancia, si se observa la composición del recubrimiento y del metal base del tornillo tipo sin fin, es necesario eliminar las grandes cantidades de azufre con el propósito de aumentar la vida útil de estos, ya que el azufre es perjudicial porque forma compuestos eutécticos de bajo punto de fusión los cuales contribuyen a la nucleación de grietas intergranulares en el recubrimiento y promueven su deterioro prematuro (37). Consecuentemente, la primera solución es la adquisición de materias primas de mayor calidad que contengan azufre en menores cantidades como máximo 0,050% (p/p) (38), lo que conllevaría a un recubrimiento homogéneo que posee una gran resistencia a la corrosión y al desgaste.

La segunda solución es aplicar un recubrimiento compuesto por una aleación de NiCrBSi sobre un acero ordinario puesto que se ha demostrado que es menos propensa a la formación de grietas y se puede aplicar mediante proyección térmica (22). Así mismo, estas aleaciones tienen contenidos de cromo y boruros que forman compuestos de alta dureza como Ni_3B , Cr_2B , Cr_3B_2 , entre otros, que

aumentan la resistencia al desgaste. Se pueden obtener recubrimientos con menor cantidad de fisuras, si se emplean las condiciones adecuadas para su depósito (40).

La tercera solución, con el fin prolongar la vida útil de los tornillos tipo sin fin es realizar un proceso de nitruración iónica, seleccionando un acero apto para el procedimiento como lo es el tipo 31CrMoV9 o 34CrAlNi7. En ellos pueden obtenerse durezas entre 64–70 y 68–75 en escala Rockwell C, respectivamente. Esta elevada dureza en ausencia de capas del recubrimientos y grietas, contribuye a la resistencia al desgaste, y una excelente resistencia a la corrosión debido a la homogeneidad de la capa. Las características del tornillo tipo sin fin como su geometría sencilla y sus dimensiones hacen que este proceso se pueda realizar de manera adecuada y obtener capas de 0,5 mm, y al tratarse de un proceso de difusión, se eliminan las grietas e imperfecciones presentes actualmente sobre la superficie los tornillos tipo sin fin (41).

Por último, una posible solución podría ser el cambio de diseño del tornillo tipo sin fin, utilizando un solo material para su fabricación que mitigue su deterioro. Las aleaciones austeníticas del sistema Fe-Mn-Al (11.0% Al, 34.30% Mn, 1.25% C, 6.69% Cr, 0.538% Si, 1.096% Mo, 45.12% Fe, y 0.026% Ni) las cuales pueden ser obtenidas en un horno de inducción a partir de materias primas de alta pureza, cuentan con gran resistencia a la corrosión, la erosión en medio húmedo y a la corrosión-erosión junto con una alta dureza de alrededor de 963 Vickers (42)(43).

5. CONCLUSIONES

- La caracterización metalográfica y de composición química demostró que el metal base del tornillo tipo sin fin nuevo y deteriorado no es el mismo, se trata de dos aceros ordinarios diferentes con 0,241% y 0,890% (p/p) de carbono respectivamente (Tabla 1 y 2), por lo cual el material base empleado en la fabricación del tornillo tipo sin fin probablemente no posee un proceso de calidad que garantice la uniformidad en la materias primas. Sin embargo, el recubrimiento presenta características semejantes en los dos aceros utilizados, como poca homogeneidad y gran presencia de grietas y poros.
- Se determinó que el recubrimiento depositado en el tornillo tipo sin fin contiene un alto porcentaje de cromo que le confiere al tornillo sin fin buena dureza superficial, además contiene níquel y manganeso que le otorgan tenacidad y resistencia al desgaste respectivamente.
- Se observó que el metal base y el recubrimiento del tornillo tipo sin fin, poseen altos contenidos de azufre que exceden el máximo permitido (0,050% (p/p)). Los altos contenidos de azufre, promueven el agrietamiento intergranular en caliente del recubrimiento y, además, disminuye la soldabilidad. La presencia de grietas largas y profundas formadas durante el proceso de fabricación a causa del agrietamiento en caliente, son la principal causa del deterioro prematuro de los tornillos tipo sin fin.
- Mediante ensayos de inmersión del tornillo tipo sin fin nuevo en aceite de palmiste a 90 °C por 120 h, se determinó una velocidad de corrosión de 15,6 mpy. Esta velocidad de corrosión se podría presentar principalmente debido a la gran cantidad de grietas presentes en el recubrimiento que permiten el contacto del metal base con el aceite de palmiste, compuesto principalmente

por ácidos grasos encargados de atacar y deteriorar el metal base. Pero probablemente puede deberse a errores en el procedimiento durante la realización de los ensayos debido a los altos valores de incertidumbre.

- Los resultados del análisis por espectrofotometría infrarroja para las muestras del aceite de palmiste expuestas a ensayos de inmersión a 90 °C durante 120, 240 y 360 h presentaron los mismos picos de absorción que presentó el aceite virgen, lo que permite evidenciar que en su composición final no tiene relevancia la exposición a esta temperatura durante dicho tiempo, además no se evidenció la presencia de agua en las muestras.
- Se determinó que existen diferentes soluciones para disminuir las cantidades de azufre, evitar la presencia de grietas y mitigar el daño por corrosión en los tornillos tipo sin fin:
 - Utilizar materias primas con altos estándares de calidad que garanticen bajos contenidos de azufre para la fabricación de los tornillos tipo sin fin.
 - Cambiar el recubrimiento por una aleación de NiCrBSi.
 - Utilizar un proceso de nitruración iónica para evitar el uso de recubrimientos.
 - Fabricar por completo los tornillos tipo sin fin en una aleación austenítica del sistema Fe-Mn-Al.

6. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo la caracterización de un tornillo sin fin nuevo y posteriormente evaluarlo después de exponerlo a las condiciones de servicio en la prensa extractora de aceite de palmiste, con el fin lograr contrastar la diferencia en peso, composición y dureza de la pieza asegurándose de que sea la misma.
- Evaluar otros mecanismos de daño como el desgaste en los tornillos sin fin para conocer su comportamiento frente ellos. Además, realizar ensayos de tribo-corrosión con el objetivo de evaluar los efectos combinados de desgaste y corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

A. Rohman, Y.B. Che Mana. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil. Vol. 43, s.l. : Elsiver, 2009.

AGUDELO, Giraldo y PABLO, Esaú. Estudio del desgaste de recubrimientos duros en una herramienta de arado tipo cincel. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2013.

ALFARO C, Marcos y ORTIZ A., Elvin. Proceso de producción de aceite de palma. [En línea] Julio de 2006. [Citado el: 23 de Junio de 2014.] disponible en: (<http://www.galeon.com/subproductospalma/proceso1.pdf>).

APERADOR, William, BAUTISTA, Jorge H. y BETANCUR, Juan D. Resistencia al desgaste erosivo-corrosivo de aceros austeníticos FERMANAL. Vol. 18., En: Revista EIA, 2012

ASTM International. Norma ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2001.

ASTM International. Norma ASTM E384 – 11 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. West Conshohocken : ASTM International, 2011.

ASTM International. Norma ASTM E45-05 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken : ASTM International, 2005.

BAILEY, Alton E. Aceites y grasas industriales. s.l. : Reverte, 1961.

BOHORQUEZ BECERRA, Oscar R. Sistema de información para el control de mantenimiento de la planta extractora de aceite de palma. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2004.

BOTELLA, J. y SÁNCHEZ, R. Efecto del contenido de azufre y del grado de desoxidación sobre la ductilidad en caliente de aceros inoxidable austeníticos resultados en estado de solidificación. Madrid : Creative Commons 3.0, 1998.

- CARDONA GRANADOS, Afranio.** Selección de Aceros. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1988.
- CARRASCO C., José L.** Extracción de aceite de palmiste: Procesos., Valledupar: Palmas, 1995, Vol. 16.
- CHONG, CHIEW LET.** Corrosión de acero dulce por destilados de ácidos grasos de palma. , Vol. 25,. Especial, s.l. : Palmas, 2004.
- DÖRRENBURG.** Tratamientos Térmicos. Nitruración por plasma. Huarte-Araquil: Edelst, 2012.
- FEDEPALMA.** Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. [En línea] Enero de 2010 [Citado: 20 Abril de 2014] disponible en: (www.fedepalma.org).
- GOMEZ MORENO, Orlando J.** Soldadura de Metales. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1993.
- GONZÁLEZ, Andrés.** Influencia de los parámetros de proyección térmica en la microestructura de los recubrimientos de zircona-alúmina y circonacera usados como barreras térmicas. En: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Vol., 33. 2013.
- GUZMAN N., María.** Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste. Granada, 2007. p. 11-17. Trabajo doctoral. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias.
- HANDBOOK, ASM INTERNATIONAL.** Materials Selection and Design. 1997, pág:822. Vol. 20.
- HERNANDEZ A., Héctor y ESPEJO M., Édgar.** Mecánica de fractura y análisis de falla. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- IBARRA ECHEVERRIA, Mauricio, NUÑES SOLIS, Eduardo y HUERTAS IBAÑEZ, José Miguel.** Manual de Mantenimiento. Cerillos: INDURA S.A, 2010.
- Indupalma.** Aceite de palmiste. [En línea] [Citado el: 05 de 09 de 2014.] disponible en: (<http://www.indupalma.com/aceite-de-palmiste>).

INDUPALMA. Indupalma. [En línea] [Citado el: 25 de 09 de 2014.] disponible en: (http://www.indupalma.com/sites/default/files/imagefield_thumbs/gallery/brochure_productos_y_servicios.pdf).

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Guía técnica para el cultivo de la palma africana. Managua : IICA, 1983.

Intergrasas Ltda. Intergrasas. [En línea] Palmali Aceite Vegetal, 1999. [Citado el: 16 de Octubre de 2014.] disponible en: (<http://www.integrasas.com/Home/productos>).

IPAZ, L., APERADOR, W. y ESGUERRA-ARCE, A. Influencia de un tratamiento térmico en el comportamiento tribológico de un acero FERMANAL. Vol. 59, En: Revista Mexicana de Física, 2013.

KALPAKJIAN, Sepore y SCHMID, Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. México D.F: PEARSON EDUCACION, 2002.

LEON SEVILLA, Lysis M., GUTIERREZ PINEDA, Juan Carlos y TORO, Alejandro. Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimiento duros ricos en Cromo y Tungsteno aplicados por soldadura eléctrica. En: Red de Revistas Científicas de América Latina. Bogotá, 2007.

LÓPEZ VELÁZQUEZ, Dr. Andrés. Lopezva Wordpress. [En línea] 2011. [Citado el: 25 de Enero de 2014.] Disponible en: (<http://lopezva.files.wordpress.com/2011/09/tema-1-desgaste2.pdf>).

MARTÍNEZ Óscar M., SÁNCHEZ, Francisco J. y SUÁREZ, Oscar Y. Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD (Ethyl ester production from (RBD) palm oil). En: Scielo. Vol. 27., 2007.

MARTINEZ P., Francisco. La Tribología: Ciencia y Técnica para el mantenimiento. México D.F: LIMUSA S.A, 2002.

NORIEGA RÍOS, Ainsworth. Pontificia Universidad Católica Del Perú. [En línea] [Citado el: 22 de 07 de 2014.] disponible en: (http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/4938/NORIEGA_AINSWORTH_RESISTENCIA_DESGASTE_ABARSIVO_RECARGUES_DUROS_ELECTRODOS_5%25_FeTi_FeV.pdf?sequence=1).

OTEA Observatorio Tecnológico del Metal. AIMME Instituto Tecnológico Metalmeccánico. [En línea] 2008. [Citado el: 6 de Junio de 2014.] disponible en: (http://www.aimme.es/archivosbd/observatorio_opportunidades/proyeccion-termica-julio-2008__3_.pdf).

PERÉZ G., Antonio J. Aplicación de pinturas e imprimaciones protectoras. S.l. : IC Editoriales. 2013.

PÉREZ QUIROZ, J. T., ARAUJO ARREOLA, N. L., TORRES MURILLO, A., PORCAYO CALDERÓN, J, RENDÓN BELMONTE, M, TERÁN GUILLEN, J, MARTÍNEZ MADRID, M. y PÉREZ CAMPOS, R. Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles. Barcelona: OmniaScience, 2013.

REITEC. REITEC SERVICIOS DE INGENIERÍA. [En línea] [Citado el: 30 de 07 de 2014.] disponible en: (<http://www.reitec.es/Pdf/agua01.pdf>).

RUBIANO, Germán. Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. (Improvement of oil palm kernel extraction). Vol. 19., 1998.

SÁ BRITO, V.R.S., BASTOS, I.N y COSTA, H.R.M. Corrosion resistance and characterization of metallic coatings deposited by thermal spray on carbon steel. En: Materials and Design, 2012.

SAKIHAMA José y FOSCA, Carlos. Estudio de la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo. Perú: Metalurgia Materiales y Soldadura., 2007.

TEGART, W.J y McG. y Gittins, A. The Role of Sulfides in the hot workability of steels. New York : ASM, 2011.

VANEGAS, Libardo. Universidad Tecnológica de Pereira. [En línea][Citado el: 4 de Julio de 2014.] disponible en: (<http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap5>).

VÁZQUEZ VAAMONDE, Alfonso y De DAMBORENEA G., Juan. Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2001.

ZAKI, Ahmad. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Burlington: Elsevier Ltda., 2006.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **FEDEPALMA.** Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. [En línea] Enero de 2010 [Citado: 20 Abril de 2014] disponible en: (www.fedepalma.org).
2. **INDUPALMA.** Indupalma. [En línea] [Citado el: 25 de 09 de 2014.] disponible en: (http://www.indupalma.com/sites/default/files/imagefield_thumbs/gallery/brochure_productos_y_servicios.pdf).
3. **GOMEZ MORENO, Orlando J.** Soldadura de Metales. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1993.
4. **Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).** Guía técnica para el cultivo de la palma africana. Managua : IICA, 1983.
5. **BOHORQUEZ BECERRA, Oscar R.** Sistema de información para el control de mantenimiento de la planta extractora de aceite de palma. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2004.
6. **ALFARO C, Marcos y ORTIZ A., Elvin.** Proceso de producción de aceite de palma. [En línea] Julio de 2006. [Citado el: 23 de Junio de 2014.] disponible en: (<http://www.galeon.com/subproductospalma/proceso1.pdf>).
7. **CARRASCO C., José L.** Extracción de aceite de palmiste: Procesos., Valledupar: Palmas, 1995, Vol. 16.
8. **MARTINEZ P., Francisco.** La Tribología: Ciencia y Técnica para el mantenimiento. México D.F: LIMUSA S.A, 2002.
9. **LÓPEZ VELÁZQUEZ, Dr. Andrés.** Lopezva Wordpress. [En línea] 2011. [Citado el: 25 de Enero de 2014.] Disponible en: (<http://lopezva.files.wordpress.com/2011/09/tema-1-desgaste2.pdf>).
10. **KALPAKJIAN, Sepore y SCHMID, Steven R.** Manufactura, ingeniería y tecnología. México D.F: PEARSON EDUCACION, 2002.

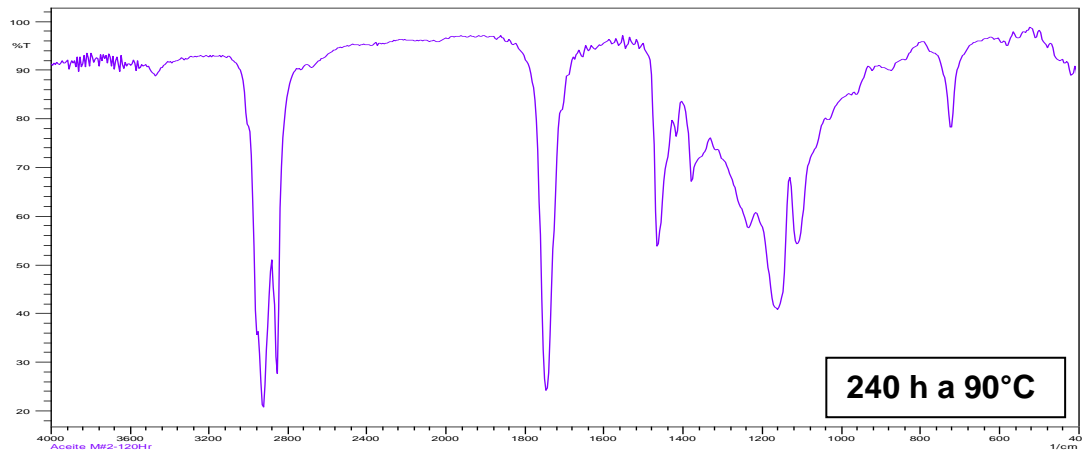
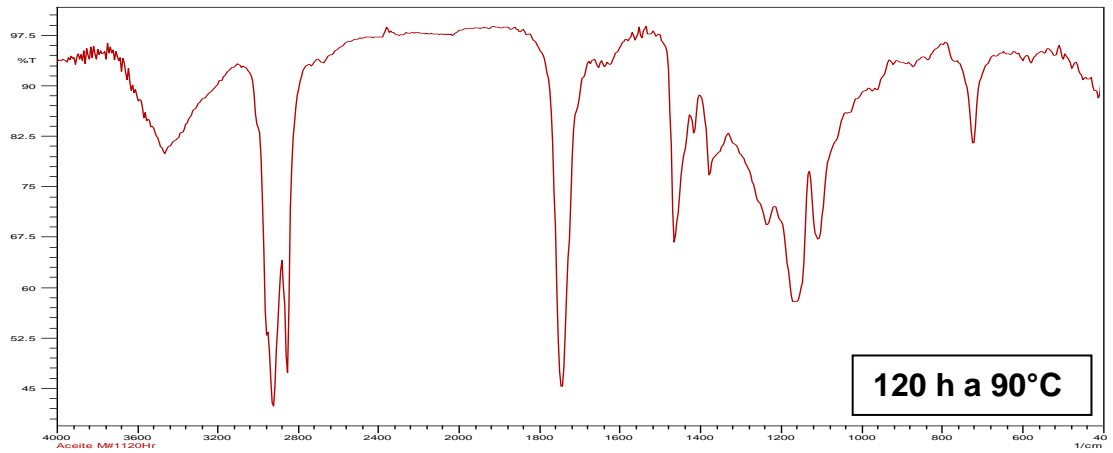
11. **IBARRA ECHEVERRIA, Mauricio, NUÑES SOLIS, Eduardo y HUERTAS IBAÑEZ, José Miguel.** Manual de Mantenimiento. Cerillos: INDURA S.A, 2010.
12. **HERNANDEZ A., Héctor y ESPEJO M., Édgar.** Mecánica de fractura y análisis de falla. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
13. **ZAKI, Ahmad.** Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Burlington: Elsevier Ltda., 2006.
14. **ASTM International.** Norma ASTM E3-01 Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International, 2001.
15. **ASTM International.** Norma ASTM E45-05 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken : ASTM International, 2005.
16. **ASTM International.** Norma ASTM E384 – 11 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. West Conshohocken : ASTM International, 2011.
17. **PERÉZ G., Antonio J.** Aplicación de pinturas e imprimaciones protectoras. S.I. : IC Editoriales. 2013.
18. **SÁ BRITO, V.R.S., BASTOS, I.N y COSTA, H.R.M.** Corrosion resistance and characterization of metallic coatings deposited by thermal spray on carbon steel. En: Materials and Design, 2012.
19. **OTEA Observatorio Tecnológico del Metal.** AIMME Instituto Tecnológico Metalmeccánico. [En línea] 2008. [Citado el: 6 de Junio de 2014.] disponible en: (http://www.aimme.es/archivosbd/observatorio_oportunidades/proyeccion-termica-julio-2008__3_.pdf).
20. **GONZÁLEZ, Andrés.** Influencia de los parámetros de proyección térmica en la microestructura de los recubrimientos de circona-alúmina y circonaceria usados como barreras térmicas. En: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Vol., 33. 2013.
21. **GUZMAN N., María.** Recubrimientos de NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste. Granada, 2007. p. 11-17.Trabajo doctoral. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias.

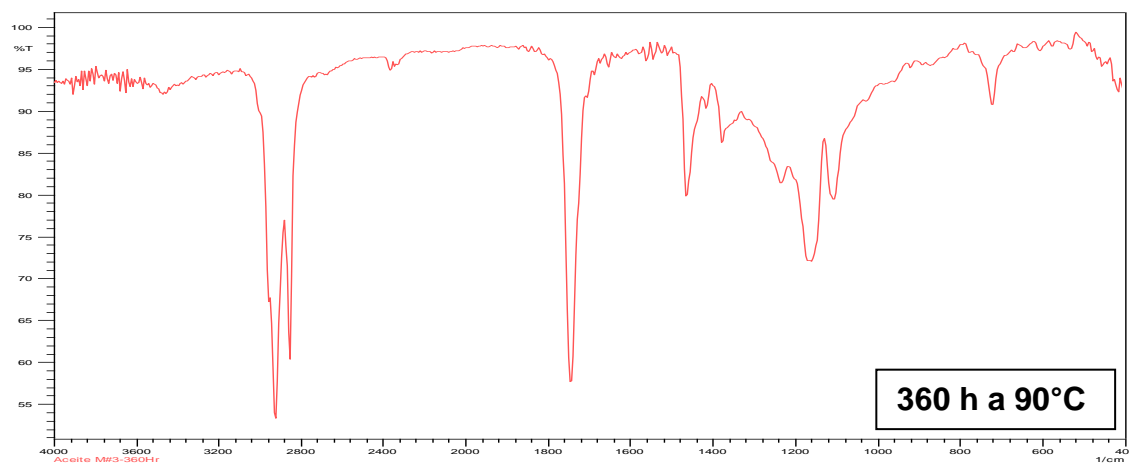
22. **VANEGAS, Libardo.** Universidad Tecnológica de Pereira. [En línea][Citado el: 4 de Julio de 2014.] disponible en: (<http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disl/Cap5>).
23. **VÁZQUEZ VAAMONDE, Alfonso y De DAMBORENEA G., Juan.** Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2001.
24. **HANDBOOK, ASM INTERNATIONAL.** Materials Selection and Design. 1997, pág:822. Vol. 20.
25. **NORIEGA RÍOS, Ainsworth.** Pontificia Universidad Católica Del Perú. [En línea] [Citado el: 22 de 07 de 2014.] disponible en: (http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/4938/NORIEGA_AINSWORTH_RESISTENCIA_DESGASTE_ABARSIVO_RECARGUES_DUROS_ELECTRODOS_5%25_FeTi_FeV.pdf?sequence=1).
26. **SAKIHAMA José y FOSCA, Carlos.** Estudio de la resistencia a la abrasión de bajo esfuerzo. Perú: Metalurgia Materiales y Soldadura., 2007.
27. **CARDONA GRANADOS, Afranio.** Selección de Aceros. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1988.
28. **LEON SEVILLA, Lysis M., GUTIERREZ PINEDA, Juan Carlos y TORO, Alejandro.** Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimiento duros ricos en Cromo y Tungsteno aplicados por soldadura eléctrica. En: Red de Revistas Científicas de América Latina. Bogotá, 2007.
29. **A. Rohman, Y.B. Che Mana.** Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil. Vol. 43, s.l. : Elsviver, 2009.
30. **MARTÍNEZ Óscar M., SÁNCHEZ, Francisco J. y SUÁREZ, Oscar Y.** Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD (Ethyl ester production from (RBD) palm oil). En: Scielo. Vol. 27., 2007.
31. **Indupalma.** Aceite de palmiste. [En línea] [Citado el: 05 de 09 de 2014.] disponible en: (<http://www.indupalma.com/aceite-de-palmiste>).
32. **BAILEY, Alton E.** Aceites y grasas industriales. s.l. : Reverte, 1961.

33. **REITEC**. REITEC SERVICIOS DE INGENIERÍA. [En línea] [Citado el: 30 de 07 de 2014.] disponible en: (<http://www.reitec.es/Pdf/agua01.pdf>).
34. **RUBIANO, Germán**. Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. (Improvement of oil palm kernel extraction). Vol. 19., 1998.
35. **Intergrasas Ltda**. Intergrasas. [En línea] Palmali Aceite Vegetal, 1999. [Citado el: 16 de Octubre de 2014.] disponible en: (<http://www.integrasas.com/Home/productos>).
36. **PÉREZ QUIROZ, J. T., ARAUJO ARREOLA, N. L., TORRES MURILLO, A., PORCAYO CALDERÓN, J, RENDÓN BELMONTE, M, TERÁN GUILLEN, J, MARTÍNEZ MADRID, M. y PÉREZ CAMPOS, R.** Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles. Barcelona: OmniaScience, 2013.
37. **CHONG, CHIEW LET**. Corrosión de acero dulce por destilados de ácidos grasos de palma. , Vol. 25,. Especial, s.l. : Palmas, 2004.
38. **BOTELLA, J. y SÁNCHEZ, R.** Efecto del contenido de azufre y del grado de desoxidación sobre la ductilidad en caliente de aceros inoxidable austeníticos resulfurados en estado de solidificación. Madrid : Creative Commons 3.0, 1998.
39. **TEGART, W.J y McG. y Gittins, A.** The Role of Sulfides in the hot workability of steels. New York : ASM, 2011.
40. **AGUDELO, Giraldo y PABLO, Esaú.** Estudio del desgaste de recubrimientos duros en una herramienta de arado tipo cincel. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
41. **DÖRRENBURG**. Tratamientos Térmicos. Nitruración por plasma. Huarte-Araquil: Edelst, 2012.
42. **APERADOR, William, BAUTISTA, Jorge H. y BETANCUR, Juan D.** Resistencia al desgaste erosivo-corrosivo de aceros austeníticos FERMANAL. Vol. 18., En: Revista EIA, 2012
43. **IPAZ, L., APERADOR, W. y ESGUERRA-ARCE, A.** Influencia de un tratamiento térmico en el comportamiento tribológico de un acero FERMANAL. Vol. 59, En: Revista Mexicana de Física, 2013.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de espectrofotometria infrarroja para cada muestra individual de aceite de palmiste.





Anexo B. Cálculo de la velocidad de corrosión.

$$\text{Velocidad de corrosión (mpy)} = \frac{K * W}{A * T * D}$$

$$K = 3,45 * 10^6$$

$$W = \text{Masa pérdida (g)}$$

$$A = \text{Área (cm}^2\text{)}$$

$$T = \text{Tiempo de exposición (h)}$$

$$D = \text{Densidad (g/cm}^3\text{)}$$

Anexo C. Composición general de ácidos grasos del aceite de palmiste.

Perfil de ácidos grasos		
Nombre (Ácido)	Tipo	Nivel
Caprónico	C6:0	<0,8
Caprílico	C8:0	2,4 - 6,2
Cáprico	C10:0	2,6 - 5,0
Láurico	C12:0	45,0 – 55,0
Mirístico	C14:0	14,0 – 18,0
Palmítico	C16:0	6,5 – 10,0
Esteárico	C18:0	1,0 - 3,0
Oléico	C18:1	12,0 – 19,0
Linoléico	C18:2	1,0 - 3,5
Linolénico	C18:3	<0,2

Fuente: Intergrasas Ltda. Intergrasas. [En línea] Palmali Aceite Vegetal, 1999. [Citado el: 16 de Octubre de 2014.] <http://www.integrasas.com/Home/productos>.