

Análisis tribológico y diseño de un WPS para la reconstrucción con soldadura de tornillos sinfín  
usados en el prensado de corozo para la extracción de aceite crudo de palma africana

Dwan Sebastián Pinto Díaz

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Metalúrgico

Director

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Codirector

Cristian Camilo Viáfara Arango

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mi madre Adriana Díaz Reyes, quien desde un inicio creyó en mis capacidades y me motivó a continuar a pesar de ciertas dificultades durante el proceso, quien gracias a su profundo amor y valores me enseñó a ser una excelente persona, responsable, honesto, empático y demás cualidades importantes para mi desarrollo en la sociedad.

A mi padre Ramiro Pinto Argüello, quien siempre me apoyó para que nunca me faltara nada, pero que gracias a su carácter me enseñó que no todo es sencillo de obtener y hay que hacer grandes esfuerzos y sacrificios para lograr lo deseado, llevándome a ser dedicado, comprometido, trabajador y sobre todo perseverante.

A mi hermana Nikoll Dayana Pinto Díaz, con quien he pasado tantos momentos de risas y felicidad, ayudándome a sobrellevar momentos complicados.

Por último, pero no menos importante, dedico este proyecto a cada una de las versiones de mi ser, de mi personalidad, que se esforzaron y dieron lo mejor sí mismas para superar cada una de las adversidades y lograr este tan anhelado sueño.

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la fortaleza y capacidad de culminar esta increíble e importante etapa de mi vida.

A mis padres y mi hermana por aportar cada uno de ellos algo importante y vital en mi vida, necesario para lograr cualquier cosa que me proponga.

A la Universidad Industrial de Santander por la excelente calidad de su educación profesional que tanto la caracteriza, por sus instalaciones, docentes, técnicos y demás servicios brindados durante el tiempo que estuve en ella.

A mi director de tesis, el Dr. Mauricio Rincón y mi codirector, el Dr. Cristian Viáfara, quienes me guiaron con profesionalidad en el desarrollo de este proyecto. Agradezco profundamente todos los conocimientos y consejos que me aportaron durante este proceso.

A esa persona que fue tan especial en su momento y me ayudó a ver y resaltar mis fortalezas y lo increíble y especial que puedo llegar a ser. Quedo muy agradecido por haberme motivado tanto en el final de esta bella etapa.

## Tabla de contenido

### Contenido

Introducción .....	11
1. Marco teórico.....	13
1.1 Mecanismos de daño.....	13
1.2 Tribología .....	14
1.2.1 <i>Desgaste abrasivo y erosivo por partículas duras</i> .....	18
1.3 Soldadura .....	20
1.3.1 <i>Soldadura por arco eléctrico</i> .....	20
1.3.2 <i>Proceso SMAW</i> .....	21
1.3.3 <i>Discontinuidades y defectos en el metal base y la soldadura</i> .....	24
1.4 Aleación de acero al cromo-molibdeno referencia 2048 (sinfines p9 y p15) .....	25
1.5 Soldadura xuper abratec n6710 xhd.....	26
1.5.1 <i>Procedimiento de aplicación</i> .....	27
1.6 Proceso de prensado para la extracción de aceite rojo.....	27
2. Objetivos.....	30
2.1 Objetivo general.....	30
2.2 Objetivos específicos .....	30
3. Metodología.....	31
3.1 Revisión bibliográfica.....	32
3.2 Caracterización de la reconstrucción usada actualmente .....	32
3.3 Análisis tribológico.....	34
3.4 Selección de los parámetros y aspectos relevantes en la aplicación de la soldadura .....	35
3.5 Diseño del WPS y PQR .....	35
3.6 Aplicación del PQR en el material afectado para la calificación del WPS.....	35
3.7 Caracterización de la reconstrucción sugerida.....	36
4. Resultados.....	36
4.1 Caracterización de la reconstrucción usada actualmente .....	36
4.1.1 <i>Determinación de inclusiones no metálicas en el metal base y la soldadura</i> .....	36

4.1.2 Defectos presentes en la reconstrucción.....	39
4.1.3 Microestructura y dureza de la reconstrucción (met. base -soldadura).....	41
4.2 Análisis tribológico.....	46
4.2.1 Definición de elementos y sus características .....	49
4.2.2 Interacción entre elementos.....	50
4.3 Selección de los parámetros y aspectos relevantes en la aplicación de la soldadura .....	52
4.3.1 Precaentamiento y postcaentamiento .....	52
4.3.2 Parámetros para el diligenciamiento del WPS.....	53
4.4 Diseño del WPS .....	55
4.5 Diseño y aplicación del PQR en el material afectado para la calificación del WPS.....	57
4.6 Caracterización de la reconstrucción sugerida.....	59
4.6.1 Defectos presentes en la reconstrucción sugerida.....	59
4.6.2 Microestructura y dureza de la reconstrucción.....	60
5. Conclusiones.....	62
6. Recomendaciones .....	63
Referencias bibliográficas.....	64

**Lista de tablas**

Tabla 1 Composición química del acero al cromo – molibdeno referencia 2048 [8].....	25
Tabla 2 Composición de la soldadura N6710 XHD [22].....	26
Tabla 3 Amperajes recomendados para la aplicación de la soldadura. [21].....	27
Tabla 4 Dureza metal base en HRC.....	42
Tabla 5 Dureza de la soldadura N6710 en HRC.....	45
Tabla 6 Dureza obtenida de los electrodos E7018 y N6710 en HRC.....	61

**Lista de figuras**

Figura 1 Sinfines usados para el prensado del fruto. ....	12
Figura 2 Tornillos sinfín usados en el prensado de fruto montados en la prensa. ....	12
Figura 3 Mecanismos que provocan daños en componentes o estructuras. (Adaptada de [1]) .....	14
Figura 4 Tribo-sistema (Adaptada de [1]) .....	15
Figura 5 Representación esquemática de los elementos de un tribo-sistema. (Adaptado [1]) .....	16
Figura 6 Factores que influyen en el desgaste de la estructura. (Adaptada de [1]) .....	17
Figura 7 Ilustración de a) Erosión b) Abrasión entre tres cuerpos y c) Abrasión entre dos cuerpos. (Adaptada de [2]) .....	19
Figura 8 Sistemas tribológicos amenazados por desgaste abrasivo. ....	20
Figura 9 Representación esquemática del proceso SMAW. (Adaptada de [4]) .....	22
Figura 10. Esquema de las posiciones del electrodo en el equipo de soldadura SMAW, corriente continua. a) Conexión en polaridad negativa. b) conexión en polaridad positiva. ....	24
Figura 11 Prensas P9 y P15. [10].....	28
Figura 12 Vista superior de la prensa. Adaptado de [11] .....	29
Figura 13 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto. ....	31
Figura 14 Parte del sinfín de donde se extrajeron las diferentes muestras para analizar.....	33
Figura 15 Probetas usadas para la toma de durezas.....	34
Figura 16 a) Micrografía metal base (100x) b) Micrografía interface metal base – soldadura (100x).....	36
Figura 17 Morfología de las diferentes inclusiones no metálicas. (Adaptado de [20]) .....	37

Figura 18 Áreas para la determinación del nivel de severidad de los tipos de inclusiones no metálicas. a) Alúmina b) Sulfuros c) Silicatos d) Óxidos.....	37
Figura 19 a) Defectos presentes en la reconstrucción. b) imagen transversal .....	40
Figura 20 Micrografía metal base. ....	41
Figura 21 Comparaciones de la microestructura de la soldadura (última capa).....	44
Figura 22 Sinfín reconstruido desgastado.....	46
Figura 23 Composición del tribo-sistema de las prensas P9 y P15. ....	47
Figura 24 Esquema simplificado del tribo-sistema.....	48
Figura 25 Abrasión a tres cuerpos. (Adaptado de [1]).....	51
Figura 26 Superficie final de la reconstrucción sugerida.....	59
Figura 27 Interfases presentes en la reconstrucción sugerida. ....	60

## Resumen

**Título:** Análisis tribológico y diseño de un WPS para la reconstrucción con soldadura de tornillos sinfín usado en el prensado de corozo para la extracción de aceite crudo de palma africana. \*

**Autor:** Dwan Sebastián Pinto Díaz \*\*

**Palabras Clave:** Tribología, soldadura, reconstrucción, prensado, mecanismos de daño.

**Descripción:** Este proyecto partió de una problemática presentada en la extracción de aceite de palma africana en la empresa palmas del cesar, donde los tornillos sinfín se ven significativamente afectados por diversos mecanismos de daño y agentes externos. La empresa decidió reconstruir dichos tornillos sinfín con soldadura SMAW una vez están altamente desgastados, por medio de la utilización de dos diferentes tipos de electrodos; uno para la reconstrucción de los lugares más desgastados de la pieza y otro como última capa superficial para aportar las propiedades necesarias que contrarresten el alto desgaste. Sin embargo, durante el proceso de reconstrucción la última capa sufre un grave agrietamiento, el cual no permite un desgaste homogéneo de la pieza durante su aplicación en el prensado del fruto. Dicho problema provoca el desprendimiento de trozos de la última capa, dejando expuestas las capas de relleno las cuales son relativamente blandas y por consecuencia la pieza se desgasta rápidamente. Se realizó el proceso de caracterización tanto del metal base de los tornillos sinfín como de las soldaduras siguiendo las normas apropiadas, también se observaron sus microestructuras y diferentes morfologías. Luego de identificar los diferentes elementos interfaciales que causan el rápido desgaste, se recopilaron los parámetros e información obtenida en un WPS el cual sirvió como guía para la solución al problema de agrietamiento.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Mauricio Rincón Ortiz. Doctor en Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirector: Cristian Camilo Viáfara Arango. Doctor en Ingeniería Mecánica.

### Abstrac

**Title:** Tribological analysis and design of a WPS for the reconstruction with welding of augers used in the pressing of corozo for the extraction of crude oil from African palm. \*

**Author:** Dwan Sebastián Pinto Díaz \*\*

**Key Words:** Tribology, welding, reconstruction, pressing, mechanisms of damage.

**Drescription:** This project started from a problem presented in the extraction of African palm oil in the company Palmas del Cesar, where the worm screws are significantly affected by various damage mechanisms and external agents. The company decided to rebuild these worm screws with SMAW welding once they are highly worn, by using two different types of electrodes; one for the reconstruction of the most worn places of the part and another as the last surface layer to provide the necessary properties to counteract the high wear. However, during the reconstruction process, the last layer suffers a serious cracking, which does not allow a homogeneous wear of the piece during its application in the pressing of the fruit. This problem causes pieces of the last layer to detach, exposing the filler layers which are relatively soft and consequently the piece wears quickly. The characterization process of both the base metal of the worms and the welds was carried out following the appropriate standards, also their microstructures and different morphologies were observed. After identifying the different interfacial elements that cause rapid wear, the parameters and information obtained were compiled in a WPS which served as a guide for the solution to the cracking problem.

---

\*Degree Work

\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Mauricio Rincón Ortiz. Doctor en Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirector: Cristian Camilo Viáfara Arango. Doctor en Ingeniería Mecánica.

## Introducción

En los distintos campos de la industria, los materiales están expuestos a diferentes condiciones como lo es la compresión, tracción, desgaste, fatiga, humedad, ambientes químicos, etc. Todos estos en conjunto se encargan de darle fin poco a poco a la vida útil de una pieza sometida a dichas condiciones. En la mayoría de los casos es de suma importancia reemplazar las piezas afectadas por una nueva. Sin embargo, en algunas aplicaciones se da la oportunidad de reconstruir las piezas desgastadas mediante diferentes técnicas, como el uso de soldadura, para así extender su tiempo de vida útil. En general, el método de reconstrucción siempre debe ser el más adecuado y aplicado de la mejor manera posible, para que así la pieza pueda seguir cumpliendo su función con la misma eficiencia o muy similar a aquella que se tenía originalmente.

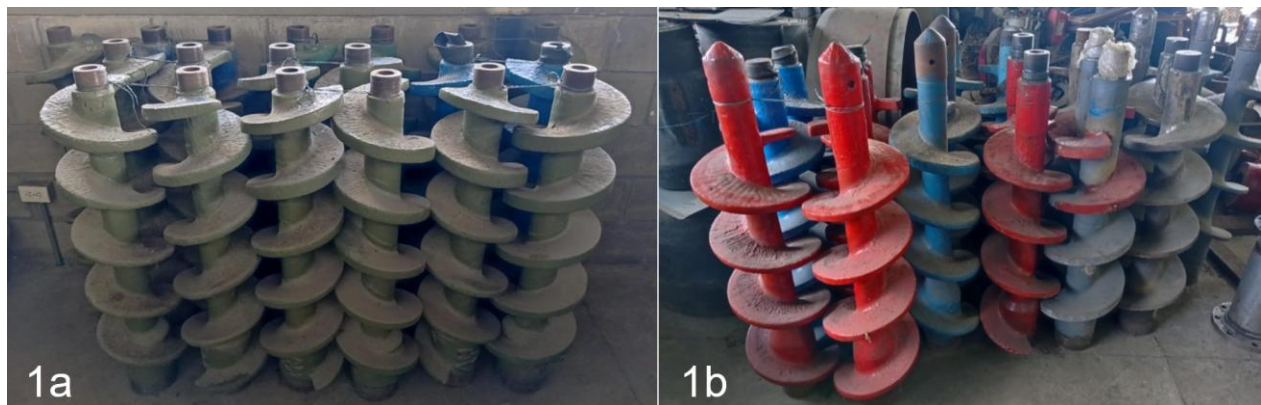
Palmas del cesar es una empresa agroindustrial del sector palmicultor colombiano, dedicada al cultivo, compra y procesamiento de la palma de aceite y estructuración de proyectos en pro de la sostenibilidad del cultivo de palma de aceite. Esta empresa tuvo sus orígenes en el año 1960 con una plantación de 500 hectáreas, la cual fue una de las primeras siembras comerciales de palma africana en el país, por lo cual la empresa es pionera en esta importante actividad agrícola. A través de los años la empresa ha ido creciendo considerablemente, siendo cada vez más el número de hectáreas plantadas y de proveedores afiliados.

Actualmente la empresa se encuentra frente a un problema de alto desgaste en una de sus líneas de extracción, exactamente en el prensado de fruto. En este proceso de prensado de fruto se usa un tipo de sinfines fabricados de un acero al Cromo-Molibdeno referencia 2048, donde los contenidos de Cromo y Molibdeno corresponden a una aleación SAE 4340 [8]. Hay dos

diferentes capacidades de procesamiento, por ello se tienen dos tipos diferentes de tornillos sinfín, los P9 (9 TON/hora) como se aprecia en la **Figura 1a** y los P15 (15 TON/hora) como se muestra en la **Figura 1b**. En la **Figura 2a** se muestra el montaje de los P15 dentro de la canasta de la prensa la cual está agujerada en toda su superficie con el fin de drenar los líquidos obtenidos durante el prensado. La **Figura 2b** enseña los conos de presión que se encargan de aplicar la fuerza necesaria para la debida extracción de aceite del fruto.

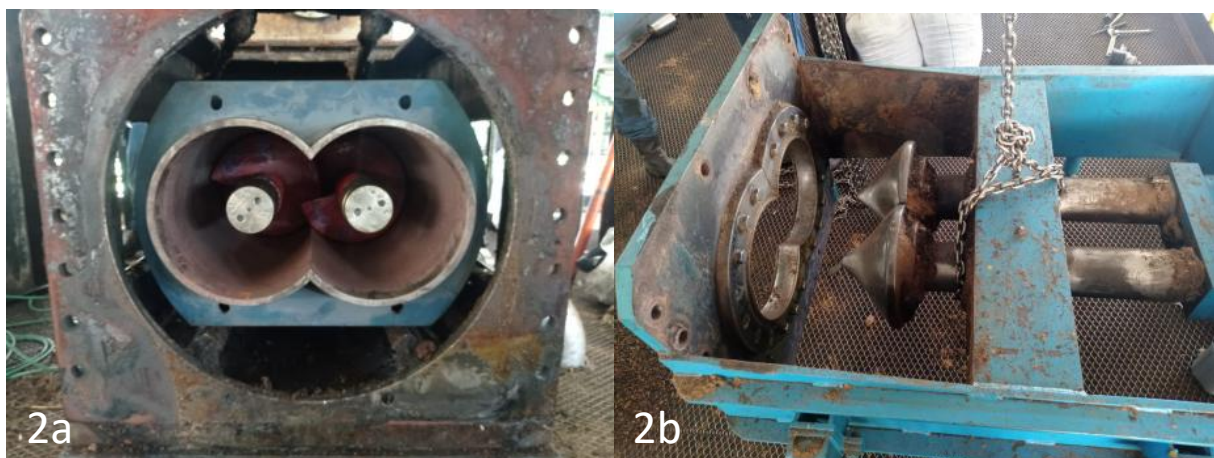
### Figura 1

Sinfines usados para el prensado del fruto.



### Figura 2

Tornillos sinfín usados en el prensado de fruto montados en la prensa



Los tornillos sinfín comprimen el fruto para extraer el licor de prensa, el cual pasa por diferentes procesos para obtener el aceite rojo.

Por otro lado, el proceso utilizado en la empresa para la aplicación de soldadura es el proceso de arco con electrodo revestido (SMAW). En las capas interiores se emplean electrodos E7018 y para las capas exteriores o superficiales, las cuales son las encargadas de aportar resistencia mecánica, se utilizan electrodos Abratec N6710. Cabe resaltar que la pieza puede soportar más de una reconstrucción.

Teniendo en cuenta lo anterior, este proyecto tiene como propósito analizar el desgaste de los tornillos sinfín y diseñar un WPS para el proceso de reconstrucción de estos, ya que actualmente en la planta este se aplica empíricamente y de diferentes maneras. Se espera mejorar algunos aspectos del proceso y conseguir extender el tiempo de vida útil de la pieza.

## 1. Marco teórico

En esta sección se expondrán conceptos teóricos de tribología y soldadura enlazados a la problemática presente actualmente en la empresa palmas del pesar.

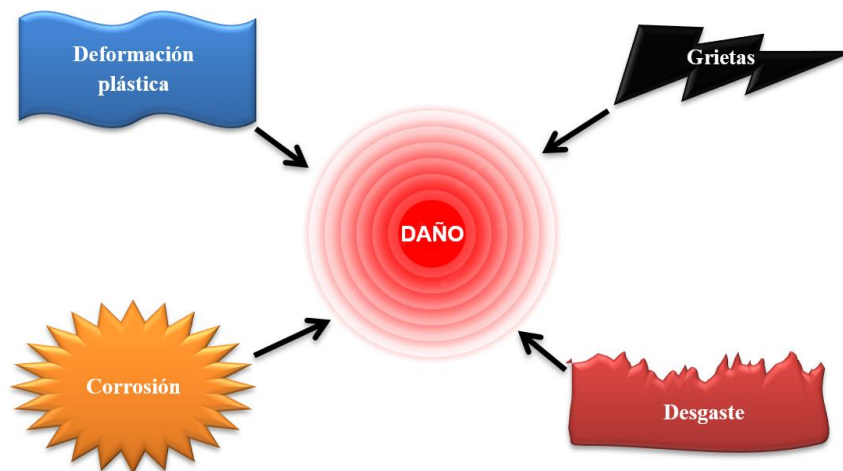
### 1.1 Mecanismos de daño

Una estructura o componente en servicio puede fallar por el conjunto de mecanismos de daño o debido a uno de ellos, entre los cuales se encuentran la deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión o desgaste como se muestra en la **Figura 3**. Por ejemplo, la

deformación plástica de una pieza puede llegar a causar la pérdida de eficiencia en el proceso en el cual está en servicio o peor aún, llegar a ser incapaz de ejecutar la función y propiciar el daño de los demás componentes. Por otro lado, las grietas son un factor crítico en estructuras sometidas a altos esfuerzos, pues fácilmente pueden provocar el fallo catastrófico de la estructura. Dichos mecanismos de daño afectan completamente los componentes y obligan a ser reemplazados. Sin embargo, la corrosión y el desgaste son mecanismos que por lo general sólo afectan la superficie de la estructura o piezas, dando la oportunidad de ser reconstruidas [1].

### Figura 3

Mecanismos que provocan daños en componentes o estructuras.



*Nota.* Adaptada de Zum Gahr K. H. (1987). Microstructure and wear of materials [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].

## 1.2 Tribología

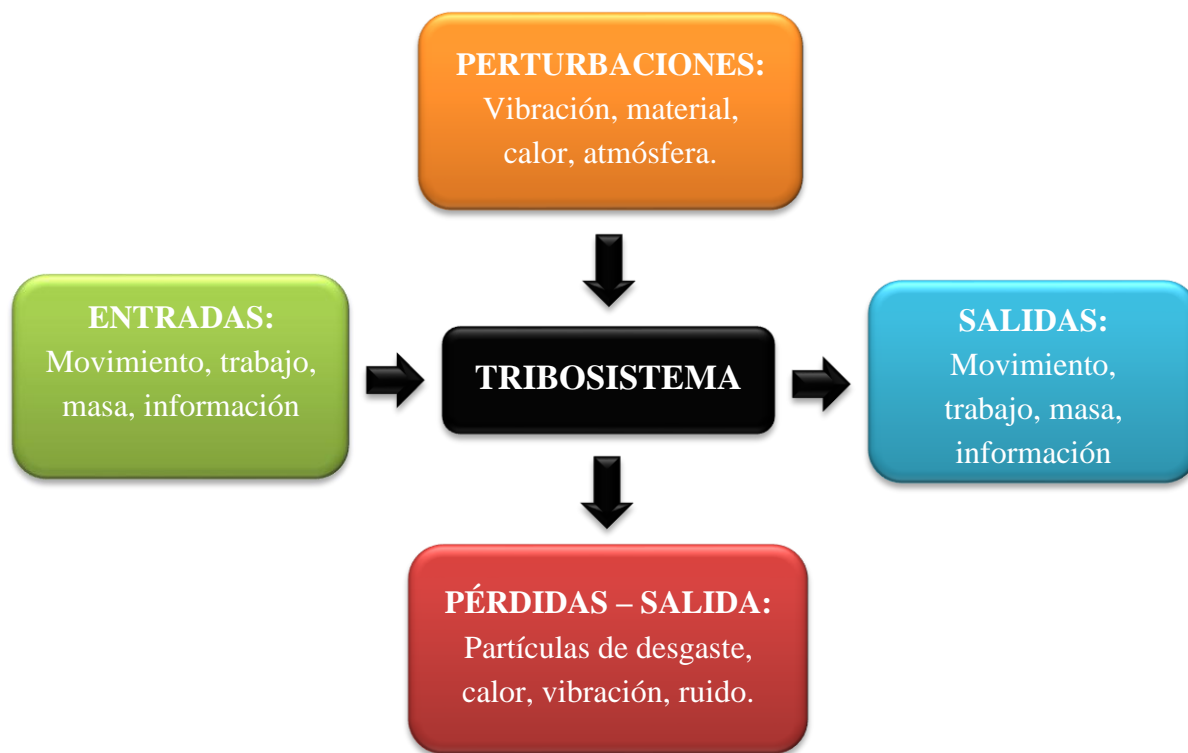
En el libro Tribology se define la tribología como “La rama de la ciencia y la tecnología enfocada en las superficies que interactúan en movimiento relativo y demás materias asociadas’, e incluido el estudio de la fricción, el desgaste, la lubricación y el diseño” [2]. Como

consecuencia de esto la superficie o superficies en contacto sufren deformaciones y/o principalmente pérdida de material.

A continuación, en la **Figura 4** se muestra el esquema de cómo se compone un sistema tribológico.

**Figura 4**

Tribo-sistema



*Nota.* Adaptada de Zum Gahr K. H. (1987). Microstructure and wear of materials [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].

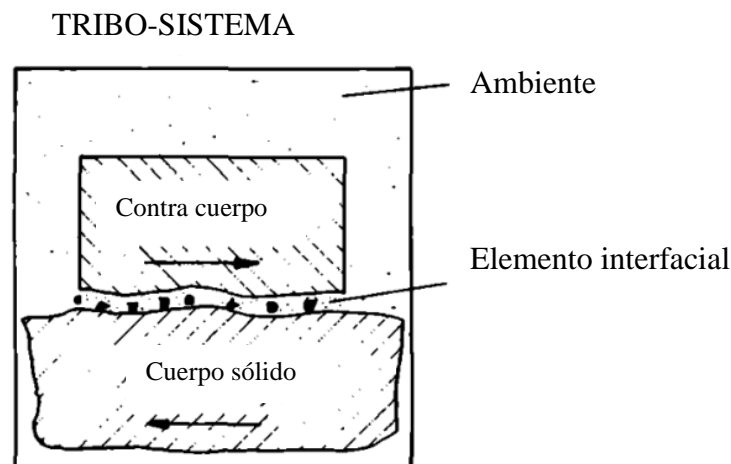
Al igual que en muchos otros sistemas, este se encarga de transformar las entradas en salidas. Un tribo-sistema aprovecha entradas útiles como movimiento, trabajo y material y sus salidas están basadas en lo mismo. Sin embargo, la fricción y el desgaste dan lugar a salidas no

deseadas como residuos de material, calor, vibraciones y ruido. Para un análisis profundo se requiere de una pequeña muestra cercana o de los mismos elementos que conforman el sistema tribológico, esto con el fin de examinarla y determinar con mayor seguridad los fenómenos presentes. Para complementar dicho análisis se debe realizar una descripción estructural del sistema, considerándose esta como interna y la funcional como externa. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace un análisis de la conexión que hay entre el tribo-sistema y el resto de la maquinaria. En específico, la descripción estructural se encarga de analizar las estructuras internas de un tribo-sistema, así como sus elementos, propiedades e interacciones. Por último, debido a que se producen salidas no deseadas, el tribo-sistema va cambiando con el tiempo [1].

A continuación, la **Figura 5** presenta la forma simplificada de un tribo-sistema general según la norma DIN 50320 [5].

### Figura 5

Representación esquemática de los elementos de un tribo-sistema.



*Nota.* Adaptada de Zum Gahr K. H. (1987). Microstructure and wear of materials [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].

No sobra mencionar que el contra cuerpo puede estar hecho de un sólido, un líquido o un gas y los elementos interfaciales pueden estar presentes como lubricantes, capas adsorbidas, suciedad o simplemente un sólido en general [1].

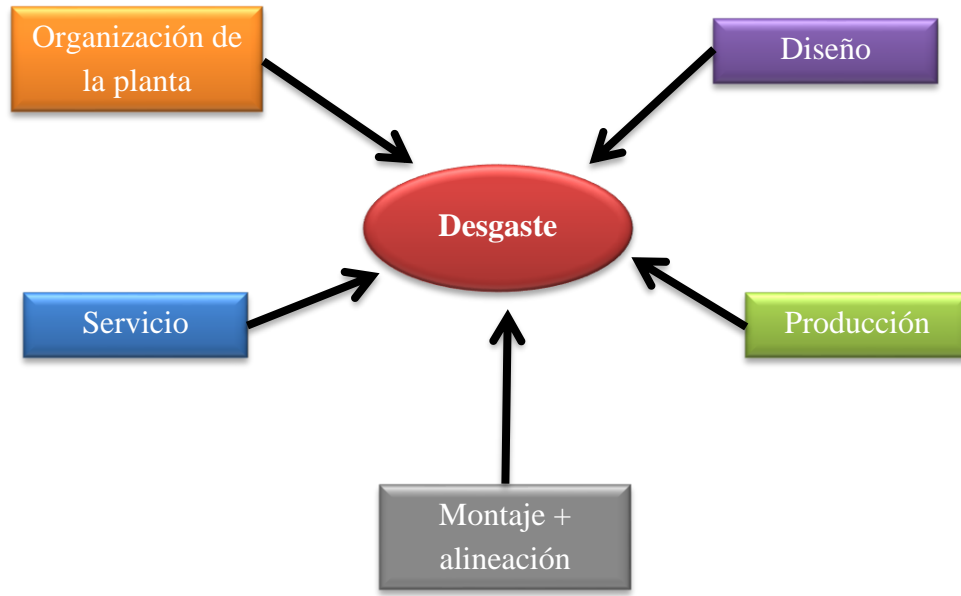
Teniendo en cuenta que la tribología se concentra más en la fricción, su importancia en los diferentes sistemas existentes no solo se debe a su presencia. En muchos casos es necesario reducir la fricción, es decir, entre más baja sea entre las superficies más eficiente será el sistema. Cuando se requiere un fuerte contacto para la transferencia de energía se pueden presentar los diferentes mecanismos de daño que afectan los componentes o la estructura [1].

Para evitar y disminuir considerablemente el desgaste, que es uno de los mecanismos de daño que más impacta en los elementos que conforman un tribosistema, es necesario tener un muy buen diseño y calidad de la pieza, una organización correcta de la planta, una alta precisión dimensional y un entorno limpio. Además de ello, otras variables más relacionadas con el montaje y la operación del equipo o maquinaria intervienen directamente con la vida útil de estos. La alineación exacta, la precisión del montaje, la precaución de no dañar las superficies, el cumplimiento de las instrucciones de funcionamiento y el control de procedimientos de mantenimiento y reparación son algunas de estas variables [1].

En la **Figura 6** se representan los principales factores que propician el desgaste de una pieza durante su servicio:

### **Figura 6**

Factores que influyen en el desgaste de la estructura.



*Nota.* Adaptada de Zum Gahr K. H. (1987). Microstructure and wear of materials [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].

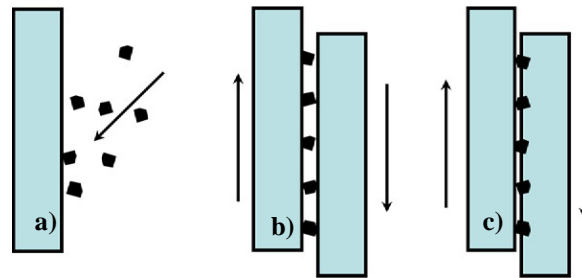
### 1.2.1 Desgaste abrasivo y erosivo por partículas duras

Cuando el material es eliminado o desplazado de una superficie se le conoce como abrasión. Este caso se puede dar desgaste a dos o tres cuerpos como se muestra en la **Figura 7**. Para el caso de dos cuerpos la **Figura 7a** muestra que las partículas están en contacto con una sola superficie, las cuales chocan y/o ruedan a través de dicha superficie. Para la **Figura 7b**, la cual representa un ejemplo de desgaste a tres cuerpos, ilustra partículas libres entre dos superficies de cuerpos más grandes, donde al menos uno de ellos está en movimiento. Un ejemplo más de dos cuerpos lo representa la **Figura 7c**, donde el desgaste ocurre por las protuberancias superficiales de una de estas superficies. Dependiendo del movimiento de los cuerpos se puede tratar de abrasión por rodadura o por deslizamiento [2]. La dureza de cada uno de los cuerpos influye en cómo se va generar el desgaste y el avance de este.

Por las anteriores razones es importante analizar muy detalladamente el ambiente en el que serán expuestos los materiales, pues se deben elegir los más adecuados para así obtener la mayor eficiencia y durabilidad de cada uno de estos.

### Figura 7

Ilustración de **a)** Erosión **b)** Abrasión entre tres cuerpos y **c)** Abrasión entre dos cuerpos.



*Nota.* Adaptada de Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology (Second Edition).

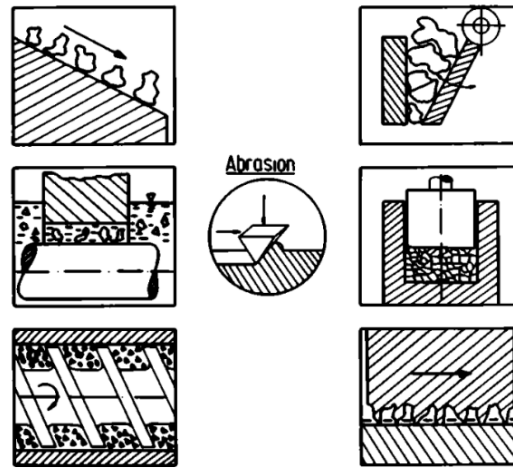
Butterworth-Heinemann.

La procedencia de una partícula dura puede deberse al producto del procesamiento que se esté ejecutando en el momento. Fragmentos de desgaste de las mismas piezas en funcionamiento o la entrada indebida de partículas ajenas al proceso, como suciedad, arena, piedras, partículas de desgaste, etc, son ejemplos claros [2].

En la **Figura 8** se muestran diferentes casos de tribosistemas en los que la abrasión es el mecanismo de desgaste que predomina. Estos casos corresponden a tolvas, sistemas hidráulicos con suciedad, extrusoras, trituradores de rocas, matrices en pulvimetalurgia y canales de transporte. En este mecanismo pueden intervenir diferentes factores físicos en función de los materiales de desgaste y de las condiciones presentes durante el proceso, como el tipo de partículas abrasivas, el ángulo de ataque, temperatura, presión, etc. [2]

**Figura 8**

Sistemas tribológicos amenazados por desgaste abrasivo.



*Nota.* Adaptada de Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology (Second Edition).

Butterworth-Heinemann.

**1.3 Soldadura**

La AWS (American Welding Society) define la soldadura como “una coalescencia localizada de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldadura requeridas, con o sin aplicación de presión o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aportación” [3].

**1.3.1 Soldadura por arco eléctrico**

Para este tipo de proceso no se necesita hacer presión, pues el arco eléctrico producido genera un intenso calor que funde rápidamente el metal base y consume el electrodo, también puede ser no consumible como el de tungsteno [3]. Los procesos en los cuales se usa fundente dejan como residuo escoria, la cual debe ser removida una vez se termina de soldar. Esta se encarga de proteger la soldadura y cuando es aplicada produce vapores que desplazan el aire [3].

Los tipos de soldadura con electrodos no consumibles, que solo funden el metal base se les denomina soldadura autógena.

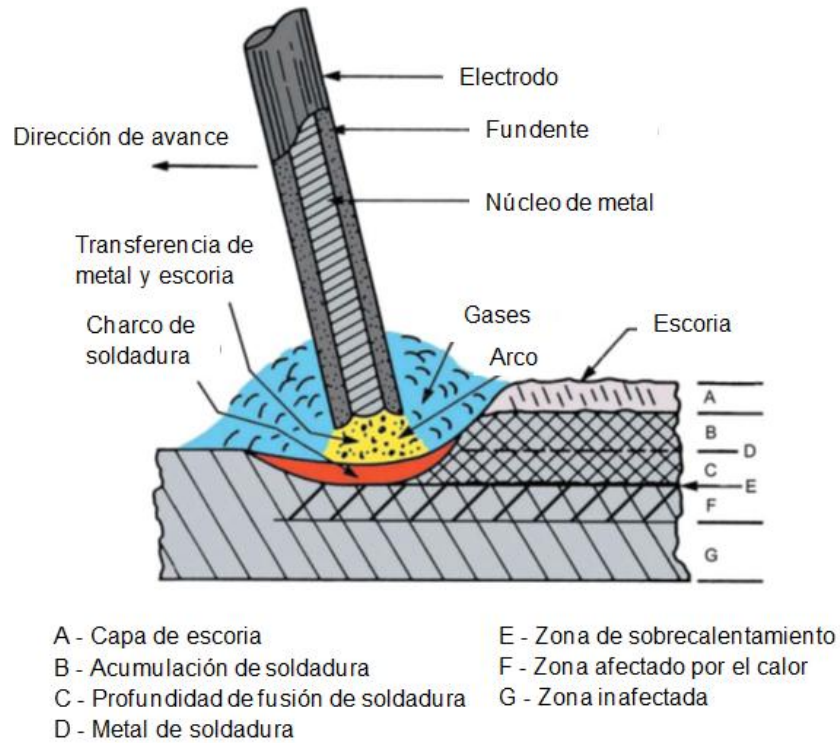
### ***1.3.2 Proceso SMAW***

Shielded Metal Arc Welding (SMAW), que al español se traduce como soldadura de arco metálico protegido, es uno de los procesos más antiguos y que hasta la actualidad se sigue usando con mucha frecuencia, esto gracias a que es un proceso básico y versátil y es usado para soldar metales ferrosos y no ferrosos [3]. El electrodo cuenta con un núcleo de alambre cuya composición depende de los metales que se vayan a soldar. Alrededor de dicho núcleo se encuentra el fundente, que por lo general está hecho de aglutinantes de silicatos y materiales en polvo, como fluoruros, carbonatos, óxidos, aleaciones metálicas y demás [3].

Al cerrar el circuito el flujo de electrones hace que el material del electrodo se funda y transfiera sobre el metal base, el cual también se funde. La **Figura 9** esquematiza como se produce la nube de gas, el modo en que se transfiere el material de aporte y el charco líquido que genera; también muestra las diferentes zonas como la de la escoria, la del metal de aporte, la afectada térmicamente y la inafectada [4].

### **Figura 9**

Representación esquemática del proceso SMAW.



*Nota.* Adaptada de Linnert, G. E., (1994), *Welding Metallurgy*, 4th ed., Miami: American Welding Society, Figure 6.8.

Luego de producido el arco, el metal de aporte comienza a fundirse y a depositarse sobre la pieza trabajada en forma de gotas, generándose así el charco de soldadura, el cual se encarga de llenar el espacio entre las piezas a unir, fijándolas con solidez. Por otro lado, el fundente se funde junto con el metal de aporte, el cual se encarga de proteger el charco de soldadura formando una nube de gas y una capa de escoria. Esta última se encarga de aportar algunos elementos de aleación, limpia la superficie de la soldadura, protege el metal de aporte de los elementos contaminantes de la atmósfera circundante y estabiliza el arco. Una vez se ha solidificado el metal de aporte, la escoria también lo habrá hecho, siendo removida enseguida [6].

El equipo de soldadura ofrece tres tipos de corriente: Corriente alterna (AC), corriente continua de electrodo en negativo (DCEN) y corriente continua de electrodo en positivo (DCEP). Si la corriente a usar es continua, ésta da la opción de usarse con el electrodo en el terminal positivo o negativo, esto también dependiendo de los mismos factores a tener en cuenta a la hora de elegir el tipo de corriente. Las características que ofrece la ubicación del electrodo en cada terminal son las siguientes:

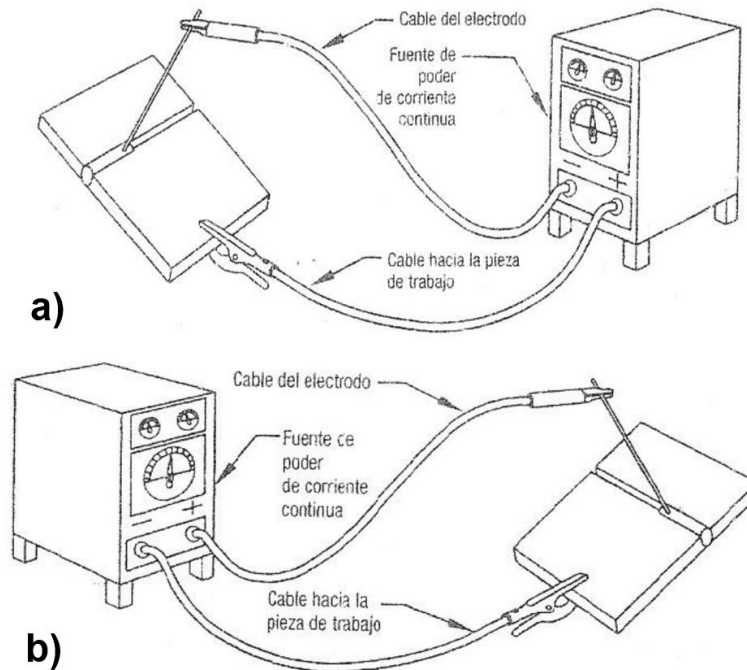
- **Electrodo en positivo:** También llamado en polaridad inversa, este se usa cuando se desea obtener una muy buena penetración en la junta [6].
- **Electrodo en negativo:** También llamado en polaridad directa, es usado cuando se requieren altas tasas de deposición del metal de aporte en la junta con una baja penetración [6].

A continuación, en la **Figura 10** se presenta un esquema de la forma en la que van conectados los diferentes elementos en un equipo de soldadura SMAW con corriente continua.

**Figura 10.**

Esquema de las posiciones del electrodo en el equipo de soldadura SMAW, corriente continua.

**a)** Conexión en polaridad negativa. **b)** conexión en polaridad positiva.



### 1.3.3 Discontinuidades y defectos en el metal base y la soldadura

Inicialmente se debe tener en cuenta que discontinuidades y defectos no son los mismos conceptos y es por ello que a menudo surgen confusiones entre ambos, debido a esto es de suma importancia tener conocimiento de lo que los difiere.

Una discontinuidad está definida como la introducción de una irregularidad en una estructura que originalmente en ausencia de esta sería uniforme y homogénea. Por otro lado, un defecto es una discontinuidad específica, clasificada por su forma, tamaño y procedencia, la cual compromete el funcionamiento de la estructura en servicio. En conclusión, las discontinuidades abarcan generalmente los defectos como tal y un defecto es una discontinuidad de tipo definido.

[9]

Algunas de las discontinuidades que comúnmente se pueden encontrar luego del proceso de soldadura son: fisuras, falta de fusión, falta de penetración, inclusiones (escoria, tungsteno,

otros), porosidad, socavación, solapado, convexidad, sobre espesor de soldadura, salpicadura, laminación, desgarramiento laminar y grietas. [9]

#### 1.4 Aleación de acero al cromo-molibdeno referencia 2048 (sinfines p9 y p15)

Los tornillos sinfín P9 y P15 son fabricados en una aleación de acero al Cromo-Molibdeno referencia 2048. Para los contenidos de Cromo y Molibdeno se tuvieron en cuenta los valores de una aleación SAE 4340 [8]. La composición de la aleación usada fue desarrollada internamente por la empresa proveedora, es por ello que solo se tiene conocimiento de la composición química de estos sinfines.

Por seguridad y privacidad la empresa no provee información como estado de suministro y propiedades del material implementado en la fabricación de los tornillos sinfín P9 y P15.

A continuación, en la **Tabla 1** se presenta la composición química del metal base usado para la fabricación de los tornillos sinfín.

**Tabla 1**

Composición química del acero al cromo – molibdeno referencia 2048.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)
0,4217	0,8523	0,024	0,0186	0,4047	0,7959	0,2041	0,0575

Nota. Adaptado de Industrias AVM S.A., Ficha técnica tornillos sinfín P-9 / P-15. Productos.

<https://www.avm.com.co/productos>

Cuando se necesita una buena soldabilidad en los aceros los niveles de carbono se mantienen bajos debido a que este modifica la microestructura y propiedades del acero [7]. Teniendo en cuenta la cantidad de carbono que posee la aleación, esta pertenece a los aceros de medio carbono. Dichos aceros no son recomendables para soldar gracias a que se forman

precipitados de carburo primarios o secundarios con los elementos aleantes del metal base [15], los cuales fragilizan la zona soldada. Por otro lado, la soldabilidad de los aceros está principalmente determinada por el valor de carbono equivalente (CE) debido a la composición química del material en especial de la concentración de carbono.

### 1.5 Soldadura xuper abratec n6710 xhd

Soldadura caracterizada por sus depósitos con excelente propiedad de resistencia a la abrasión sometidos a altas presiones, alta rata de depósito, fácil aplicación en cualquier posición, soporta impactos moderados y permite obtener un espesor grueso en un solo pase. [21]

Algunas de sus aplicaciones son en baldes de excavadoras, cuchillas topadoras, cadenas de transporte, esquineros, cadenas de transportadores de clinker, martillos, screw feeders, martillos desfibradores de caña, picotes de masas de molinos, etc [21].

La composición química de esta soldadura se presenta a continuación en la **Tabla 2**:

**Tabla 2**

Composición de la soldadura N6710 XHD [22]

%C	%Mn	%Si	%Cr	%B
1,15	13,2	0,56	45,0	1

Nota. Adaptado de J. NAPIÓRKOWSKI, M. LEMECHA, P. SZCZYGLAK. ANALIZA ZUŻYWANIA WARSTW WIERZCHNICH W NATURALNYCH WARUNKACH GLEBOWYCH. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, ul. Michała Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Polska.

### 1.5.1 Procedimiento de aplicación

Se debe limpiar adecuadamente el área soldar y eliminar el metal fatigado. Si es necesario se recomienda utilizar una aleación de colchón. Mantenga un arco corto o medio. Para terminado únicamente con piedra esmeril [21]. A continuación, en la **Tabla 3** se presentan algunos parámetros operativos y técnicos relacionados con el electrodo.

**Tabla 3**

Amperajes recomendados para la aplicación de la soldadura [21].

AMPERAJES RECOMENDADOS				DATOS TÉCNICOS
Diámetro de Electrodo		1/8"	5/32"	
Corriente (A)	Rango A	150 - 170	190 - 250	Dureza: 63 – 67 Rc
	Rango B	90 - 130	140 - 190	

Nota. Adaptado de Ficha Técnica Xuper Abratec N6710 XHD®. Castolin Eutectic. Sarger Los Especialistas en Soldadura.

### 1.6 Proceso de prensado para la extracción de aceite rojo

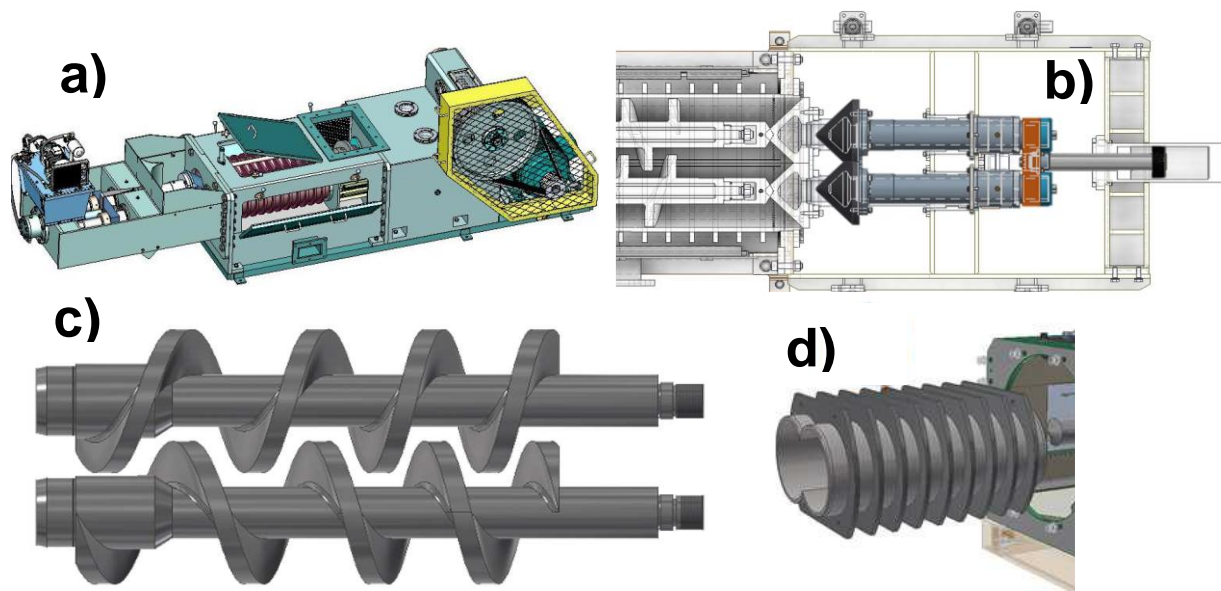
Actualmente en la empresa palmas del cesar se encuentran en funcionamiento dos líneas de extracción, ambas con distinta capacidad. Cada Línea posee tres prensas hidráulicas (**Figura 11a**) que trabajan con un juego de dos tornillos sinfín. Los componentes que conforman cada prensa son similares, la única variación es el tamaño debido a su diferencia en capacidad. Línea 1 trabaja con sinfines P9 los cuales tienen una capacidad de procesamiento de fruto de 9 ton/hora, dando un total de 27 TON/hora. Línea 2 trabaja con sinfines P15 con capacidad de procesamiento de 15 TON/hora, dando un total de 45 TON/hora. La extracción del aceite se da por el prensado del fruto entre los conos, los tornillos sinfín y la canasta (**Figura 11b, Figura**

11c y Figura 11d respectivamente). La canasta en la cual se albergan los sinfines posee unos pequeños orificios por donde el aceite poco a poco va saliendo.

A continuación, se presentan las imágenes de los elementos principales mencionados anteriormente:

**Figura 11**

Prensas P9 y P15.



*Nota.* Tomado de Manual PRENSAS P9. Industrias AVM S.A. Santamaría Latorre y cia s. en c.

Antes de entrar al prensado el fruto pasa por un proceso de digestión. El fruto digerido y caliente pasa a través de una tolva de descarga desde el digestor hasta la prensa, donde tiene un primer drenaje de aceite crudo a través de coladores. La temperatura de la fruta debe oscilar entre 85°C y 95°C para que el proceso de extracción se realice de manera eficiente. El fruto es transportado por los sinfines hacia la descarga de la prensa (conos de prensado), donde es sometido a un prensado en el cual se extrae gran parte del aceite que contiene el fruto. El aceite

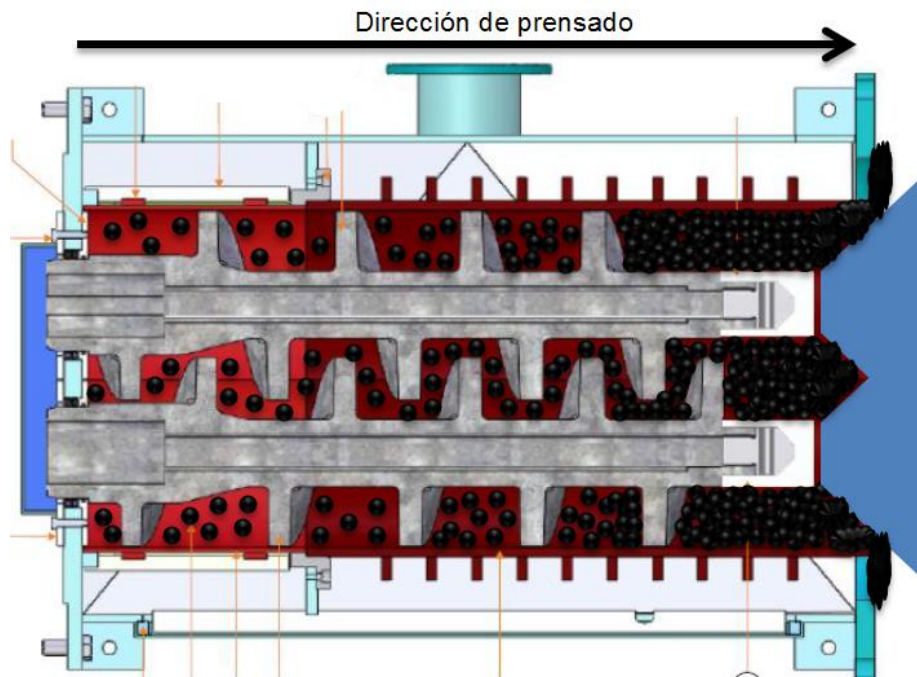
escapa por las perforaciones que posee la canasta de prensado, siendo evacuado con la ayuda de la inyección de agua caliente. Finalmente pasa al tanque de licor de prensa y seguidamente al proceso de clarificación donde se obtiene el aceite crudo puro de alta calidad. [10]

Teniendo en cuenta el proceso de prensado, la parte final de los sinfines es la que sufre un mayor desgaste con respecto a la inicial, la cual se encarga principalmente de transportar el fruto y la final de ejercer mayor presión.

A continuación, en la **Figura 12** se presenta un esquema de como el fruto pasa y es prensado a través de los sinfines hasta los conos:

### Figura 12

Vista superior de la prensa



*Nota.* Adaptado de Industrias AVM S.A. PALM-OIL, PRENSA P15 CON REDUCTOR EXTERNO Y SISTEMA DE CONTRAPRESION. Sobre la empresa.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar los fenómenos tribológicos que sufre un tornillo sinfín durante el proceso de prensado de corozo, para posteriormente diseñar un WPS para su adecuada reconstrucción por soldadura.

### **2.2 Objetivos específicos**

Analizar cada uno de los factores involucrados en el deterioro de la pieza desde un punto de vista tribológico.

Definir los diferentes parámetros y aspectos adecuados de la soldadura para la reconstrucción del tornillo sinfín.

Diseñar el WPS para la aplicación de la soldadura usada como material de reconstrucción del tornillo sinfín.

### 3. Metodología

En la **Figura 13** se representa la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto.

**Figura 13**

Diagrama de flujo de la metodología del proyecto.



La descripción de cada uno de los pasos seguidos para la realización del proyecto se muestra a continuación:

### **3.1 Revisión bibliográfica**

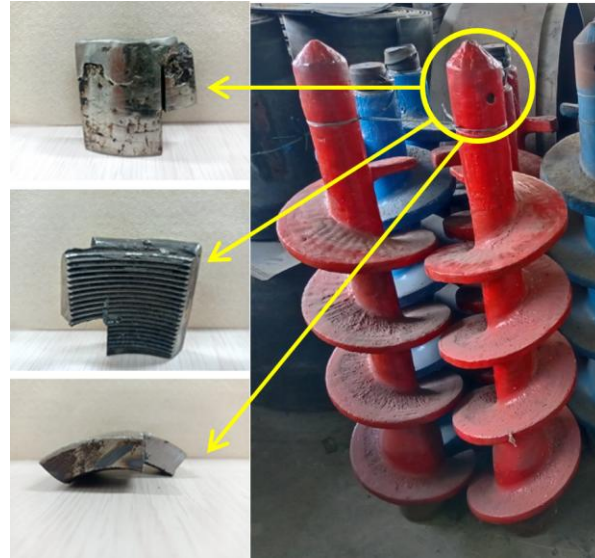
Se realizó una búsqueda exhaustiva de cada uno de los temas relacionados con la resolución de la problemática presente en la empresa palmas del cesar. Se tomaron como base para el análisis y el desarrollo del proyecto datos e información de libros, artículos y demás fuentes confiables. Adicionalmente se tuvieron en cuenta los conocimientos, información y recomendaciones por parte del personal de la empresa.

### **3.2 Caracterización de la reconstrucción usada actualmente**

Actualmente en la empresa palmas del cesar está siendo usado el proceso de soldadura SMAW para reconstruir los tornillos sinfín. Las primeras capas de soldadura aplicadas sobre el material base, el cual es una aleación de acero al Cromo-Molibdeno referencia 2048 [8], corresponden a las de relleno, estas son de electrodos E7018. Para la capa superficial, quien es la que se necesita que posea una dureza suficiente para soportar las condiciones a las que están expuestos los sinfines sin desgastarse rápidamente, se utilizan electrodos Xuper Abratec N6710. En la **Figura 14** se muestra la parte del tornillo sinfín de donde se extrajeron las muestras usadas para la caracterización del metal base y la soldadura. Se tiene en cuenta que dichos componentes son los mismos tanto para los sinfines P9 como para los P15.

#### **Figura 14**

Parte del sinfín de donde se extrajeron las diferentes muestras para analizar.

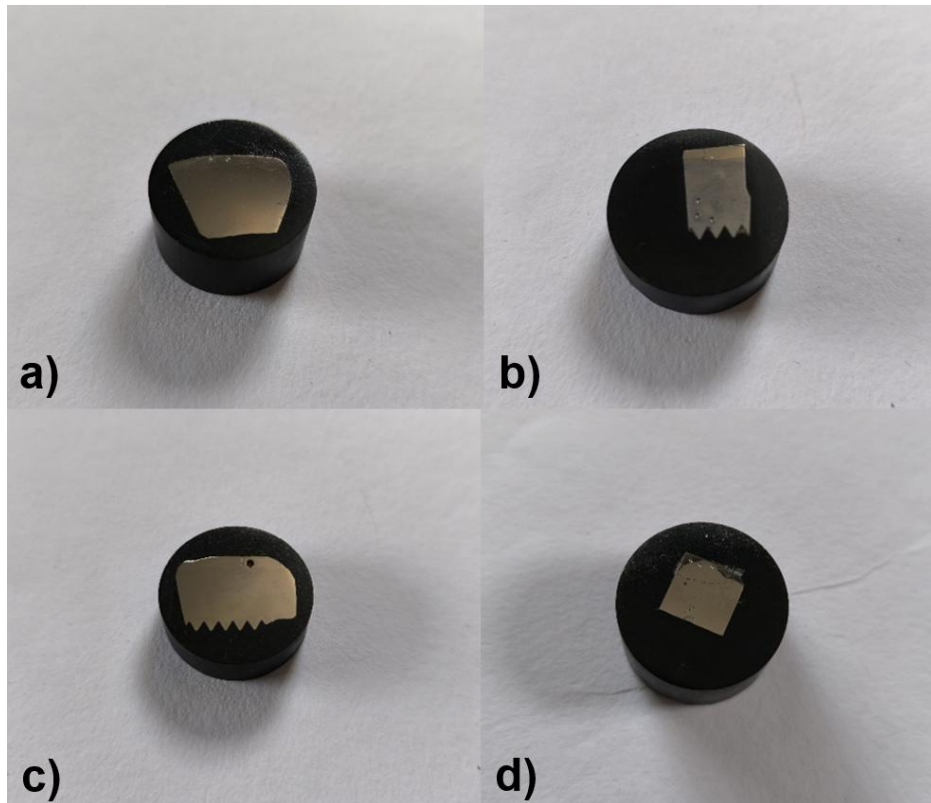


Para el análisis se extrajeron las muestras de diferentes secciones de la reconstrucción (Transversal y superficial) para la realización de ensayos de dureza, inspección de discontinuidades e inclusiones en el metal base y la soldadura.

Una vez se obtuvieron las piezas se siguió la norma ASTM E3 para la preparación y análisis de las muestras metalográficas. La toma de las micrografías sin ataque químico para el análisis de inclusiones no metálicas se realizó usando las instalaciones y equipos del laboratorio de metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Industrial de Santander. Para el análisis de la microestructura del metal base y la soldadura se usó el microscopio confocal perteneciente al grupo de investigación GIMAT. Finalmente, los ensayos de dureza (HRC) se realizaron con el durómetro manual de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales usando una carga de 150Kgf. Se hicieron 3 ensayos a 3 diferentes probetas del metal base como se muestra en la **Figura 15a, 15b y 15c** y 3 ensayos a una probeta con la soldadura usada como reconstrucción como se observa en la **Figura 15d**.

**Figura 15**

Probetas usadas para la toma de durezas.

**3.3 Análisis tribológico**

Para el análisis del desgaste de los sinfines se observó directamente el proceso de prensado del fruto, se tomó evidencia y se obtuvo información técnica de los diferentes componentes implicados. También se usaron fuentes bibliográficas como libros, artículos y demás fuentes confiables. Una vez obtenida la información necesaria se relacionó la problemática actual en la empresa con los conceptos involucrados sobre tribología para el desarrollo del análisis.

### **3.4 Selección de los parámetros y aspectos relevantes en la aplicación de la soldadura**

Esta sección se desarrolló tomando en cuenta los parámetros actuales utilizados por los soldadores en la reconstrucción de los sinfines y la bibliografía encontrada. Se añadieron las variables faltantes en el proceso de soldadura aplicado actualmente y se ajustaron algunas de las ya usadas.

Inicialmente sólo se ajustaron los parámetros del procedimiento de soldadura y se incluyeron los pasos de precalentamiento y poscalentamiento, sin embargo esto no dio un buen resultado ya que en la capa final de soldadura seguían apareciendo una gran cantidad de grietas. Se hicieron varios cambios en el procedimiento pero el problema seguía persistiendo. Finalmente se optó por usar un enmantequillado en el proceso de reconstrucción, dando solución a dicho agrietamiento.

### **3.5 Diseño del WPS y PQR**

Se recopilaron los datos de la sección anterior en un documento organizado para una mejor comprensión y orden en el momento de aplicar el procedimiento específico de soldadura (WPS). Para la calificación del mismo fue necesario el diseño de un PQR en el cual se añadieron los diferentes ensayos realizados, tanto no destructivos como inspección visual y destructivos como metalografía y ensayos de dureza.

### **3.6 Aplicación del PQR en el material afectado para la calificación del WPS**

Una vez diseñado el PQR se precedió a ser aplicado sobre una de las piezas del tornillo sinfín sometida a las mismas condiciones. Luego de observar que se obtuvo una mejora significativa en el estado de la reconstrucción se aprobó el WPS.

### 3.7 Caracterización de la reconstrucción sugerida

Luego de aplicada la reconstrucción se extrajeron dos muestras de esta para la debida caracterización, una superficial correspondiente a la soldadura de “dureza” N6710 y una transversal para análisis de las diferentes zonas de transición de cada soldadura y metal base.

## 4. Resultados

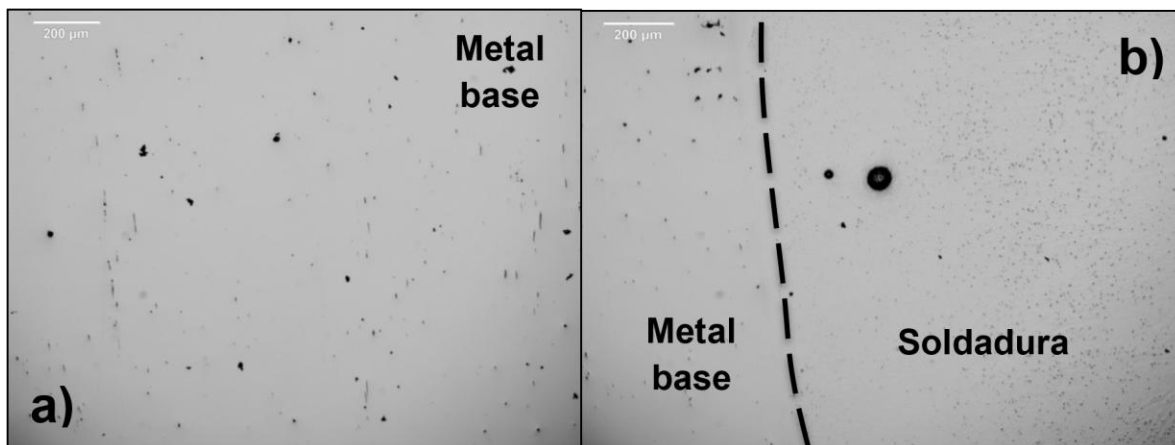
### 4.1 Caracterización de la reconstrucción usada actualmente

#### 4.1.1 Determinación de inclusiones no metálicas en el metal base y la soldadura

Las **Figuras 16** y **18** muestran las micrografías tomadas para la determinación de inclusiones no metálicas en la reconstrucción de los sinfines P9 y P15.

#### Figura 16

a) Micrografía metal base (100x) b) Micrografía interface metal base – soldadura (100x)

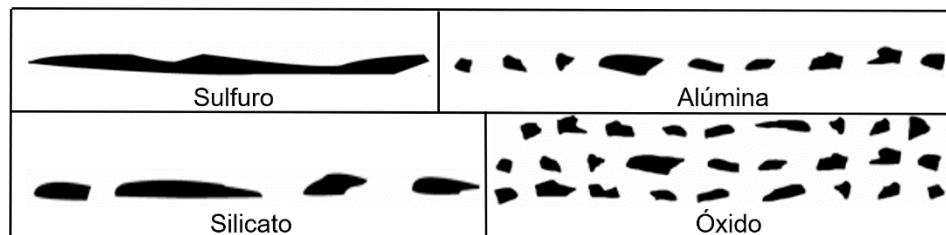


En la **Figura 16b** se observa fácilmente la transición de la soldadura al metal base gracias a la cantidad, forma y homogeneidad de los óxidos presentes en cada material. La zona correspondiente a la soldadura no presenta ningún otro tipo de inclusiones aparte de los óxidos, los cuales se encuentran en nivel 5 de tipo fino. Por otro lado, la **Figura 16a** muestra los diferentes tipos de inclusiones que posee el metal base.

Para el análisis se siguió la norma E45-18A [20]. Dicha norma clasifica los cuatro tipos de inclusiones no metálicas por su morfología como se muestra en la **Figura 17**.

### Figura 17

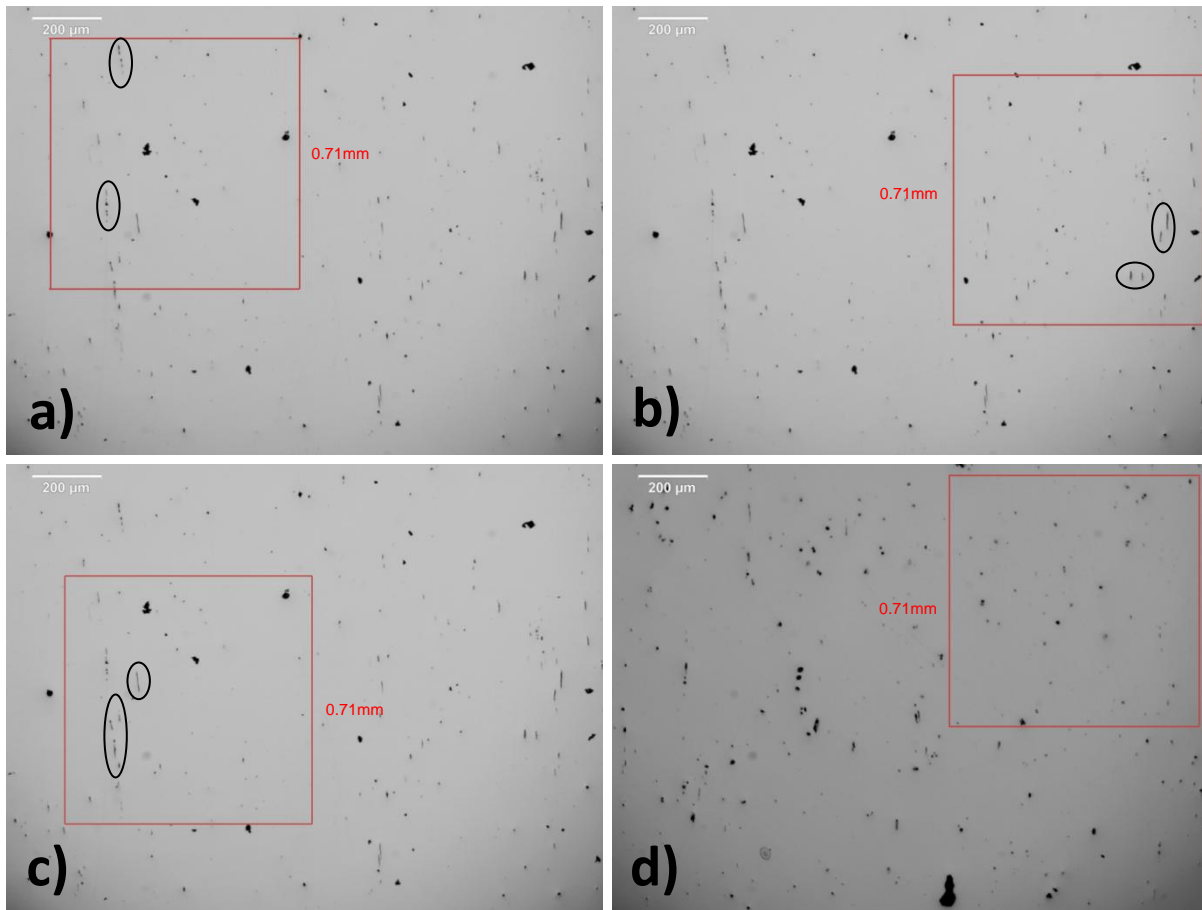
Morfología de las diferentes inclusiones no metálicas.



*Nota.* Adaptado de ASTM E45-18a. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.

### Figura 18

Áreas para la determinación del nivel de severidad de los tipos de inclusiones no metálicas. **a)** Alúmina **b)** Sulfuros **c)** Silicatos **d)** Óxidos



Los óvalos en la **Figura 18a** encierran inclusiones de alúmina las cuales se caracterizan por ser puntos continuos. En la **Figura 18b** se señalan sulfuros, estos poseen forma alargada continua y relativamente gruesos. Se puede apreciar que en la **Figura 18c** se encuentran silicatos, los cuales son pequeños puntos alargados continuos. Por último, la **Figura 18d** encierra óxidos, se caracterizan por ser puntos dispersos por todo el material.

La presencia de inclusiones no metálicas en los aceros se debe a varios factores relacionados con el proceso de producción y la composición química del material. [24]

Estas inclusiones pueden ser resultantes de:

- **Materias Primas:** Las impurezas en los materiales de partida, como mineral de hierro y coque, pueden introducir elementos no metálicos. [24]

- **Reacciones Químicas:** Durante el proceso de fusión y refinado, pueden formarse compuestos no metálicos a partir de reacciones entre elementos presentes en el acero y otros aditivos o contaminantes. [24]
- **Condiciones de Procesamiento:** La temperatura, el tiempo de permanencia y la atmósfera del horno pueden influir en la formación de inclusiones. [24]
- **Tratamientos de Refinado:** Los procesos de desulfuración y desoxidación pueden no eliminar completamente las impurezas, dejando inclusiones en el producto final. [24]

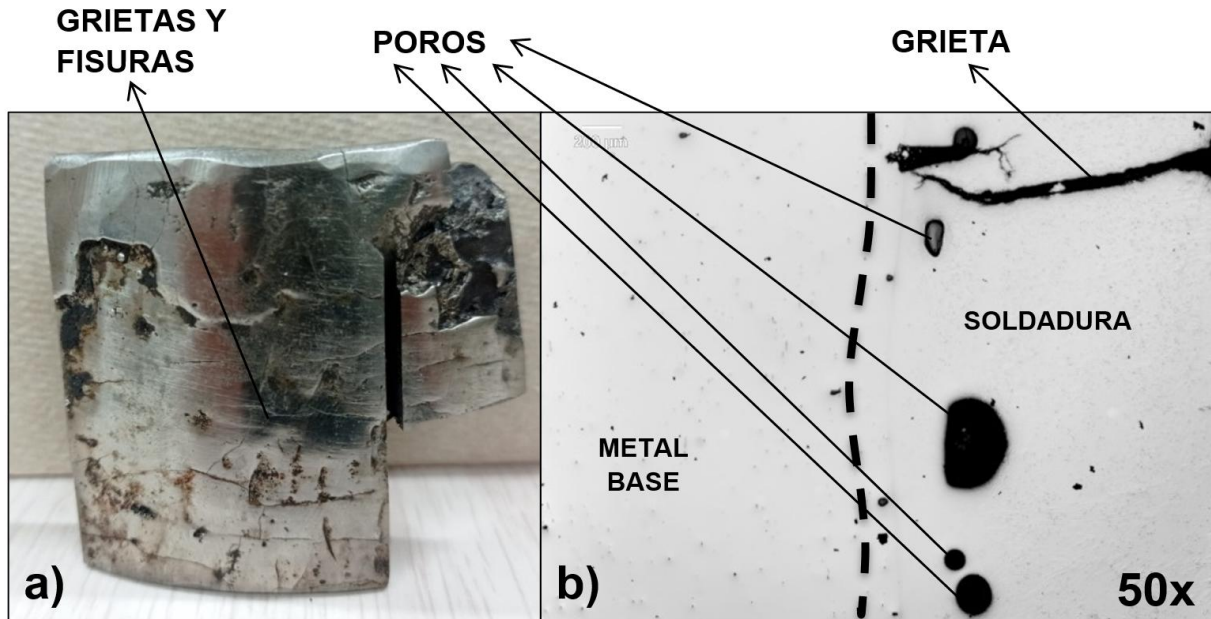
Se logró identificar un número considerable de inclusiones en el metal base, lo cual influye negativamente en las propiedades mecánicas y la durabilidad del acero, por lo que su control es crucial en la producción de un acero de alta calidad.

#### ***4.1.2 Defectos presentes en la reconstrucción***

La **Figura 19** muestra los diferentes defectos presentados en la reconstrucción aplicada a los sinfines.

#### **Figura 19**

**a)** Defectos presentes en la reconstrucción. **b)** imagen transversal



La **Figura 19a** muestra los macrodefectos que se presentan en la soldadura, observándose una gran cantidad de grietas, fisuras y desprendimiento de material. Los operarios encargados de la reconstrucción mencionan que dichas grietas aparecen durante el enfriamiento de la soldadura. Esto es debido a la contracción a alta temperatura que sufre el metal, generándose esfuerzos que se acumulan a tal grado de fracturar la soldadura, también llamados esfuerzos térmicos. En la **Figura 19b** se observa como la longitud de la grieta afecta todo el espesor de la soldadura. Un defecto más que se logra apreciar con claridad incluso sin necesidad de microscopio, es la presencia de poros de gran tamaño bajo la superficie de la soldadura como se logra apreciar en las **Figuras 19b**.

Los problemas presentados son principalmente causados por esfuerzos térmicos, también por la falta de preparación del metal por medio de tratamientos térmicos de precalentamiento y el postcalentamiento. El precalentamiento se encarga de eliminar la humedad, siendo esta la causa principal de la aparición de poros en la soldadura, también prepara la superficie para una mejor

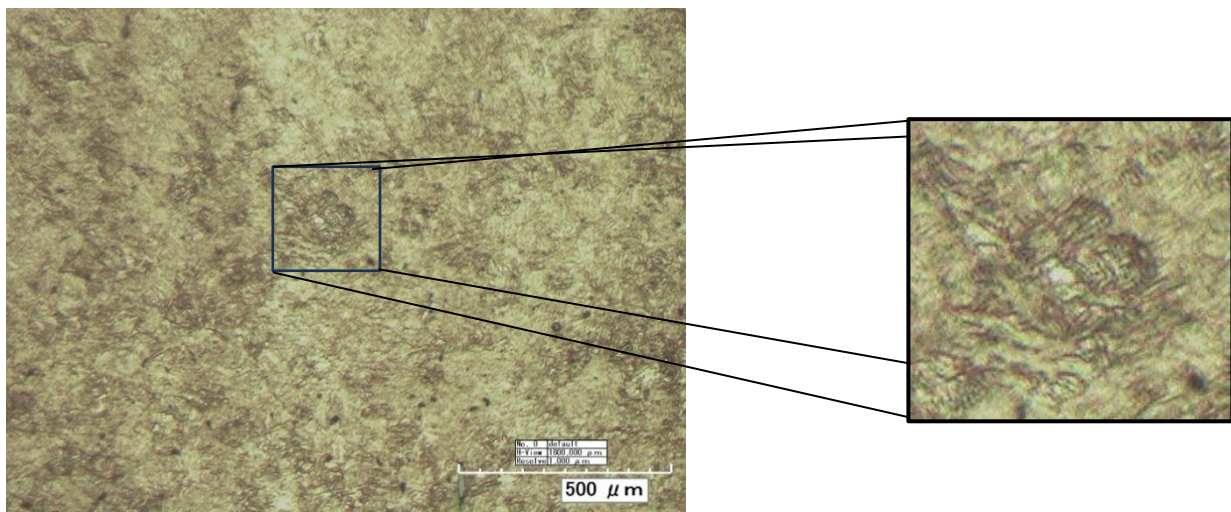
adherencia de la soldadura al metal base. Por otro lado, el postcalentamiento contribuye al alivio de tensiones de la soldadura aplicada, evitando la aparición y propagación de grietas.

#### 4.1.3 Microestructura y dureza de la reconstrucción (met. base -soldadura)

**4.1.3.1 Microestructura y dureza metal base.** A continuación, se presenta la micrografía del metal base donde se pueden apreciar las diferentes fases presentes en éste.

#### Figura 20

Micrografía metal base.



La **Figura 20** muestra la microestructura característica de un acero bonificado, donde la martensita presente se encuentra difundida y la presencia de ferrita es más clara en la matriz.

La martensita se logra gracias al enfriamiento rápido de ciertos aceros, también conocido como temple. Esta transformación tiene su origen a partir de la austenita, la cual es una fase de alta temperatura del acero. La martensita es reconocida por su alta dureza y resistencia, lo que la hace de gran utilidad en la ingeniería de materiales, en especial en la fabricación de herramientas

y componentes que requieren alta resistencia al desgaste como en este caso. Su proceso de transformación se caracteriza por un cambio de fase que no implica difusión atómica, lo que permite que la estructura cristalina cambie rápidamente, atrapando carbono en solución sólida. Se identifica gracias a que esta parece un gran cúmulo de agujas negras. [24]

Por otro lado, la ferrita siendo una de las fases más importantes del acero posee un bajo contenido de carbono, lo que quiere decir que esta fase es blanda y dúctil, aportando a la tenacidad y a la deformabilidad del material. Ésta se forma a temperaturas por debajo de la temperatura de transformación austenítica. La distribución y cantidad de ferrita en un acero afectan significativamente sus propiedades mecánicas. En tratamientos térmicos como el recocido, la ferrita puede ser estabilizada o modificada para optimizar las propiedades del acero para aplicaciones específicas. Es por ello que el control de esta microestructura es crucial para lograr cierto equilibrio entre resistencia y ductilidad. En este caso se aprecia en la matriz del metal. [24]

La combinación de propiedades de la martensita y la ferrita es lo que hace tan especial a este acero (metal base) para su aplicación, ya que debe someterse a un alto nivel de desgaste y fatiga, siendo esto contrarrestado por la dureza de la martensita, la ductilidad de la ferrita y su propiedad en común, la resistencia.

En seguida se muestra la tabla con las durezas obtenidas de cada una de las probetas:

**Tabla 4**

Dureza metal base en HRC.

	DUREZA HRC		
	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3
PROBETA 1	28	29	28
PROBETA 2	29	29	30
PROBETA 3	30	28	29

Para comprender los resultados de la **Tabla 4** se debe tener en cuenta que microestructuralmente los elementos de aleación se distribuyen en una fase la cual es la ferrita y un elemento, siendo este el carbono para formar carburos primarios o secundarios. La tendencia de los elementos de aleación a formar estos carburos sólo se dará si hay gran cantidad de carbono, de lo contrario estos se disuelven en la ferrita. Cualquier elemento disuelto en la ferrita aumenta su dureza y su resistencia de acuerdo a los principios generales del endurecimiento por solución sólida. También mejoran otras propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, tenacidad a cualquier dureza, propiedades magnéticas, templabilidad y propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas [16].

El carbono tiene un efecto importante en las propiedades del acero, ya que es el principal elemento endurecedor de todos los aceros gracias a su propensión a segregarse. Por otro lado, el cromo se suele añadir al acero para aumentar la resistencia a la corrosión, aumentar la templabilidad, mejorar la resistencia a altas temperaturas o para mejorar la resistencia a la abrasión en composiciones con alto contenido en carbono, también se caracteriza por ser un fuerte formador de carburos. La influencia del molibdeno está en que este puede inducir un endurecimiento secundario durante el revenido y mejorar la resistencia a la fluencia en los aceros de baja aleación a temperaturas elevadas, además de ello tiende a evitar la fragilización durante el revenido [7].

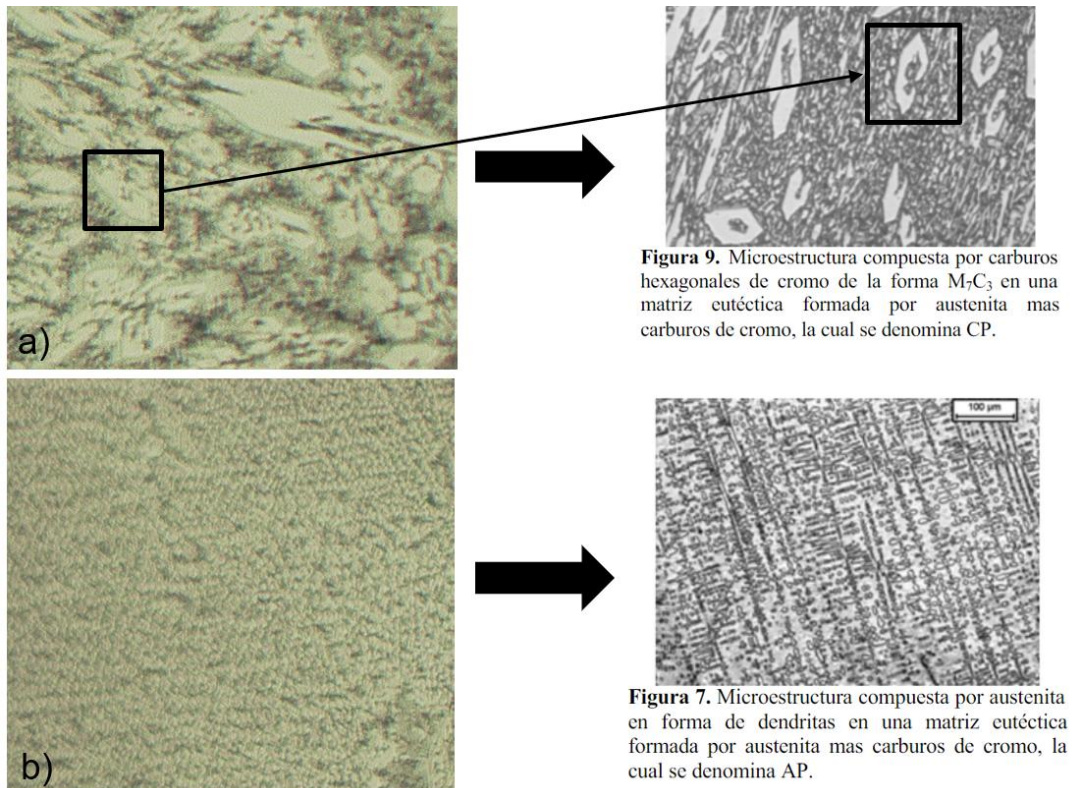
Los elementos de aleación se encargan de ralentizar la velocidad de suavizamiento de la dureza del material durante el revenido, es por ello que estos aceros aleados necesitan de una temperatura mayor de revenido para obtener una dureza dada. Algunos elementos que permanecen disueltos en la ferrita tienen poco efecto sobre el endurecimiento del acero. Sin

embargo, los formadores de carburos tienen un efecto notable durante este tratamiento térmico, aumentando la dureza si se incrementa la temperatura de revenido [16].

**4.1.3.2 Microestructura y dureza de la soldadura.** En la Figura 21 se hace una comparación entre las micrografías obtenidas de la soldadura usada como reconstrucción y las micrografías reportadas en la literatura a través del trabajo “Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura” [19].

### Figura 21

Comparaciones de la microestructura de la soldadura (última capa)



*Nota.* Tomado de MonsalveGil, H. I., MenaHerrera, D. A., & GiraldoBarrada, J. E. (2004). Efecto del amperaje en las propiedades derecubrimientos duros resistentes a laabrasión aplicados

por soldadura. Dyna, 71(144),151-163. ISSN: 0012-7353. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614416> (Microestructura 6710)

Se logra apreciar con claridad la similitud entre las dos diferentes microestructuras que identifican al material usado como reconstrucción. La **Figura 21a** muestra una gran cantidad de carburos hexagonales de cromo, así como la **Figura 21b** enseña la austenita en formas de dendritas. Un dato adicional que respalda esta comparación es la composición del electrodo de la soldadura que se usó en el artículo, la cual posee 33.5% de cromo y 3.8% de carbono, siendo los elementos principales para la formación de carburos hexagonales de cromo. Si se observa la **Tabla 2** se puede apreciar que la soldadura N6710 XHD también posee un alto porcentaje en dichos elementos.

A continuación, se muestra la tabla con las durezas obtenidas de la probeta con la soldadura usada como reconstrucción:

**Tabla 5**

Dureza de la soldadura N6710 en HRC.

# MEDIDAS	HRC
1	62
2	62
3	60

Haciendo un enfoque en su dureza, se encuentra que esta es alta comparada con la del metal base gracias a su composición química, lo cual hace que se forme una gran cantidad de carburos de cromo. Por otro lado, las tensiones acumuladas encargadas de fracturar la soldadura también aportan a esta propiedad de dureza.

## 4.2 Análisis tribológico

El tribosistema presente en el proceso de prensado es a tres cuerpos, donde el fruto y demás cuerpos extraños hacen la función de partículas duras libres y los sinfines junto con el cono de prensado las superficies de contacto. Para este caso ambos sinfines están en constante movimiento.

### Figura 22

Sinfín reconstruido desgastado.



Como se logra apreciar en la **Figura 22**, el deterioro en los helicoides se da por el desprendimiento de trozos de la soldadura usada como reconstrucción y el desgaste de la misma debido a partículas duras y al ambiente al que son sometidos. Se observa que una vez desprendida la soldadura, la rapidez con que el metal base se desgasta es mucho mayor a la de la reconstrucción gracias a su diferencia en propiedades mecánicas.

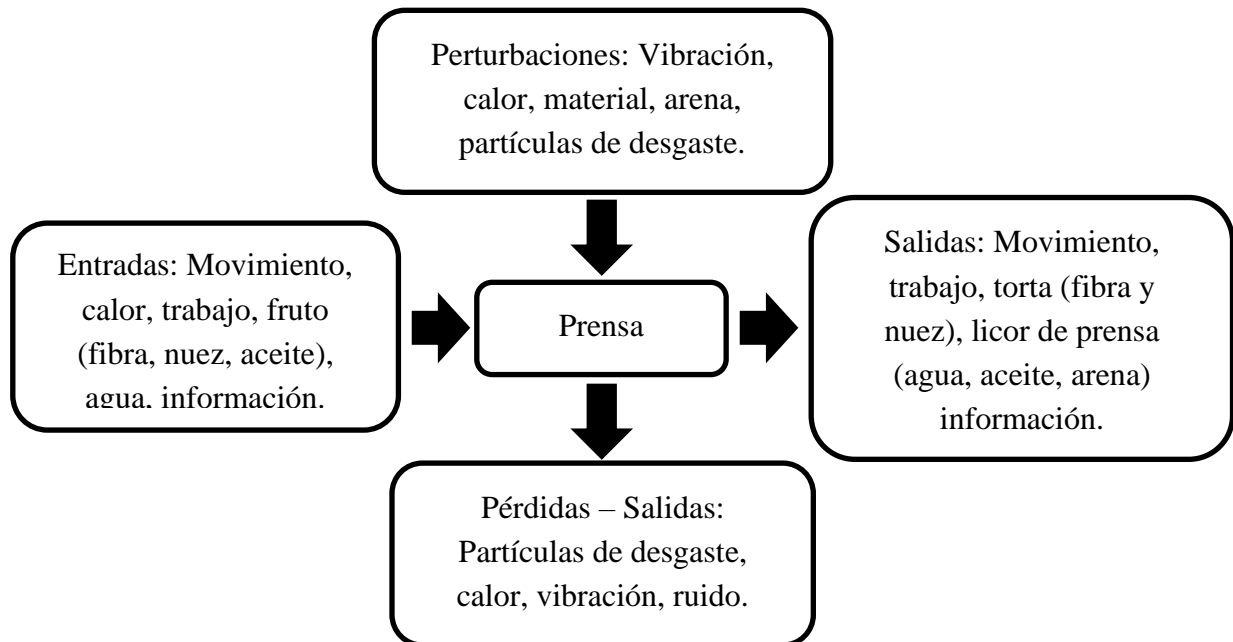
Un factor importante que influye en el alto desgaste de los sinfines son las altas presiones con las que se trabaja internamente, llegando a alcanzar 625 psi entre la canasta, los sinfines y

los conos de prensado. El fruto es blando al ser fibroso y haber pasado por un proceso de digestión, pero la nuez que trae internamente posee una cáscara bastante dura que influye en el desgaste de los sinfines. Por otro lado, las partículas desprendidas de los sinfines por el desgaste producido también contribuyen al deterioro de estos y más cuando han sido reconstruidos, pues se desprenden trozos de soldadura relativamente grandes. Adicionalmente, un agente externo como la arena que trae el fruto desde su cosecha interviene gravemente en el daño producido a los sinfines.

En la **Figura 23**, se muestra un esquema de la composición del sistema tribológico del proceso de prensado.

### Figura 23

Composición del tribo-sistema de las prensas P9 y P15.



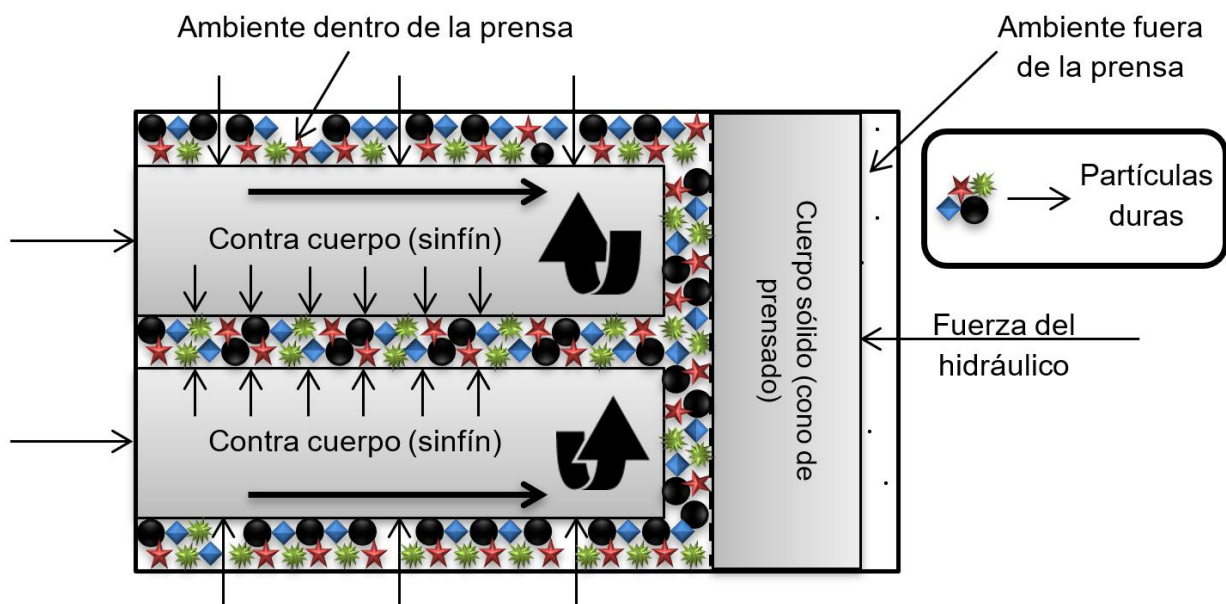
La prensa aprovecha entradas como movimiento, trabajo y calor para el prensado del fruto, mientras el sistema y sus componentes se ven perturbados por factores como vibración,

calor, arena y partículas de desgaste. Las salidas del proceso están conformadas principalmente por la torta, la cual es el residuo del prensado del fruto, constituido por la fibra y la nuez. Una salida más es el licor de prensa, el cual lo compone el aceite extraído del fruto, arena y el agua suministrada al sistema, también se tiene movimiento, trabajo e información. Durante el proceso se generan pérdidas como partículas de desgaste de los sinfines, el calor suministrado, vibración y ruido.

A continuación, la **Figura 24** presenta la forma simplificada del tribo-sistema correspondiente al proceso de prensado según la norma DIN 50320 [5].

**Figura 24**

Esquema simplificado del tribo-sistema.



#### ***4.2.1 Definición de elementos y sus características***

Teniendo en cuenta la información de la **Figura 24**, se definirán cada uno de los elementos que componen el sistema tribológico. Cabe recalcar que el proceso de desgaste en este caso es lubricado debido al agua y aceite del fruto.

- **Contra cuerpo:** Este se caracteriza por ser el componente del sistema tribológico con mayor complejidad tecnológica, mayores dimensiones y mayor dureza [13]. Los dos sinfines cumplen con las anteriores características y es por ello que ejecutan la función de contra cuerpo en este sistema tribológico. La dureza que poseen una vez reconstruidos es de hasta 60 HRC y gracias a su geometría la convierten en la pieza más compleja del sistema tribológico.
- **Cuerpo sólido:** Representa el elemento conocido como material antifricción y/o friccionante [13]. El nivel de desgaste de los conos de prensado comparado con el de los sinfines es mucho menor, esto debido a factores como el tipo de movimiento y su geometría. Dichos conos son una pieza sólida que sólo se desplazan horizontalmente con la función de mantener constante la presión interna de la prensa.
- **Elementos interfaciales:** En un sistema tribológico dichos elementos pueden llegar a ser lubricantes, suciedad y sólidos, líquidos, gases e incluso una combinación de estos, los cuales generalmente son la razón principal del desgaste. En el proceso de prensado los elementos interfaciales que intervienen son las partículas de desgaste, tanto del metal base como de la soldadura. También el fruto el cual está compuesto por fibra y una nuez con cascara dura, impurezas como arena y lubricante que en este caso sería el licor de prensa, el cual está compuesto por el aceite extraído y agua que se añade al proceso.

Todos estos elementos bajo las condiciones de trabajo a las cuales están sometidos se convierten en partículas altamente abrasivas.

- **Ambiente:** Este elemento del sistema tribológico posee importantes características y efectos que contribuyen directamente en el proceso de desgaste. El ambiente en el proceso de prensado se caracteriza por ser agresivo, pues se manejan presiones de hasta 625 psi y temperaturas alrededor de los 100 °C.

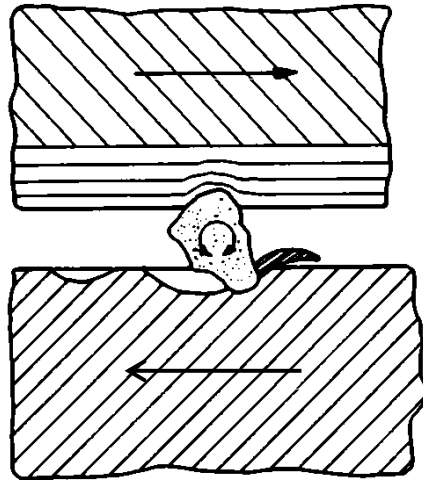
#### **4.2.2 Interacción entre elementos**

Cada uno de los cuatro elementos presentes interactúan simultáneamente entre sí, aportando directamente al deterioro de cada una de las piezas del sistema tribológico. Empezando por el ambiente, éste potencia el poder abrasivo de cada uno de los elementos interfaciales gracias a su alta presión y su temperatura de trabajo. Los contracuerpos y el cuerpo sólido del sistema empiezan a sufrir desgaste abrasivo debido a las partículas duras como se muestra en la **Figura 25**. Los contracuerpos se deterioran con mayor velocidad gracias a la dinámica de su movimiento, el cual es sobre su propio eje en diferente sentido con respecto a cada uno como se observa en la **Figura 24**.

Por otro lado, el desgaste por fatiga también es inevitable, ya que se presenta por las fuertes vibraciones producidas continuamente durante el proceso de prensado y la carga acumulativa por el fuerte contacto.

#### **Figura 25**

Abrasión a tres cuerpos.



*Nota.* Adaptado de Zum Gahr K. H. (1987). Microstructure and wear of materials [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].

Teniendo en cuenta las condiciones y fenómenos mencionados anteriormente, el material con el que son fabricados los sinfines debe poseer ciertas propiedades que le ayuden a cumplir su función de la manera más óptima, las cuales son:

- Resistencia mecánica.
- Resistencia a la abrasión.
- Dureza superficial.
- Resistencia a la corrosión.

La resistencia mecánica se encarga de darle la capacidad al material de soportar las diferentes fuerzas aplicadas sobre el sinfín sin romperse, las cuales son ejercidas en todas direcciones debido a la presión interna con la que se trabaja en la prensa. La resistencia a la abrasión y la dureza superficial contrarrestan la agresividad del desgaste debido a los elementos interfaciales. Por último, los sinfines al estar sometidos a un continuo desgaste durante su trabajo, estos no presentan corrosión. Sin embargo, cuando son retirados para su reconstrucción

quedan expuestos a la intemperie por cierto tiempo, es por ello que la resistencia a la corrosión en dicho tiempo juega un papel importante. Los contenidos de carbono, cromo y molibdeno en la aleación ayudan a proveer al material de las propiedades anteriormente mencionadas.

### 4.3 Selección de los parámetros y aspectos relevantes en la aplicación de la soldadura

#### 4.3.1 Pre calentamiento y post calentamiento

Para evitar problemas de fragilización, agrietamiento y lograr reducir las tensiones, es necesario tomar en cuenta tratamientos térmicos superficiales como el pre calentamiento y post calentamiento.

Considerando los beneficios que se obtienen, se debe tener en cuenta que entre más alto sea el contenido de carbono equivalente (CE) más baja será la soldabilidad del material. Aquellos que posean un porcentaje en peso de CE entre 0.45% y 0.60% es probable que la soldadura se agriete, por consiguiente, se recomienda un pre calentamiento entre 95°C y 400°C. Cuando el CE es superior a 0.60 wt% la probabilidad de agrietamiento es más alta, necesitando además del pre calentamiento un post calentamiento a la misma temperatura [7].

Para el material en estudio el CE según el International Institute of Welding es:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

$$CE = 0.4217\% + \frac{0.8523\% + 0.4047\%}{6} + \frac{0.7959\% + 0.2041\% + 0\%}{5} + \frac{0.0575\% + 0\%}{15}$$

$$CE = 0.4217\% + 0.2095\% + 0.2\% = \mathbf{0.835\%}$$

Dado que el CE es mayor a 0.60 wt% el material debe ser pre y post calentado tras el proceso de soldadura. Teniendo en cuenta que se usa el equipo de oxicorte para ambos procesos

y las dimensiones de la pieza a precalentar y postcalentar son muy grandes, se recomienda usar una temperatura de 250°C. Este valor es un punto medio entre los rangos de temperaturas recomendados y el consumo de combustible no será desmedido.

Para este proceso de reconstrucción las diferentes variables a tener en cuenta en el WPS se dividen en dos tipos según su implicación o importancia, las cuales son: Variables esenciales y variables no esenciales.

#### ***4.3.2 Parámetros para el diligenciamiento del WPS***

Para terminar de obtener un WPS completo y específico se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

**4.3.2.1 Variables esenciales [14].** Estas se caracterizan por afectar las propiedades mecánicas de la soldadura, por lo cual es importante que estén debidamente documentadas. Cuando se varía alguna de ellas, el procedimiento de soldadura se califica y aprueba nuevamente. Algunas de las variables que se consideran esenciales dentro del proceso de soldadura son las siguientes:


- Proceso de soldadura.
- Tipo, especificación y/o composición del metal base.
- Geometría del metal base.
- Pre y pos calentamiento del metal base.
- Metal de aporte y cualquier otro material que será consumido durante la soldadura.

**4.3.2.2 Variables no esenciales [14].** Estas no afectan las propiedades mecánicas de la soldadura y no requieren de una recalificación del procedimiento si se llega a variar dentro de

ciertos límites. Algunas de las variables que se consideran no esenciales dentro del proceso de soldadura son las siguientes:

- Progresión (Ascendente o descendente).
- Tamaño del electrodo o alambre (diámetro).
- Uso y tipo de respaldo de soldadura.
- Polaridad de la corriente de soldadura.
- Técnica de aplicación de soldadura.

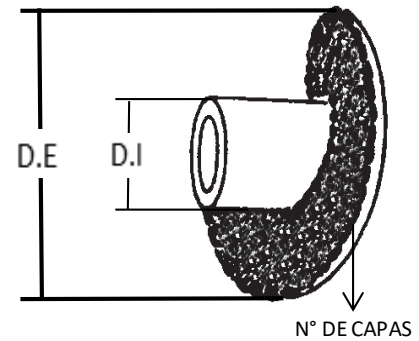
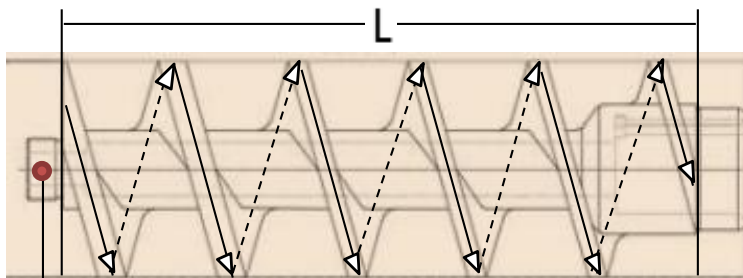
4.4 Diseño del WPS

 ESPECIALIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA				WPS	
WPS No: 1		PQR No: 1		FECHA: 27/09/2023	
PROCESO DE SOLDADURA: Shielded Metal Arc Welding (SMAW)		TIPO: MANUAL		CÓDIGO: AWS A5.5	

1. DETALLE DEL ÁREA A SOLDAR

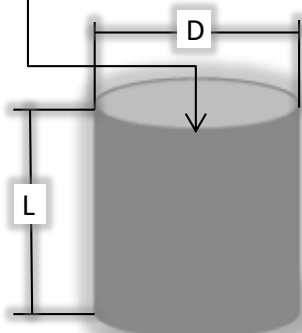
SINFÍN: X	CAPUCHÓN: __	D.I (P9): 85mm	D.I (P15): 95mm
D.E (P9): 260mm	D.E (P15): 308mm	FORMA DEL PRODUCTO: HELICOIDE	

NOTA: DEPENDIENDO DE LA SEVERIDAD DEL DESGASTE DEL SINFÍN SON EL NÚMERO DE CAPAS APLICADAS DE SOLDADURA E7018. L (P9): 900mm L (P15): 900mm

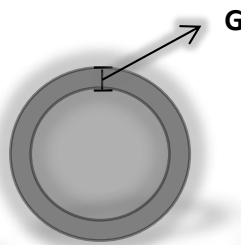


SINFÍN: __	CAPUCHÓN: X	G: 12,5mm	D: 98mm	L: 130mm
MATERIAL DE RESPALDO: N/A	FORMA DEL PRODUCTO: CILINDRO			

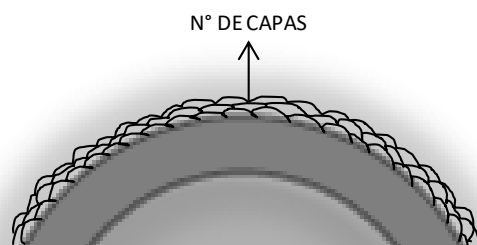
NOTA: CAPUCHÓN UBICADO EN LA PARTE FINAL DEL TORNILLO SINFÍN. EXPUESTO A LAS MISMAS CONDICIONES DE TRABAJO. TAMBIÉN ES NECESARIA SU RECONSTRUCCIÓN.



VISTA LATERAL



VISTA INFERIOR



VISTA INFERIOR

2. METAL BASE								
<b>MATERIAL:</b>	ACERO AL CROMO - MOLIBDENO REFERENCIA 2048							
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b>	<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>							
BONIFICADO	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Mo	%Ni
	0,4217	0,8523	0,024	0,0186	0,4047	0,7959	0,2041	0,0575

3. PRECALENTAMIENTO					
<b>T° DE PRECALENTAMIENTO:</b>	250°C	<b>T° ENTRE PASES:</b>	200°C	<b>MÉTODO A USARSE:</b>	SOPLETE

4. METAL DE APORTE			
	METAL DE APORTE 1	METAL DE APORTE 2	METAL DE APORTE 3
<b>IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO</b>	SOLDADURA DE RELLENO WEST ARCO E7018 - A1	SOLDADURA DE ENMANTEQUILLADO WEST ARCO NIQUEL 100	SOLDADURA DE DUREZA XUPER ABRATEC N6710 XHD
<b>ESPECIFICACIÓN</b>	AWS A5.5, NTC 2253, ASME SFA5.5	AWS A5.15, ASME SFA5.15	-
<b>CLASIFICACIÓN</b>	AWS E7018 - A1	AWS ENiCl	AWS N6710 XHD
<b>DIÁMETRO</b>	5/32"	1/8"	1/8"
<b>NÚMERO DE PASES</b>	4 - 7 SEGÚN DESGASTE DEL SINFIN	1	1
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	ELECTRODO DE BAJO HIDRÓGENO CON POLVO DE HIERRO CON ALTA RATA DE DEPOSICIÓN. TRABAJA EN TODAS LAS POSICIONES	NÚCLEO DE NIQUEL PURO. DEPÓSITO DE BUENA DUCTILIDAD Y ALTA MAQUINABILIDAD. MINIMIZA LOS ESFUERZOS RESIDUALES PRODUCIDOS DURANTE LA SOLDADURA	LOS DEPÓSITOS SON EXTREMADAMENTE RESISTENTES A LA ABRASIÓN SOMETIDA A ALTAS PRESIONES. TRABAJA EN TODAS LAS POSICIONES. ALTA RATA DE DEPOSICIÓN.

5. POSICIÓN DE SOLDADURA		6. TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLDADURA			
<b>POSICIÓN:</b>	PLANA	<b>TEMPERATURA:</b>	250°C	<b>TIEMPO:</b>	MANTENER 3 MINUTOS

7. TÉCNICA			
<b>PASE ÚNICO O MÚLTIPLE:</b>	MÚLTIPLE	<b>CORDONES RECTOS U OSCILANTES:</b>	RECTOS
<b>LIMPIEZA INICIAL:</b>	MECÁNICA	<b>LIMPIEZA ENTRE PASES:</b>	GRATEADO

8. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
PASE N°	PROCESO	METAL DE APORTE		CORRIENTE			VOLTAJE
		ELECTRODO	DIÁMETRO	AC/DC	POLARIDAD	AMPERAJE	
1 a 4 - 7 *	SMAW	E7018	5/32"	DC	ELECTRODO EN POSITIVO	130A	220V
8	SMAW	ENiCl	1/8"	DC	ELECTRODO EN POSITIVO	70A	220V
9	SMAW	N6710	1/8"	DC	ELECTRODO EN NEGATIVO	160A	220V

**NOTA:** EL NÚMERO DE PASES INICIALES DE SOLDADURA E7018 CORRESPONDIENTES AL RELLENO DEPENDEN DEL NIVEL DE DESGASTE.

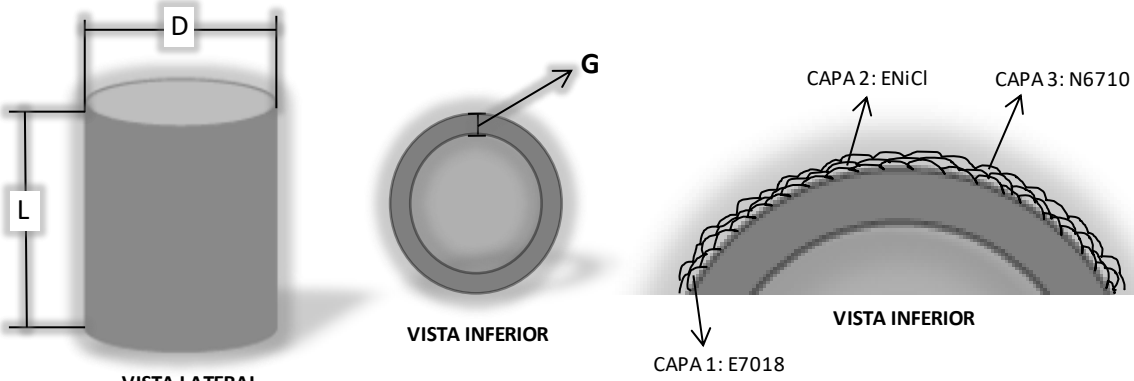
<b>ELABORADO POR:</b>	DWAN SEBASTIAN PINTO DÍAZ
-----------------------	---------------------------

## 4.5 Diseño y aplicación del PQR en el material afectado para la calificación del WPS

 <b>palmas del cesar</b> el fruto de la excelencia	REGISTRO DE LA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO	PQR N° 1	
		FECHA	28/09/2023

METAL BASE	ESPECIFICACIÓN	TIPO	ESPESOR	TAMAÑO	ESQUEMA	DIÁMETRO
MATERIAL BASE	ACERO AL CROMO - MOLIBDENO REF 2048	BAJA ALEACIÓN	12,5mm	-	-	-
SOLDADO A	-	-	-	-	-	-
METAL DE RESPALDO	N/A	N/A	N/A			

DATOS CONJUNTOS					
TIPO DE RANURA:	N/A	ÁNGULO DE RANURA:	N/A	APERTURA DE RAÍZ:	N/A
CARA DE LA RAÍZ:	N/A	ANCHURA:	N/A	MÉTODO:	N/A



**VISTA LATERAL**      **VISTA INFERIOR**      **VISTA INFERIOR**

PROCEDIMIENTO			
	1	2	3
CAPA DE SOLDADURA			
PASE DE SOLDADURA			
<b>PROCESO</b>	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>	<b>SMAW</b>
TIPO	MANUAL	MANUAL	MANUAL
<b>POSICIÓN</b>	PLANA	PLANA	PLANA
PROGRESIÓN	VERTICAL	VERTICAL	VERTICAL
<b>METAL DE APORTE (ESPECIFICACIÓN AWS)</b>	AWS A5.5	AWS A5.15	-
CLASIFICACIÓN AWS	E7018 A-1	ENiCl	N6710 XHD
DIÁMETRO	5/32"	1/8"	1/8"
FABRICANTE	WEST ARCO	SAGER	SAGER
<b>COMPOSICIÓN DEL GAS DE PROTECCIÓN</b>	-	-	-
COMPOSICIÓN	-	-	-
CAUDAL	-	-	-
TAMAÑO DE LA BOQUILLA	-	-	-
<b>PRECALENTAMIENTO</b>	250°	250°	250°
TIEMPO DE PRECALENTAMIENTO	5 MINUTOS		5 MINUTOS
T° ENTRE CAPA	250°	250°	250°

<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</b>	-	-	-
POLARIDAD	CC (+)	CC (+)	CC (-)
MODO DE TRANSFERENCIA	-	-	-
TIPO DE FUENTE DE ENERGÍA	CA	CA	CA
AMPERIOS	130A	70A	160A
VOLTIOS	220V	220V	220V
VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN	-	-	-
VELOCIDAD DE AVANCE	-	-	-
ENTRADA MÁXIMA DE CALOR	-	-	-
<b>TÉCNICA</b>	-	-	-
CORDÓN O TRAMA	-	-	-
PASES MÚLTIPLES O SIMPLES	MÚLTIPLE	MÚLTIPLE	MÚLTIPLE
CORDONES RECTOS U OSILANTES	RECTOS	RECTOS	RECTOS
NÚMERO DE ELECTRODOS	4	7	3
DISTANCIA A PIEZA DE TRABAJO	-	-	-
PEENING	-	-	-
LIMPIEZA ENTRE PASES	GRATEADO	GRATEADO	GRATEADO

<b>ENSAYOS DESTRUCTIVOS</b>				
<b>TOMA DE DUREZAS</b>	PROBETA 1 (SOLDADURA E7018)		PROBETA 2 (SOLDADURA N6710)	
	ENSAYO	HRC	ENSAYO	HRC
	1	23	1	45
	2	24	2	45
	3	25	3	44

<b>ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b>		
<b>INSPECCIÓN VISUAL</b>		<p>COMO SE PUEDE APRECIAR EN LA IMAGEN LA SOLDADURA SE ENCUENTRA SIN NINGÚN TIPO DE FISURAS Y POROSIDADES COMO ANTERIORMENTE SE PRESENTABAN. ÚNICAMENTE SE OBSERVAN PEQUEÑAS SALPICADURAS LAS CUALES NO REPRESENTAN NINGÚN PROBLEMA PARA LA APLICACIÓN DE LA PIEZA.</p>

<b>CERTIFICACIÓN</b>	
NOMBRE DEL SOLDADOR	LUIS EDUARDO PACHECO CASTILLO
PRUEBAS DIRIGIDAS POR	DWAN SEBASTIAN PINTO DÍAZ
LABORATORIO	ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES Y GIMAT

ELABORADO POR:	DWAN SEBASTIAN PINTO DÍAZ
----------------	---------------------------

## 4.6 Caracterización de la reconstrucción sugerida

### 4.6.1 Defectos presentes en la reconstrucción sugerida

La siguiente figura muestra de cerca la superficie final de la reconstrucción sugerida para la solución al problema de agrietamiento.

#### Figura 26

Superficie final de la reconstrucción sugerida.



Como se observa en la **Figura 26** la soldadura se encuentra sin ningún tipo de agrietamientos o porosidad, mostrando un resultado positivo con el nuevo proceso de reconstrucción. Para evitar la aparición de grietas se solucionó la causa principal que las provocaba, lo cual era los esfuerzos térmicos en la soldadura misma. La solución a este problema fue añadir una capa que cumpliera la función de enmantecillado en la reconstrucción, situándose justo antes de la capa final. Para la nueva capa se usaron electrodos Niquel 100 los

cuales se caracterizan por su buena ductilidad y reducir los esfuerzos residuales, evitando así que la capa de soldadura E6710 se agrietara y desprendiera.

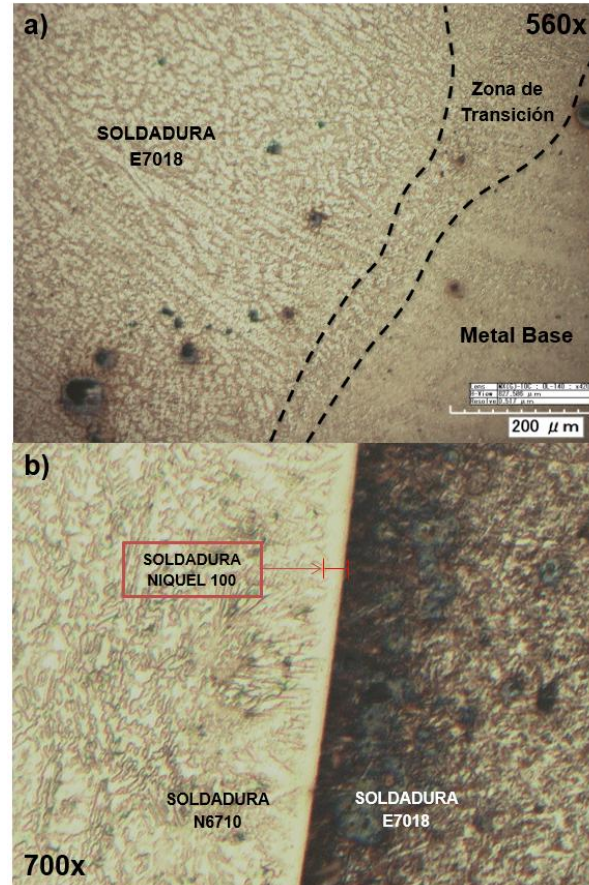
Para que otros defectos como socavaduras no se hicieran presentes durante la reconstrucción se tomaron los parámetros de amperaje sugeridos por la ficha técnica del fabricante para cada uno de los electrodos. La aparición de poros se controló con precalentamiento de la zona a soldar.

#### 4.6.2 Microestructura y dureza de la reconstrucción

A continuación, se presentan las micrografías de cada una de las interfases presentes en la reconstrucción.

#### Figura 27

Interfases presentes en la reconstrucción sugerencia.



La siguiente tabla muestra las durezas obtenidas de los los electrodos E7018 y N6710:

**Tabla 6**

Dureza obtenida de los electrodos E7018 y N6710 en HRC.

DUREZA EN HRC		
MEDIDA	N6710	E7018
1	45	23
2	45	24
3	44	25

En la **Figura 27a** se observa como en la interfase de ambos metales los granos de ferrita presentes se van haciendo de mayor tamaño en dirección del metal base a la soldadura E7018. La ferrita en la cual está difundida la martensita perteneciente al metal base da paso a formar ferrita acircular en la soldadura. El cambio de microestructura es notable en la zona de transición (**ZT**) señalada en la **Figura 27a** donde la ferrita va tomando esta forma poco a poco.

La **Figura 27b** muestra las interfases de las tres soldaduras usadas en la reconstrucción, la E7018, Niquel 100 y N6710 de derecha a izquierda respectivamente. Observando la interfase más importante de la reconstrucción la cual corresponde a las soldaduras Niquel 100 y N6710 se logra apreciar una buena fusión entre estas. Dicho fenómeno puede ser el principal causante de la disminución o discipación de los esfuerzos térmicos producidos durante el enfriamiento de la soldadura N6710 evitando así que se formen grietas en dicha soldadura. Siendo bastante dúctil el material de los electrodos Niquel 100 este cede ante los esfuerzos producidos por la soldadura N6710 evitando así el agrietamiento de esta. Debido a la disminución de los esfuerzos ya mencionados la dureza del material aportado por los electrodos N6710 disminuye con respecto a

la reconstrucción usada sin enmantequillado como se puede apreciar comparando la **Tabla 5** y **Tabla 6**.

## 5. Conclusiones

- Teniendo en cuenta el análisis tribológico realizado se encontró que el material desgastado, piedras, arena, fruto y demás partículas duras representan los elementos interfaciales en el sistema tribológico, los cuales junto con el ambiente agresivo de trabajo potencia el poder abrasivo que sufren los sinfines durante su aplicación. Lo anteriormente mencionado justifica la necesidad de utilizar un revestimiento de alta dureza.
- La nueva capa añadida en la reconstrucción que cumple la función de enmantequillado permite una mejor adherencia y alivio de tensiones en la capa final. Como resultado las grietas desaparecieron, permitiendo así un desgaste más homogéneo de la pieza, evitando llegar rápido a las capas de relleno como en la reconstrucción original.
- Se encontró que, debido al alto contenido de Cromo y Carbono de los electrodos usados en la última capa, se forman una gran cantidad de carburos de cromo y carburos hexagonales de cromo. Éstos se caracterizan por su alta dureza, haciendo este tipo de soldadura perfecta para su aplicación en los tornillos sinfín.
- Con el WPS realizado, cualquier trabajador capacitado en la planta podrá ejecutar la reconstrucción con éxito si sigue cada uno de los pasos e indicaciones plasmadas.

## **6. Recomendaciones**

- Realizar tratamiento térmico a la pieza terminada para aumentar su dureza superficial.
- Ajustar los medidores de amperaje de los equipos de soldadura para el uso correcto de los rangos para cada diámetro y tipo de electrodo.

### Referencias bibliográficas

- [1] Zum Gahr K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* [Institute of Materials Technology, University of Siqen, Siegen, Federal Republic of Germany].
- [2] Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology* (Second Edition). Butterworth-Heinemann.
- [3] Cynthia L. Jenney, Annette O'Brien (Eds.) American Welding Society. (2001). *Welding Handbook* (Ninth Edition, Vol. 1).
- [4] Linnert, G. E., (1994), *Welding Metallurgy*, 4th ed., Miami: American Welding Society, Figure 6.8.
- [5] DIN 50320: Verschlei O - Begriffe, Analyse von Verschlei Ovorgangen, Gliederung des Verschlei Rgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.
- [6] García Pacheco, D. H. (2015). *Desarrollo de dos procedimientos de soldadura (WPS) para la fabricación de uniones soldadas en tubería de producción*. UNIVERSIDAD LIBRE. Bogotá D.C.  
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9851/DOCUMENTO%20M ONOGRAFIA.pdf?sequence=1>
- [7] Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys was published in 1990 as Volume 1 of the 10th Edition Metals Handbook. With the second printing (1993), the series title was changed to ASM Handbook. The Volume was prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee.

- [8] Industrias AVM S.A., Ficha técnica tornillos sinfín P-9 / P-15. Productos.  
<https://www.avm.com.co/productos>
- [9] Ruiz LL., A. & ASNT NDT Level III Services. (n.d.). Discontinuidades del metal base y de la soldadura.  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3.Discontinuidades\\_en\\_Metal\\_Base\\_y\\_Soldadura.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3.Discontinuidades_en_Metal_Base_y_Soldadura.pdf)
- [10] Manual Prensas P9. Industrias AVM S.A. Santamaría Latorre y cia s. en c.
- [11] Industrias AVM S.A. PALM-OIL, Prensa P15 con reductor externo y sistema de contrapresión. Sobre la empresa.
- [12] ASTM E3, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
- [13] Castillo Herrera, W.P. and Oscar Gabriel, T.C. (2019) Principios de Tribología aplicados en la Ingeniería Mecánica, área de innovación y desarrollo, S.L. Ingeniería y Tecnología. ciencias. <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2019/12/PRINCIPIOS-DE-TRIBOLOG%C3%8DA-APLICADOS-EN-LA-INGENIER%C3%8DA-MEC%C3%81NICA.pdf>
- [14] PDVSA (Ed.). (2014). instructivo para la elaboración de la especificación del procedimiento de soldadura (Vol. 4, Número PI-06-01-02). issuu.  
<https://issuu.com/knarf320/docs/155907506-pi-06-01-02>
- [15] Calderón Celis, J. Modelo ULIRAM para determinar nuevas composiciones químicas para materiales de aporte [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Tesis Digitales UNMSM.  
[https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/calderon\\_cj/cap1.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/calderon_cj/cap1.pdf)

- [16] Avner S.H. (1964) Introducción a la metalurgia física. (Lic. Estrada Haen J. L. Trad.) (Segunda edición).
- [17] AWS A5.5 Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.
- [18] AWS D1.1/D1.1M:2020 An American National Standard Structural Welding Code-Steel.
- [19] MonsalveGil, H. I., MenaHerrera, D. A., & GiraldoBarrada, J. E. (2004). Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura. *Dyna*, 71(144),151-163. ISSN: 0012-7353. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614416> (Microestructura 6710)
- [20] ASTM E45-18a. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.
- [21] Ficha Técnica Xuper Abratec N6710 XHD®. Castolin Eutectic. Sarger Los Especialistas en Soldadura.
- [22] J. Napiórkowski, M. Lemecha, P. Szczyglak. analiza zużywania warstw wierzchnich w naturalnych warunkach glebowych. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, ul. Michała Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Polska.
- [23] Catálogo WEST-ARCO. Nuestro portafolio. <https://www.herramientasindustrialesas.com/assets/west-arco/pdf/west-arco.pdf>
- [24] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An introduction* (9<sup>th</sup> ed.). Wiley.

- [25] ASME Boiler & Pressure Vessel Code. (2015). qualification standard for welding, brazing, and fusing procedures; welders; brazers; and welding, brazing, and fusing operators. (IX Edition).