

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE DESGASTE EN ALEACIONES DE  
COBRE PARA CONSUMIBLES DE PROCESO DE ARCO SOMETIDOS A  
DIFERENTES CICLOS**

**POR**

**LUIS ALBERTO LÓPEZ GONZÁLEZ**

**TESIS**

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO COAHUILA A DICIEMBRE DEL 2014**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE DESGASTE EN ALEACIONES DE  
COBRE PARA CONSUMIBLES DE PROCESO DE ARCO SOMETIDOS A  
DIFERENTES CICLOS**

**POR**

**LUIS ALBERTO LÓPEZ GONZÁLEZ**

**TESIS**

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO COAHUILA A DICIEMBRE DEL 2014**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales  
Gerencia de Desarrollo Humano  
División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE DESGASTE EN ALEACIONES DE COBRE PARA CONSUMIBLES DE PROCESO DE ARCO SOMETIDOS A DIFERENTES CICLOS**”, realizada por el alumno (a) **LUIS ALBERTO LÓPEZ GONZÁLEZ**, con número de matrícula **13-MS030** sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez Medina**  
Tutor Académico

---

**Dr. Fernando Martínez Díez**  
Tutor en Planta

---

**Dr. Felipe de Jesús García  
Vázquez**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Coordinador de Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales****Gerencia de Desarrollo Humano****División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **LUIS ALBERTO LÓPEZ GONZÁLEZ**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“ESTUDIO DEL FENÓMENO DE DESGASTE EN ALEACIONES DE COBRE PARA CONSUMIBLES DE PROCESO DE ARCO SOMETIDOS A DIFERENTES CICLOS”**, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 18 días del mes de Diciembre del 2014.

---

**Dr. Luciano Eliezer  
Ramírez Vidaurri**  
Presidente

---

**Dr. Eduardo Hurtado  
Delgado**  
Secretario

---

**Dra. Gladys Yerania Perez  
Medina**  
Vocal

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Esta tesis la dedico a mi familia:

Mi esposa patricia que supo comprender esta etapa de preparación en mi vida la cual implicó muchos sacrificios de su parte, y aun así siempre me alentó y motivo a continuar; a mis hijos Ximena, Leonardo y Regina que vivieron mi ausencia en esta etapa; a mi madre por ser un apoyo incondicional y alentarme en todo momento.

Además quiero agradecer a:

Dios por brindarme esta oportunidad de seguir creciendo y de vivir tantas experiencias durante esta etapa de preparación, a CONACyT por el apoyo de manutención durante estos 2 años de estudio, a COMIMSA por la formación que me brindó en el plan académico de Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial; a mis maestros que compartieron sus conocimientos y me ofrecieron su apoyo en diferentes proyectos durante estos 2 años; a mis compañeros de generación que vivieron conmigo tantas cosas y que fueron mi segunda familia en Saltillo.

# ÍNDICE

SÍNTESIS.....	9
CAPÍTULO 1 .....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Objetivo general .....	11
1.3 Objetivos específicos.....	12
1.4 Justificación .....	12
1.5 Planteamiento del problema .....	13
1.6 Aportación científica y tecnológica .....	14
1.7 Definición de hipótesis.....	14
1.8 Límites del estudio.....	14
1.9 Metodología para resolver el problema .....	15
1.10 Resultados y entregables esperados .....	15
CAPÍTULO 2 .....	17
2.1 El proceso GMAW .....	17
2.1.1 Definición y antecedentes generales .....	17
2.1.2 Usos y ventajas.....	18
2.1.3 Limitaciones .....	18
2.1.4 Principios de operación.....	19
2.1.5 Mecanismos de transferencia del metal.....	20
2.1.6 Variables del proceso .....	23
2.1.7 Equipo.....	28
2.1.8 Consumibles del proceso:.....	35

2.2 Tribología .....	39
2.2.1 Introducción a la tribología .....	39
2.2.2 Contacto mecánico .....	41
2.2.3 Fricción .....	42
2.2.4 Desgaste.....	44
2.3 Cobre.....	52
2.3.1 Introducción .....	52
2.3.2 Historia del cobre .....	53
2.3.3 Producción del cobre .....	53
2.3.4 Características del cobre .....	56
2.3.5 Aleaciones de cobre .....	57
CAPÍTULO 3.....	59
3.1 Metodología experimental .....	59
3.1.1 Obtención de las muestras .....	60
3.1.2 Análisis químico e identificación de la aleación .....	61
3.1.3 Identificación de las propiedades de la aleación.....	61
3.1.4 Análisis de temperatura del componente .....	62
3.1.5 Análisis de desgaste en el componente.....	63
3.1.6 Preparación de las muestras .....	64
3.1.7 Análisis de la microestructura .....	65
3.1.8 Mediciones de dureza Vickers .....	65
3.1.9 Análisis por MEB y EDS .....	66
3.2 Materiales y equipos.....	66
3.2.1 Descripción del material.....	66
3.2.2 Descripción del equipo .....	68

CAPÍTULO 4 .....	71
4.1 Temperatura de trabajo del componente.....	71
4.2 Mediciones de desgaste .....	72
4.3 Cambios en la superficie del orificio .....	75
4.4 Cambios en la microestructura del componente.....	77
4.5 Mediciones de dureza .....	78
4.6 Caracterización mediante microscopia electrónica de barrido .....	79
CAPÍTULO 5 .....	83
Listado de Figuras: .....	86
Listado de Tablas: .....	89
BIBLIOGRAFÍA .....	90



# SÍNTESIS

En este documento se investigó el impacto de parámetros específicos de trabajo del proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW) sobre los mecanismos de desgaste y deterioro que se presentan en las puntas de contacto (componente consumible situado en la punta de la pistola del proceso), durante su vida útil, cuando se suelda placa de acero alta resistencia y baja aleación (HSLA) de diferentes espesores con electrodo ER70S-3 de 1.2 mm recubierto de cobre.

Por medio de espectrometría de plasma se identificó la composición química de la punta de contacto identificando el material como una aleación de cobre C12200; definida así por la Copper Development Association (CDA). Se realizaron pruebas de temperatura con los parámetros de interés: 32 volts, con una velocidad de alimentación del electrodo de 16.5 mts/min, un sobresaliente de 25 mm y como gas de protección una mezcla de 90% Ar y 10% CO<sub>2</sub>, con un flujo de 45 CFH. Se identificó la temperatura máxima alcanzada por la puntilla bajo estos parámetros como 850 °C.

Se obtuvieron 30 muestras que trabajaron diferentes tiempos arco bajo los parámetros mencionados, las cuales se analizaron por estereoscopio antes y después de soldar, determinando su desgaste por medio de una ecuación de desgaste relativo y observando los cambios en la superficie del orificio de la puntilla con ayuda del mismo equipo. Además de esto se evidenciaron los cambios microestructurales sufridos por las puntillas mediante microscopia óptica, complementando estos cambios con ensayos de dureza, y relacionando este cambio microestructural con sus propiedades mecánicas. Finalmente se analizaron algunas muestras significativas por microscopia electrónica de barrido (MEB) con las intenciones de identificar los fenómenos de desgaste; y con ayuda de microanálisis se identificó el intercambio de material que deja el electrodo en punta de contacto y la presencia de salpicaduras dentro del orificio de la punta de contacto.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

La soldadura por arco metálico con gas de protección (GMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso que está regido por sus ventajas, y son estas mismas ventajas las que hacen el proceso ideal para aplicaciones de soldadura en alto volumen de producción y automatizadas. De manera que existen muchas compañías operando a nivel mundial con este proceso, aprovechando sus ventajas y luchando contra sus desventajas.

Los componentes básicos del equipo para este proceso son: la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia, la fuente de gas protector y la unidad de pistola soldadora; la cual está en constante movimiento a lo largo de

toda la estación de trabajo, particularmente próxima al arco eléctrico y expuesta a la salpicadura de metal de aporte. Es en esta, en donde ciertos componentes sufren un mayor desgaste, entre los más importantes están: las toberas, difusores, puntas de contacto y guías de conducción del alambre (componentes consumibles), estos se encuentran trabajando de manera continua bajo condiciones extremas de temperatura y desgaste.

Las puntas de contacto están fabricadas en aleaciones de cobre debido a que este material cuenta con una buena conductividad eléctrica y térmica, así como un alto punto de fusión para que soporte las temperaturas a las cuales estará sometido.

Éstas, a pesar de ser un componente muy pequeño, son de gran importancia, debido a la función de posicionar el alambre y abastecer la corriente eléctrica de manera eficiente para generar soldaduras de calidad.

Cabe mencionar que la calidad de los productos generados por este proceso está basada en gran medida, de una buena aplicación de los cordones de soldadura, estos a su vez se ven afectados por las condiciones en las que se encuentra el equipo y sus componentes (consumibles).

## **1.2 Objetivo general**

Identificar los fenómenos que ocasionan desgaste y deterioro de las puntas de contacto a fin de obtener la causa raíz del alto consumo de este componente, evaluando microestructuralmente el comportamiento del material y realizando un análisis del efecto de los parámetros del proceso GMAW en estos fenómenos.

### 1.3 Objetivos específicos

- Realizar un análisis químico a la punta de contacto utilizada actualmente, para identificar sus elementos de aleación y considerar sus propiedades físicas, mecánicas y tribológicas.
- Analizar las condiciones de operación a las cuales está sometida la punta de contacto en estaciones de trabajo que tienen un alto consumo de puntillas, considerando los principales parámetros de soldadura GMAW.
- Identificar los mecanismos de desgaste que se presentan en las puntas de contacto y que afectan la calidad de los ensambles soldados.
- Caracterizar los mecanismos de desgaste mediante microscopia electrónica de barrido.
- Evidenciar el principal motivo o causa raíz de deterioro y desgaste de estos componentes.

### 1.4 Justificación

La calidad de los productos generados por el proceso GMAW está basada en gran medida, de una buena aplicación de cordones de soldadura, los cuales se ven afectados por las condiciones en las que se encuentra el equipo y sus componentes (consumibles). Cuando la punta de contacto se deteriora y desgasta rápidamente se generan una serie de problemas como lo son: falsos contactos, interrupción eléctrica, inestabilidad en el arco, obstrucción del micro alambre, entre otros; conduciendo con esto a defectos y mala apariencia de la soldadura, los cuales a su vez implican retrabajos; además se provocan paros sucesivos por el cambio de este componente y de esta manera se generan tiempos muertos, afectando la productividad; así mismo al verse deterioradas las puntas, se incrementa el costo operativo del producto. Poniendo a manera de ejemplos dos casos hipotéticos; A y B, en el primero de estos casos 650 estaciones de soldadura en la planta utilizan una punta de contacto cada dos

turnos, mientras que en el segundo caso se utilizan 2 puntas por turno, analizando la situación obtenemos el costo de la puntilla en estos dos casos opuestos, suponiendo que la punta costara 1 dólar, se tendría que el costo para la planta en el primero de los casos (A) sería de 7,800 dólares al mes, mientras que en el segundo de los casos (B) el costo sería de 31,200 dólares al mes, la diferencia de 23,400 dólares al mes es un incremento importante en el costo operativo de la planta.

Tomando en cuenta estas situaciones se necesita analizar lo que está sucediendo ya que el deterioro y desgaste prematuro de éste componente se puede deber a diversos factores como: la mala calidad de la aleación de la que está fabricada la punta de contacto, la mala técnica de aplicación de soldadura en el ensamble y/o parámetros inadecuados, entre otros. Por lo tanto es ineludible identificar estos fenómenos y corregirlos.

## **1.5 Planteamiento del problema**

El desgaste del orificio a lo largo de la punta de contacto por efecto de la fricción entre esta misma y el alambre consumible bajo el efecto de alta temperatura y el paso de la corriente eléctrica, provoca que el electrodo tenga un desplazamiento angular durante el proceso de soldadura e inestabilidad del arco por la falta de contacto entre éstos dos componentes. Dentro del proceso se generan salpicaduras las cuales impactan directamente sobre los componentes que se encuentran en la punta de la pistola, cuando estas salpicaduras se adhieren al borde o dentro del orificio de la punta de contacto sucede una obstrucción en el deslizamiento del electrodo consumible provocando una alimentación errática y con esto uniones con imperfecciones y defectos de diferentes tipos.

## **1.6 Aportación científica y tecnológica**

La aportación científica y tecnológica que ofrece esta investigación es un conocimiento del comportamiento microestructural y de las propiedades mecánicas y tribológicas de la punta de contacto, que cambian en función de los parámetros, las condiciones de trabajo y del tiempo arco al que está sometido el componente, así mismo ofrecerá evidencia de los principales fenómenos de desgaste y deterioro que intervienen en la puntilla durante su desempeño.

## **1.7 Definición de hipótesis**

Los fenómenos de desgaste y deterioro que presentan las puntas de contacto al estar trabajando pueden ocurrir por diferentes motivos aislados o en conjunto; al analizar a diferentes tiempos arco (tiempo de trabajo real) el efecto de los parámetros de soldadura GMAW en la microestructura y en las propiedades tribológicas y mecánicas del material mediante técnicas de caracterización avanzadas, es posible conocer el comportamiento del material de la punta de contacto a través del tiempo y de esta manera determinar las causas del desgaste y deterioro presentes en el componente.

## **1.8 Limites del estudio**

En esta tesis se analizarán los fenómenos de deterioro y de desgaste que ocurren en las puntas de contacto, fabricadas en aleación de cobre de alta pureza, para conducción de microalambre ER70-3 de 0.045” cobrizado, en el proceso de soldadura GMAW en modalidad manual con modo de transferencia por aspersion y corriente a pulsos, bajo parámetros de soldadura específicos (voltaje y velocidad de alimentación del electrodo) con los que se trabaja en la planta, con una soldadura aplicada en diferentes tipos de uniones, en posición

plana y horizontal con técnica de arrastre del electrodo bajo diferentes velocidades de avance, para cuando se suelda placa de acero alta resistencia baja aleación (HSLA por sus siglas en ingles) de espesores desde 1/2" hasta 1 1/2" .

## 1.9 Metodología para resolver el problema

La metodología que se empleará para evaluar el desgaste en las puntas de contacto se muestra en Figura 1.1

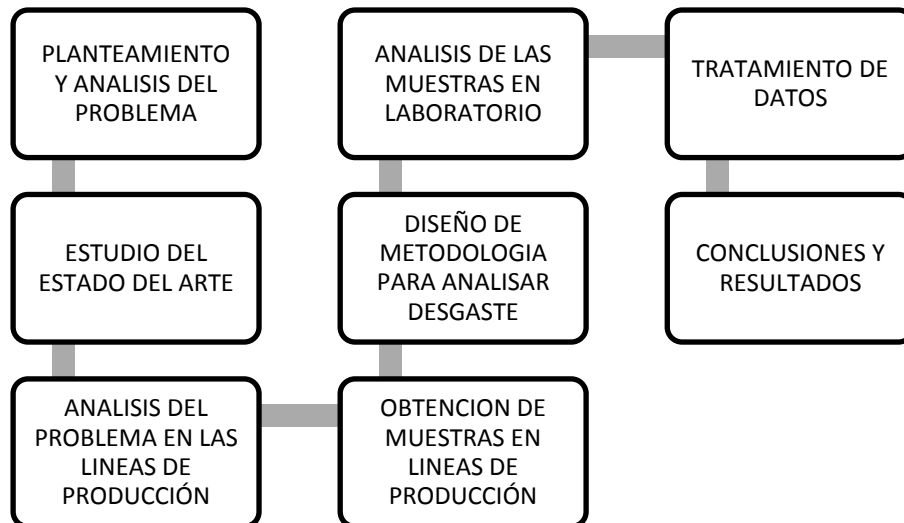


Figura 1.1 Metodología para resolver el problema

## 1.10 Resultados y entregables esperados

Dentro de los resultados esperados se pueden enlistar los siguientes:

- Temperatura aproximada de trabajo de la punta de contacto bajo ciertos parámetros de estudio.
- Comportamiento micro estructural del material de la punta de contacto.
- Efecto de los parámetros de estudio en la vida útil de las puntas de contacto.

- Evidencia de los diferentes fenómenos de desgaste y deterioro que afecta a las puntas de contacto.
- Identificación de las principales causas del deterioro y desgaste de la punta de contacto.



# **CAPÍTULO 2**

## **ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 El proceso GMAW**

#### **2.1.1 Definición y antecedentes generales**

La soldadura GMAW es un proceso que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas inerte protector suministrado externamente y sin aplicación de presión. Entre los avances del proceso están la operación con bajas densidades de corriente y con corriente continua a pulsos, la aplicación a una gama más amplia de materiales y el empleo de gases reactivos y mezclas de gases. Todos los metales de importancia comercial, como por ejemplo: aceros HSLA (alta resistencia baja aleación), los aceros inoxidable, las aleaciones de aluminio, cobre, titanio y níquel se pueden soldar con este proceso (1).

### **2.1.2 Usos y ventajas**

Los usos del proceso, están regidos por sus ventajas; las más importantes de éstas son:

- (1) Proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- (2) Puede soldarse en todas las posiciones bajo diferentes modos de transferencia cuando se utilizan los parámetros correctos.
- (3) Se logran tasas de deposición bastante más altas que con otros métodos de soldadura por arco.
- (4) Cuenta con velocidades de soldadura altas por encima de otros métodos de soldadura por arco.
- (5) Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar y volver a comenzar.
- (6) Cuando se usa transferencia por aspersion, es posible lograr penetración más profunda que con otros procesos, lo que permite el uso de soldaduras de filete más pequeñas para una resistencia mecánica equivalente.
- (7) Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

Estas ventajas hacen al proceso ideal para aplicaciones de soldadura en alto volumen de producción y en aplicaciones de soldadura automatizada (2).

### **2.1.3 Limitaciones**

En cualquier proceso de soldadura hay limitaciones. Algunas de ellas que restringen el uso de la soldadura por arco metálico con gas de protección son (2):

- (1) El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable que otros equipos de soldadura.
- (2) La soldadura por arco metálico con gas de protección se limita principalmente en lugares de difícil acceso, porque la pistola soldadora es más grande que un porta electrodos.
- (3) El arco de soldadura debe de protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector de manera que se restringe el uso en exteriores.
- (4) Tiene niveles relativamente altos de calor radiado e intensidad del arco.

#### 2.1.4 Principios de operación

El proceso GMAW se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo consumible que se protege mediante un gas de procedencia externa. Los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad de avance y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola. El proceso GMAW se puede usar en forma semiautomática o automática (1).

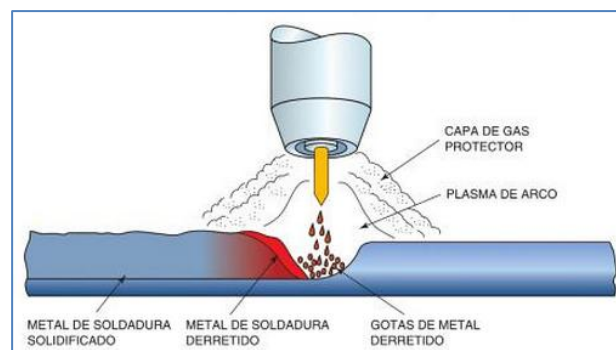


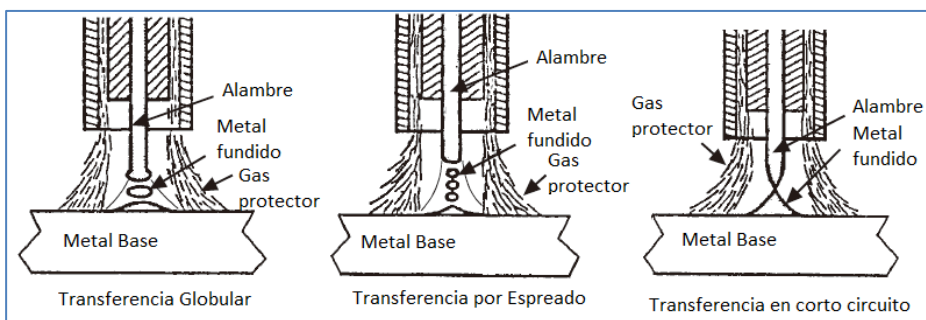
Figura 2. 1 Proceso de soldadura por arco metalico con gas de proteccion (3)

Los componentes básicos del equipo para el proceso de soldadura por arco de metal y gas son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector (4).

### 2.1.5 Mecanismos de transferencia del metal

La forma en que se transfiere el metal fundido en el arco, desde la punta del electrodo hasta el charco de soldadura determina la forma de la soldadura en varias posiciones, la cantidad de salpicadura y la calidad de la soldadura. La forma en que el metal fundido se transfiere puede ser clasificado en:

- I. Transferencia en cortocircuito
- II. Transferencia globular
- III. Transferencia por aspersion



**Figura 2. 2 Esquema de modos de transferencia en el proceso de soldadura por arco metálico con gas de protección (5)**

El modo de transferencia está determinado por varios factores; entre los más influyentes de estos se encuentran (5):

- (1) Magnitud y tipo de la corriente de soldadura
- (2) Diámetro del electrodo
- (3) Composición del electrodo
- (4) Extensión del electrodo
- (5) Gas protector

La corriente de soldadura y la composición del gas protector determinan el modo de transferencia y la tasa de generación de salpicadura cuando otros parámetros de soldadura se mantienen constantes

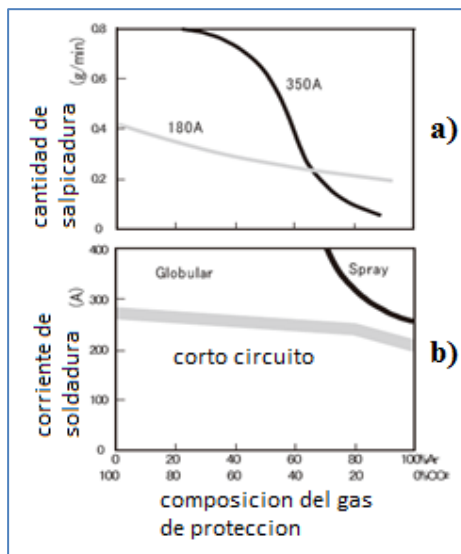
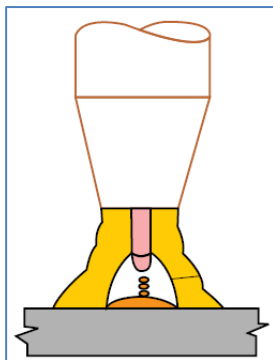


Figura 2. 3 Características del proceso GMAW a) cantidad de salpicadura y b) modos de transferencia (5)

### Transferencia por aspersion

La modalidad de transferencia de "rocío axial" o "aspersion" es muy estable y casi libre de salpicaduras, es posible generarla con una protección con alto contenido en argón. Para esto es preciso usar corriente continua con el electrodo positivo (CCEP) y un nivel de corriente por encima de un valor crítico conocido como corriente de transición (en la que se da el cambio de modo de transferencia a globular). El modo de transferencia por aspersion produce un flujo altamente direccional de gotas discretas aceleradas por las fuerzas del arco hasta alcanzar velocidades que vencen los efectos de la gravedad (1).



**Figura 2. 4 Modo de transferencia por aspersión axial (6)**

Las limitaciones de la transferencia por arco de rocío en cuanto al espesor del trabajo y la posición de soldadura se han superado en gran medida mediante el empleo de fuentes de potencia de diseño especial. Estas máquinas producen formas de onda y frecuencias cuidadosamente controladas que "pulsan" la corriente de soldadura; suministrando dos niveles de corriente; como se observa en la figura 2.5 a) y b) una corriente de fondo baja y constante que mantiene el arco sin proporcionar energía suficiente para hacer que se formen gotas en la punta del alambre, y una corriente a pulsos superpuesta cuya amplitud es mayor que la corriente de transición necesaria para la transferencia por aspersión. Durante este pulso, se forman y transfieren una o más gotas. La frecuencia y amplitud de los pulsos controlan el nivel de energía del arco, y por tanto la rapidez con que se funde el alambre. Al reducir la energía media del arco y la rapidez de fusión del alambre, los pulsos permiten aprovechar las características deseables de la transferencia por aspersión en la soldadura de láminas y de metales gruesos en cualquier posición (1).

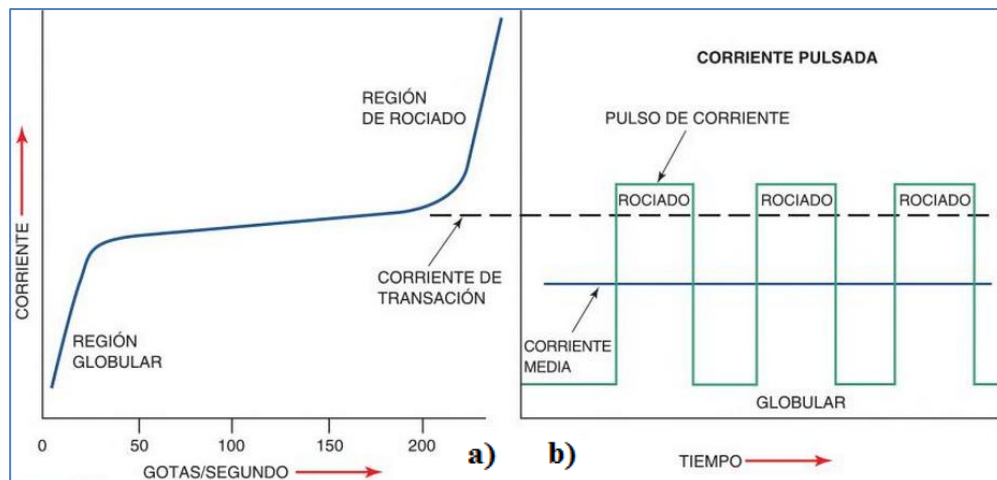


Figura 2.5 Características de corriente de soldadura a) corriente de transición b) corriente de arco de rocío a pulsos (3)

## 2.1.6 Variables del proceso

Las siguientes son algunas de las variables que afectan la penetración de la soldadura, la geometría de la franja y la calidad global de la soldadura

- a) Corriente de soldadura
- b) Polaridad
- c) Voltaje del arco
- d) Extensión del electrodo
- e) Velocidad de recorrido
- f) Orientación del electrodo (ángulo respecto a la dirección de desplazamiento)
- g) Posición de la unión que se va a soldar
- h) Diámetro del electrodo
- i) Composición y tasa de flujo del gas protector

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables no son del todo independientes, y cuando se modifica una, casi siempre es necesario modificar una o más de las

otras para obtener los resultados que se buscan. Por tanto, no hay un conjunto único de parámetros que produzca resultados óptimos en todos los casos (1).

A continuación se abordan algunas de estas variables, concretamente las que tienen más efecto sobre el desempeño y la vida útil de la punta de contacto.

### A) Corriente de soldadura

Si todas las demás variables se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo siguiendo una relación no lineal. Cuando se aumenta el diámetro del electrodo (manteniendo la misma velocidad de alimentación) se requiere una corriente de soldadura más alta como se muestra en la figura 2.6 (1).

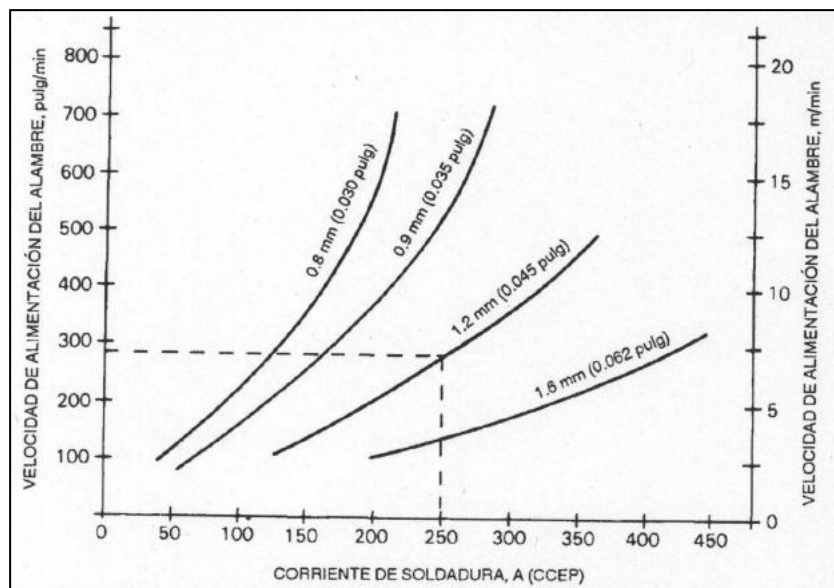


Figura 2.6 Corrientes de soldadura típicas contra velocidad de alimentación del alambre para diferentes diámetros de electrodos de acero al carbono (1).

El equilibrio dinámico entre la velocidad de alimentación del alambre y la velocidad de fusión resulta en una estable transferencia de metal. La



inestabilidad de la velocidad de alimentación es común y por lo general se origina con cualquier cosa a lo largo del camino del alambre que se opone al constante suministro de alambre consumible. Si en cualquier momento la velocidad de alimentación supera la velocidad de fusión entonces puede ocurrir tropiezo (stubbing). Sin embargo, si la velocidad de fusión supera la velocidad de alimentación puede ocurrir un quemado en retroceso (burnback) (7).

## **B) Polaridad**

Casi todas las aplicaciones de GMAW emplean corriente continua con el electrodo positivo (CCEP). Esta condición produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme, relativamente pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración para una amplia gama de corrientes de soldadura (1).

## **C) Voltaje del arco**

Voltaje del arco y longitud del arco son términos que con frecuencia se usan indistintamente, longitud del arco es una variable crítica e independiente. El voltaje del arco depende de la longitud del arco así como de muchas otras variables. El voltaje de arco óptimo depende de diversos factores, incluidos el espesor del metal, el tipo de unión, la posición de soldadura, el tamaño del electrodo, la composición del gas protector y el tipo de soldadura. Un voltaje excesivo puede causar porosidad, salpicaduras y socavamiento (1). En la figura 2.7 se muestran algunos efectos del voltaje correcto e incorrecto.

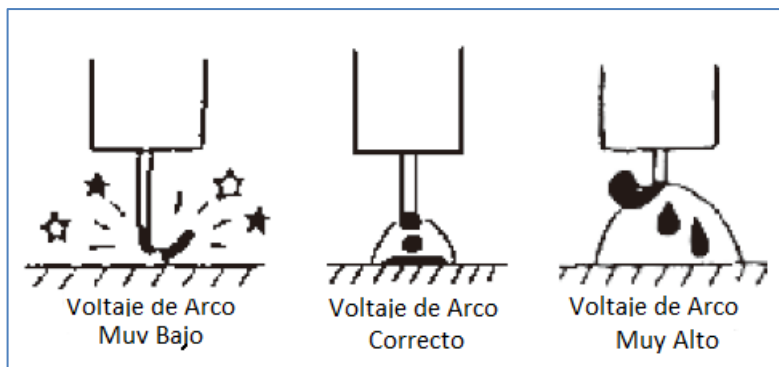


Figura 2. 7 Ajuste adecuado del voltaje de arco (5)

#### D) Extensión del electrodo:

La corriente de soldadura cambiara a medida que cambie la distancia entre el tubo de contacto y la pieza de trabajo, aunque este cambio sea pequeño, es suficiente como para afectar a la soldadura que se esté produciendo. Mientras más larga sea la extensión del electrodo, mayor será la resistencia al flujo de corriente de soldadura atreves del alambre, con una fuente de alimentación de voltaje constante mientras este permanece constante, el amperaje aumenta, si se acorta la extensión del electrodo la corriente de soldadura disminuye (3).

La extensión del electrodo es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo como se muestra en la figura 2.8 así como longitud del arco.

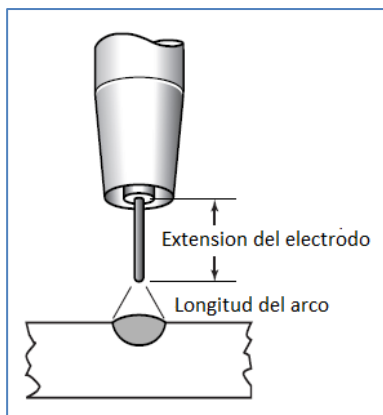


Figura 2. 8 Sobresaliente o extensión del electrodo y longitud de arco (8).

El incremento en la corriente no ocasiona un incremento en la penetración, porque la corriente se utiliza para calentar la punta del electrodo y no para transferir el metal de soldadura. La penetración disminuye y aumenta el revestimiento a medida que la extensión del electrodo se alarga. La penetración aumenta y el revestimiento disminuye a medida que se acorta la extensión del electrodo (3).

Existen diferentes recomendaciones para la dimensión de la extensión del electrodo basándose en los modos de transferencia y en rangos de amperaje, una de estas recomendaciones indica un sobresaliente entre 6 y 13 mm (1/4 y 1/2 pulg) para la transferencia en cortocircuito y entre 13 y 25 mm (1/2 y 1 pulg) para los demás tipos de transferencia de metal (1). Otro tipo de recomendación se muestra en la figura 2.9.

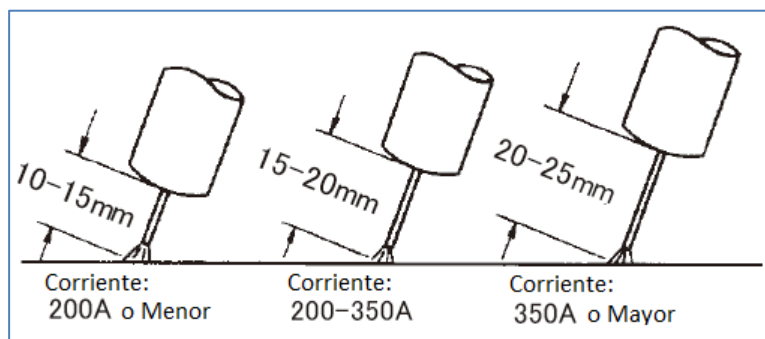


Figura 2. 9 Sobresaliente del electrodo sugerido en función de la corriente (2)

Es preciso mencionar que un excesivo sobresaliente puede provocar una longitud de arco corta, gotas de metal más grandes, inestabilidad del arco, apariencia irregular del cordón de soldadura, menor penetración y un aumento en la generación de salpicaduras (2).

### 2.1.7 Equipo

El equipo básico para cualquier instalación GMAW se muestra en la figura 2.10 y consiste en lo siguiente (1):

- (1) Fuente de potencia para soldadura
- (2) Unidad de alimentación del electrodo
- (3) Control de soldadura
- (4) Suministro regulado de gas protector
- (5) Pistola soldadora

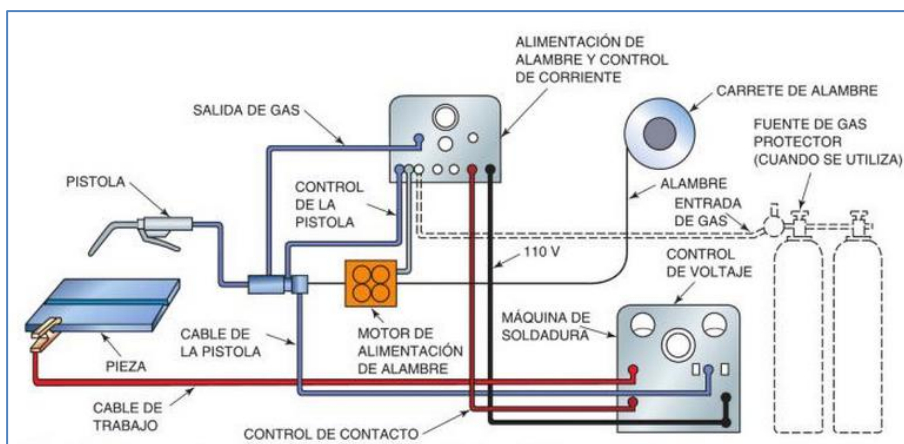


Figura 2. 10 Esquema del equipo para soldadura por arco metálico con gas de protección (3)

#### (1) Fuente de potencia

La fuente de potencia para soldadura suministra energía eléctrica al electrodo y a la pieza de trabajo a fin de producir el arco. En casi todas las

aplicaciones de GMAW se emplea corriente continua con el electrodo positivo (CCEP). Las fuentes de potencia de voltaje constante mejoran la operación en muchas aplicaciones de GMAW, si se emplea junto con un alimentador de alambre de velocidad constante se mantiene un voltaje casi constante durante la operación de soldadura, en la figura 2.11 se muestra la relación volt- ampere de este tipo de fuentes de potencia. La función de autocorrección de la fuente de potencia de voltaje constante es importante para producir condiciones de soldadura estables.

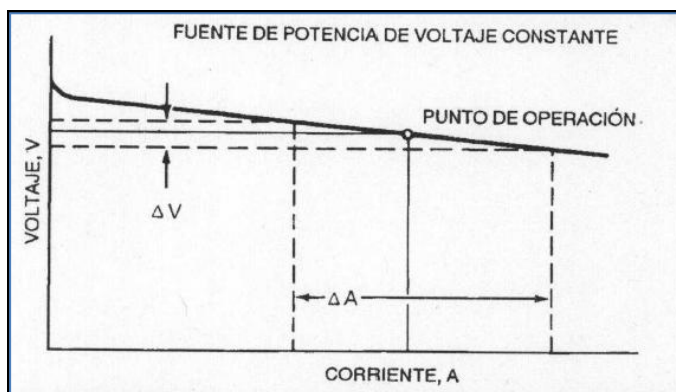


Figura 2.11 Relación Volt-Ampere de una fuente de potencia de voltaje constante (1)

Existe la ventaja de minimizar la generación de salpicaduras mediante el uso de fuentes de alimentación del tipo inversor, que permiten el control dinámico de la forma de onda de corriente (7).

## (2) Unidad de alimentación del electrodo

La unidad de alimentación del electrodo (alimentador de alambre) consiste en un motor eléctrico que empuja el electrodo a través de la pistola hacia el trabajo, accesorios para mantener la alineación y la presión sobre el electrodo y rodillos impulsores, los cuales pueden ser de diferentes tipos, como los que se muestran en la figura 2.12. Se emplea un surco con forma de "V" para alambres sólidos duros, como los de aceros al carbono e inoxidables, y un surco en forma de "U" para alambres blandos como el de aluminio. Los rodillos de alimentación

con dientes de sierra o estriados, con un rodillo de respaldo, se usan generalmente para alambres con núcleo.

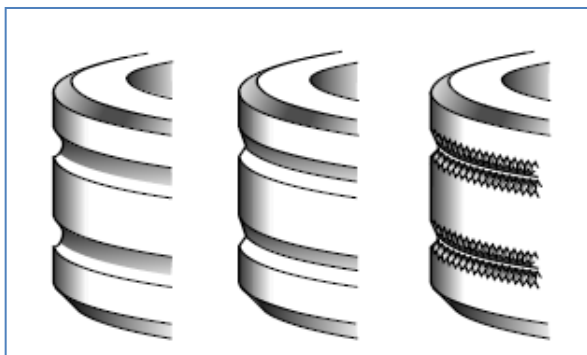


Figura 2. 12 Rodillos tipo: ranura en U, ranura en V y ranura estriada (8)

Es importante seleccionar los rodillos de accionamiento correctos ya que el utilizar alguno con el perfil equivocado o que no se ajuste adecuadamente puede causar el deslizamiento del alambre, deformación excesiva del alambre o desechos de metal que se acumulan en la punta de contacto (7).

De igual manera es importante seguir las especificaciones del fabricante cuando se ajusta el rodillo impulsor y mecanismos des enrollador (7).

### **(3) Control de soldadura**

En aplicaciones automáticas, el control de soldadura y el motor de alimentación del electrodo pueden estar integrados en una sola unidad. La función principal del control de soldadura es regular la velocidad del motor de alimentación del electrodo.

### **(4) Suministro regulado de gas protector**

Este se trata de un sistema que proporciona una tasa de flujo de gas protector constante a presión atmosférica durante la soldadura. La fuente de gas puede ser un cilindro de alta presión o un sistema de líquido de alto

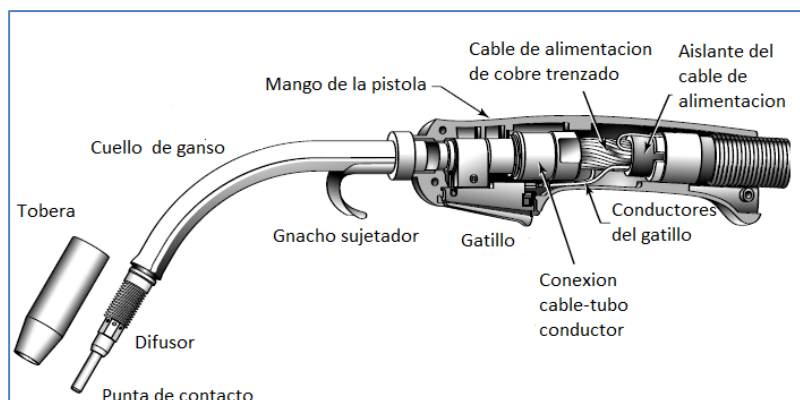
volumen. Se pueden utilizar mezclas de gases en cilindros o generarlas por medio de dispositivos mezcladores.

### **(5) Pistola soldadora**

La pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector al trabajo, de modo que proporciona la energía para establecer y mantener el arco y fundir el electrodo, además de la protección del gas necesaria contra la atmósfera del entorno. En la figura 2.13 se muestra la vista de los componentes principales de una pistola de soldar. Se han diseñado diversos tipos de pistolas soldadoras para obtener el máximo de eficiencia sea cual sea la aplicación, y van desde pistolas de trabajo pesado para trabajos de producción de alto volumen con corriente elevada hasta pistolas ligeras para soldadura fuera de posición con corriente baja, y se pueden conseguir enfriadas por aire o por agua, curvadas o rectas.

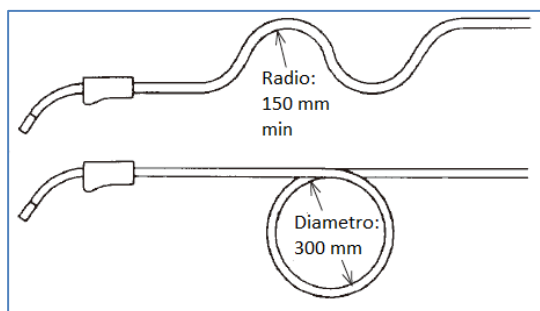
Los componentes básicos de las pistolas para soldadura por arco son los siguientes:

- a) Cable de potencia.
- b) Manguera de gas.
- c) Gatillo interruptor.
- d) Guía para el electrodo y forro
- e) Tobera
- f) Difusor
- g) Punta de contacto



**Figura 2.13 Vista seccional de la pistola (8)**

Antes de empezar a trabajar y durante el tiempo que se esté trabajando con el equipo será necesario revisar que el cable conductor no tiene alguna curvatura cerrada de radio pequeño, ya que ese tipo de curvaturas provoca alimentación irregular del electrodo causando así inestabilidad del arco. Cabe señalar que la curvatura mínima permisible es de aproximadamente 150 mm de radio y 300 mm de diámetro para una vuelta completa de cable, como se muestra en la figura 2.14 (5).



**Figura 2.14 Curvatura y diámetro permisible en el cable de la pistola de GMAW (5)**

Se recomienda que se trabaje con la longitud mínima de cable en la pistola ya que el exceso de longitud y excesivas espirales en el cable pueden causar fricción innecesaria, lo que resultara en problemas de alimentación (7).



El tubo de contacto, que por lo regular es de cobre o de una aleación de cobre, transfiere la corriente de soldadura al electrodo y dirige a este último hacia el trabajo. Este se conecta eléctricamente a la fuente de potencia de soldadura mediante el cable de potencia. El tubo de contacto debe sostenerse firmemente en el soplete y centrarse dentro de la boquilla del escudo de gas (1).

La tobera dirige una columna de gas protector de flujo uniforme hacia la zona de soldadura. Es en extremo importante que el flujo sea uniforme para asegurar que el metal de soldadura fundido esté bien protegido contra contaminación por los gases de la atmósfera. Hay boquillas de diferentes tamaños que deben elegirse de acuerdo con la aplicación; esto es, boquillas grandes para trabajos con corriente elevada en los que el charco de soldadura es grande, y boquillas pequeñas para soldadura de baja corriente y en cortocircuito (1).

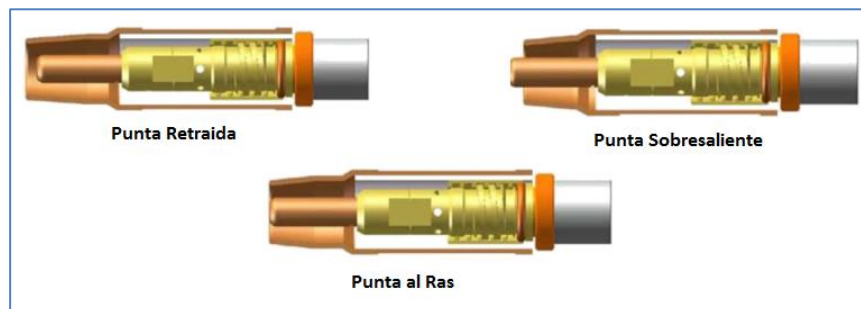
Es esencial ajustar la tobera y la punta de contacto a la distancia correcta una respecto de la otra, existen 3 maneras de posicionarlas; puede ser retraída, al ras y sobresaliente (9), como se muestra en la figura 2.16.

La posición retraída es la más comúnmente utilizada ya que se utiliza para aplicaciones de calor más altas con modo de transferencia de rocío axial en donde se requiere un sobresaliente (stick-out) más largo, la distancia ideal de la punta de contacto cuando está en esta posición es de 2 o 3 mm dentro de la tobera, ya que una distancia más grande forzaría al soldador a utilizar un sobresaliente también mayor, resultando problemas de soldabilidad como lo son: falta de fusión, atrapamiento de escoria (10).

El posicionamiento del tubo de contacto en relación con el extremo de la boquilla puede ser una variable que dependa de la modalidad de transferencia empleada. Si la transferencia es en cortocircuito, el tubo por lo regular estará al ras o extendido más allá de la boquilla (1).

La posición sobresaliente se utiliza generalmente para soldar tubería de raíz abierta o cualquier conjunto de uniones que requiera que el soldador introduzca

la punta de la pistola en la unión. Sin embargo el lado negativo de esto es la posibilidad de formación de arcos de la punta de contacto con la pieza de trabajo y la insuficiente protección del gas (9).



**Figura 2. 15 Posiciones relativas de la punta de contacto con la tobera (9)**

El conducto del electrodo y su forro se conectan a una ménsula adyacente a los rodillos de alimentación del motor que alimenta el electrodo. El conducto sustenta, protege y dirige el electrodo desde los rodillos de alimentación hasta la pistola y el tubo de contacto. El forro puede ser una parte integral del conducto o adquirirse por separado. En cualquier caso, el material y el diámetro interior del forro son importantes y se deberán de utilizar los especificados por el fabricante de la pistola (7). Es preciso dar mantenimiento periódico a los forros para asegurar que estén limpios y en buenas condiciones, a fin de que la alimentación del alambre sea consistente ya que cualquier cosa menor al diámetro interno de la guía puede afectar el rendimiento de la capacidad de alimentación. Se recomienda un forro helicoidal de acero si se usan electrodos de un material duro como el acero o el cobre. Los forros de nailon sirven para materiales de electrodo blandos como el aluminio y el magnesio (1). Los recubrimientos de estaño-zinc en la guía de conducción del electrodo (liner) de acero puede mejorar la alimentación del electrodo (7).

### **2.1.8 Consumibles del proceso:**

Además de los consumibles del equipo, existen los consumibles del proceso como lo son:

- a) Los electrodos
- b) Los gases protectores

A continuación se mencionan algunos factores que influyen en la selección de estos consumibles:

- Metal base
- Propiedades que debe tener el metal de soldadura
- Condición y limpieza del metal base
- Tipo de servicio o requisito de especificación aplicable
- Posición de la soldadura
- Modalidad de transferencia

#### **a) Electrodos:**

El proceso GMAW emplea un electrodo de alimentación continua que se consume con relativa rapidez. Por lo regular esta fuente es carrete o rollo que contiene de 4.5 a 27 kg y hasta carretes de arriba de 100 kg. También se puede encontrar tanques de 340 y 450 kg. Algunas de estas presentaciones se muestran en la figura 2.17.

Es importante considerar el uso de un electrodo de buena calidad, ya que un alambre de soldadura que es demasiado rígido puede causar fricción excesiva en el camino, mientras que un cable que es demasiado blando se puede enredar dentro de la pistola. Superficies de alambre sucio, áspero o escamoso pueden liberar los desechos en el interior del agujero, lo que finalmente provoca la obstrucción del orificio de la punta de contacto y con esto causar inestabilidades en el proceso (7).



**Figura 2.16 Presentaciones paquetes a granel del alambre sólido: Accu-Pak box, Accu-Trak drum, Horizontal Reel y bobinas y carretes (8)**

La sociedad americana de soldadura (AWS por sus siglas en inglés) especifica los requerimientos de bobinado para electrodo de alambre sólido para GMAW. El cast y el hélix son dos requerimientos clave, la Figura 2. 17 Cast y Hélix en el electrodo de alambre para GMAW muestra la descripción de estos conceptos en el electrodo de alambre. Para medir el cast y el hélix debe ser tomada una muestra del electrodo de alambre del carrete lo suficientemente grande para formar un círculo cuando se corta del paquete y luego se deja en el suelo sin restricciones. El cast es básicamente el diámetro de círculo formado por el trozo de electrodo de alambre cortado (si la forma es de ovalo, es el diámetro del círculo más grande que quepa en el ovalo). Los requerimientos de la AWS dicen que el cast no debe ser menor que 15" para diámetro de electrodo de 0.035" (0.9 mm) y mayores, no menor de 12" para diámetro del electrodo de 0.030" (0.8 mm) y menores (11).

El hélix es la elevación de la punta del electrodo de alambre de la superficie plana, las especificaciones de la AWS dicen que debe ser menor que 1" en cualquier posición (11).

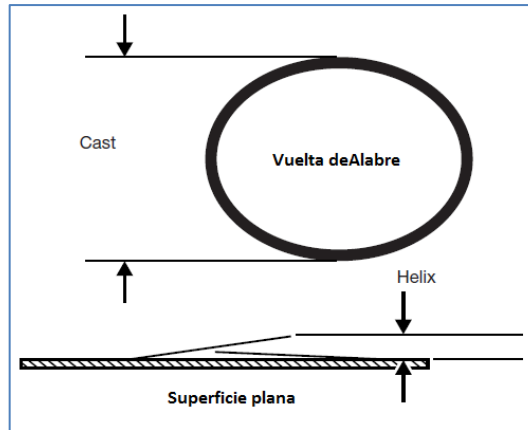


Figura 2. 17 Cast y Hélix en el electrodo de alambre para GMAW (8)

Paquetes de electrodo a granel específicos como: Accu-Trak® and Accu-Pak® utilizan una técnica de bobinado único que retuerce el cable elásticamente para proporcionar un alambre consistente libre de torsión “recto”. Alambres que provienen de estos empaques no forman un circuito cuando se les corta, por lo tanto las mediciones estándar de Cast y Hélix no pueden tener lugar (8).

#### b) Gases protectores:

La función primaria del gas de protección es impedir que la atmosfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido, además de esto la composición del gas y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre:

- Características del arco
- Modalidad de transferencia
- Penetración y perfil de la franja de soldadura
- Entre otras

Es muy común utilizar el argón puro y mezclado para soldar metales no ferrosos, aceros inoxidable, al carbono y de baja aleación.

El CO<sub>2</sub> es el único gas reactivo que puede utilizarse como protección en el proceso GMAW, cabe mencionar que la transferencia por rocío axial requiere un escudo de argón y no puede lograrse con uno de CO<sub>2</sub> con el que se obtiene la modalidad de transferencia en corto circuito o globular.

Se pueden utilizar mezclas de gases inertes y reactivos como se mencionó anteriormente, esto con la finalidad de obtener características de acabado, penetración y estabilidad del arco intermedias, que las que presenta cada uno de estos gases cuando se utilizan como protección en estado puro. Las adiciones de dióxido de carbono de hasta el 25% elevan la corriente de transición mínima, aumentan las pérdidas por salpicadura y la profundidad de penetración, reducen la estabilidad del arco y pueden mejorar la apariencia de la franja de soldadura.

Se ha usado ampliamente una mezcla de argón con 5% de CO<sub>2</sub> para soldar con arco pulsado y alambres sólidos de acero al carbono (1). Algunas ventajas de estas mezclas y de las mas comunes se mencionan en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Gases protectores para transferencia por aspersion en GMAW (1)**

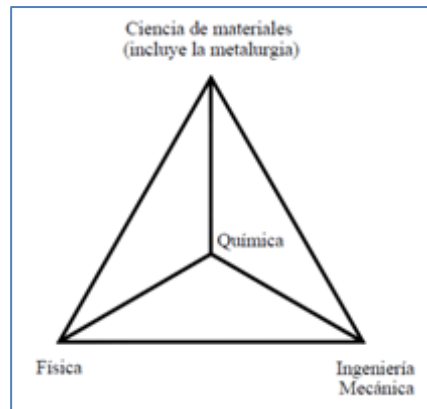
<b>Metal</b>	<b>Gas protector</b>	<b>Ventajas</b>
Acero al carbono	95% Argón + 5% oxígeno	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de franja, minimiza el socavamiento; permite velocidades más altas que el argón puro
	90% Argón + 10% CO <sub>2</sub>	Soldadura mecanizada de alta velocidad; soldadura manual de bajo costo

## 2.2 Tribología

### 2.2.1 Introducción a la tribología

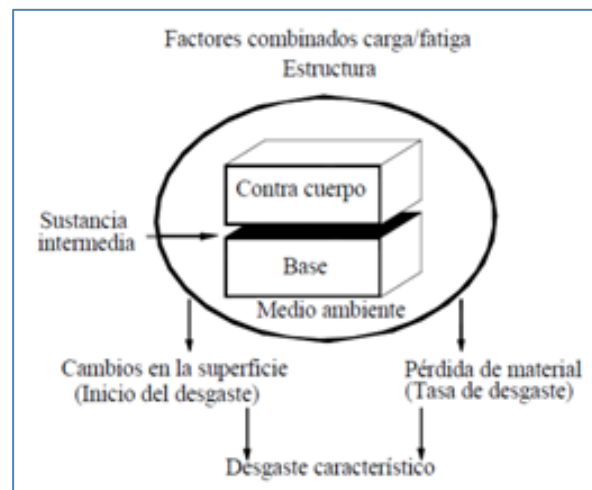
Desde la antigüedad el hombre ha tenido la necesidad del conocimiento de la tribología, siendo esta utilizada por nuestros antepasados para generar fuego, desplazar grandes bloques de piedra con la ayuda de lubricantes de origen animal así como el desgaste en piedras para decoración y construcción de herramientas, entre otras aplicaciones donde intervienen los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación. A lo largo de la historia el estudio de la tribología se ha tornado complejo, esto se debe a que, para poder entender los diferentes fenómenos que se presentan cuando dos cuerpos se encuentran en contacto y movimiento relativo, se requiere involucrar diferentes disciplinas científicas, tales como física, ciencia de materiales, química, ingeniería mecánica, etc. En la actualidad se sigue teniendo la necesidad de conocer el comportamiento de los materiales en un tribosistema donde se pretende evaluar los fenómenos de fricción y desgaste, para así poder diseñar elementos mecánicos que en conjunto sean más eficientes y durables, o bien con un tiempo de vida predeterminado.

La palabra Tribología: provienen del griego (tribo) que significa fricción o rozamiento y (logos) que significa estudio. Etimológicamente significa estudio de los fenómenos de fricción o rozamiento. El concepto de tribología fue usado por primera vez en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña por el profesor Peter Jost el 9 de Marzo de 1966, y definiéndola como: La ciencia y la tecnología que estudia las superficies que están en contacto y movimiento relativo así como los fenómenos que de ello se derivan (12). Por lo que la fricción, desgaste y lubricación son tópicos fundamentales de esta ciencia.



**Figura 2. 18 Tribología ciencia multidisciplinaria (13)**

Estos tres aspectos deben ser atendidos en su totalidad, lo que involucra un grupo multidisciplinario; donde la fricción está ligada directamente con la ingeniería mecánica y la física; el desgaste es parte de la ciencia de materiales y/o metalurgia así como la física; y la lubricación es una rama de la química; como se muestra en la Figura 2. 18 Tribología ciencia multidisciplinaria . En conjunto se pueden resolver las diferentes problemáticas industriales; donde las tasas de desgaste no solo dependen de las propiedades del material, sino que es un comportamiento conjunto entre el medio ambiente y el material; lo que se conoce como tribosistema, como lo muestra la Figura 2.19 Tribosistema .



**Figura 2.19 Tribosistema (13)**



Cuando se logra consolidar y utilizar todos estos conocimientos científicos en un fin específico, se puede estar seguro de que no solo se está desarrollando un par cinemático óptimo, sino que también se impacta positivamente en el aspecto económico, donde es utilizado (13).

### **2.2.2 Contacto mecánico**

El comportamiento de los fenómenos de fricción y desgaste que se manifiestan en las superficies de los sólidos que se encuentran en contacto y movimiento relativo, es consecuencia del tribosistema donde se localizan, así como de las propiedades geométricas, mecánicas, físicas y químicas de los mismos. Las primeras involucran lo referente a las formas y al contacto de las superficies, así como a la distribución y configuración de las asperezas en la superficie. Las segundas incluyen los módulos de elasticidad, dureza, parámetros de fatiga, etc. Mientras las terceras se ocupan de las características de endurecimiento y las constantes de difusión en materiales. Por último las propiedades químicas hacen referencia a la composición y polaridad de las superficies.

El contacto mecánico se encuentra dentro de los parámetros geométricos, se presenta cuando dos superficies se encuentran deslizando una con respecto a otra, donde existen dos áreas de contacto, la aparente y la real, donde la primera es el área de las superficies que están en contacto, en este ejemplo se encuentra un círculo encima de un rectángulo de manera que el área de contacto aparente para este caso sería el área dado por la fórmula del círculo de diámetro "D" como lo muestra la Figura 2.20.

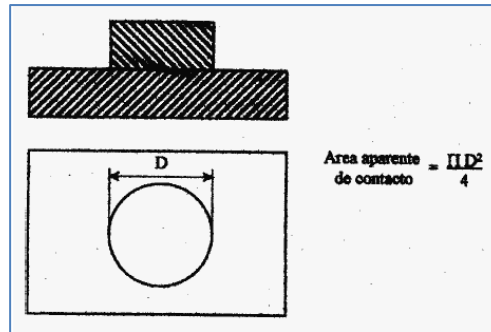


Figura 2.20 Área de contacto aparente (13)

Mientras que para el área real es necesario aplicar una carga “W” y considerar que las superficies no son completamente planas y presentan rugosidades, lo que ocasiona que el contacto solo ocurra en algunos puntos donde coinciden las crestas respectivas de ambas superficies. Para determinar esta área, es necesario sumar todos los microcontactos con  $A_r = \sum A_i$  donde  $A_r$  = Área real y  $A_i$  = Microcontactos, los cuales son una pequeña parte del área aparente de dichas superficies, como se muestra en la Figura 2.21.

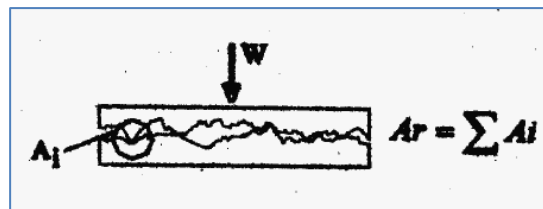
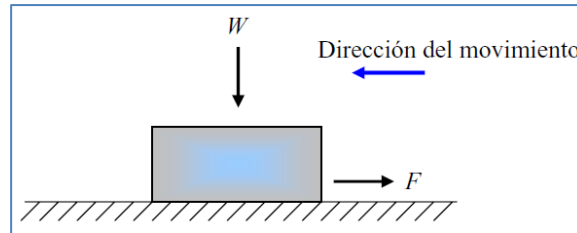


Figura 2.21 Área de contacto real (13)

### 2.2.3 Fricción

La palabra fricción proviene del latín “fricare” que significa rozamiento o frotamiento. Se manifiesta como una pérdida gradual de energía cinética cuando dos cuerpos se encuentran en contacto y movimiento relativo. Definiéndose como: “F” la fuerza de resistencia al movimiento de un cuerpo, cuando este se desplaza sobre otro bajo una carga “W”, siendo esta fuerza tangencial a la interface y en sentido contrario al desplazamiento como se muestra en la figura 2.24 (14).



**Figura 2.22 Diagrama del cuerpo libre que ilustra el deslizamiento de un cuerpo sobre una superficie (15)**

A continuación se mencionan las 3 leyes de la fricción:

1ª Ley: La fricción es independiente del área aparente de contacto.

2ª Ley: La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal aplicada "W"

3ª Ley: La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento

Cabe señalar que el coeficiente de fricción para metales, como lo señala la 3ª Ley de fricción es independiente a la velocidad de deslizamiento, pero solo hasta 10 m/s, ya que después de este valor, el coeficiente de fricción disminuye cuando aumenta la velocidad (16).

Existen diferentes mecanismos para la fricción, algunos son adhesión, abrasión y fatiga; en el caso que exista entre ellas un lubricante, se considera un cuarto mecanismo, el de lubricación.

La fuerza de fricción total resulta de la suma de las fuerzas generadas por cada uno de los cuatro mecanismos que se muestran en la Figura 2. 23 Mecanismos de fricción . La fricción adhesiva es la fuerza requerida para desprender las uniones formadas entre dos superficies. El concepto de fricción abrasiva, es la fuerza necesaria para deformar la superficie en forma elástica o plástica, o bien por el corte y desprendimiento de viruta. Para el caso de fricción por fatiga o histéresis es un poco diferente a las anteriores, debido a que esta es producida por la aplicación de cargas cíclicas, que tienen efectos sobre la

deformación de las asperezas, que pueden ser en forma macro o micro escala (17).

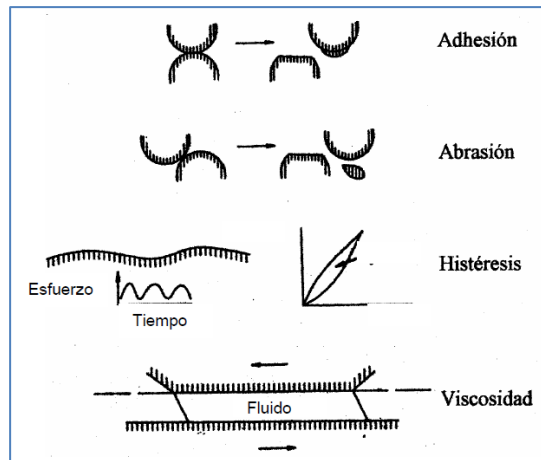


Figura 2. 23 Mecanismos de fricción (17)

## 2.2.4 Desgaste

El desgaste es desprendimiento de partículas que ocurre en la superficie de sólidos, que se encuentran en contacto y movimiento relativo, sometidas a una carga. El movimiento puede ser en forma unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante, rodante o puede ser la combinación de estos dos últimos (17).

En la Figura 2. 24 Tipos de acciones mecánicas sobre los materiales se muestran el tipo de exigencia que se pueden dar entre un par de materiales con movimiento relativo.

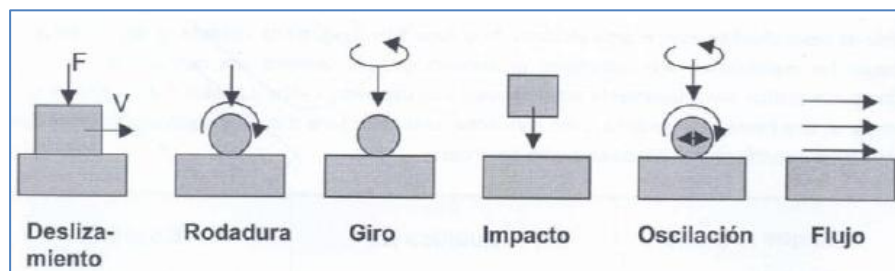


Figura 2. 24 Tipos de acciones mecánicas sobre los materiales (18)

Al igual que la fricción, el desgaste es complejo, generalmente involucra varios mecanismos en la forma como se remueve el material, lo que genera cambios irreversibles en la superficie o bien en la sub superficie. Y esto repercute en el funcionamiento correcto de los sistemas. De igual forma afecta el aspecto económico (16). Una de las formas de aumentar la resistencia al desgaste en los componentes es incrementando dureza de las superficies.

Aunque el comportamiento del desgaste no solo depende de la dureza, la temperatura y la carga, además existen otros factores de igual importancia que afectan o determinan las características del desgaste que son (17):

1. Variables relacionadas con la metalurgia:
  - Dureza
  - Tenacidad
  - Constitución y estructura
  - Composición química.
2. Variables relacionadas con el servicio:
  - Materiales en contacto
  - Presión
  - Velocidad
  - Acabado de la superficie
3. Otros factores que contribuyen:
  - Lubricación
  - Corrosión

Experimentalmente se ha demostrado la influencia de la temperatura en el desgaste en la Figura 2. 25 Tasa de desgaste en función de la temperatura se observa que el material "A" es más resistente que el material "B" esto antes de llegar a la temperatura "T" donde empieza a reblandecerse, mientras que el material "B" se mantiene casi constante en su tasa de desgaste.

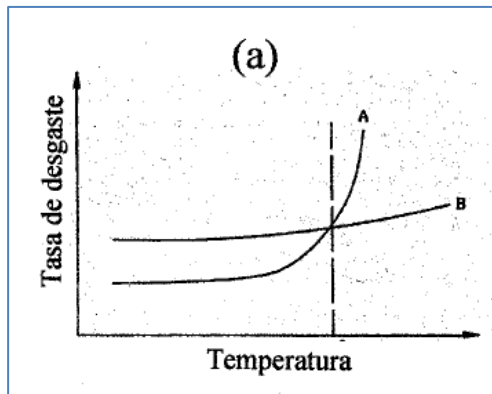


Figura 2. 25 Tasa de desgaste en función de la temperatura (13)

### Clasificación del desgaste:

Existe una variedad de mecanismos que generan el desgaste, a continuación se muestra la clasificación de los mecanismos de desgaste más aceptada hasta la actualidad publicada por Burwell en 1957 (13).

- a) Desgaste por adhesión
- b) Desgaste por abrasión
- c) Desgaste por fatiga
- d) Desgaste por corrosión

A continuación se describen de manera general estos diferentes mecanismos, profundizando más en los mecanismos que afectan al componente que se está estudiando en esta tesis.

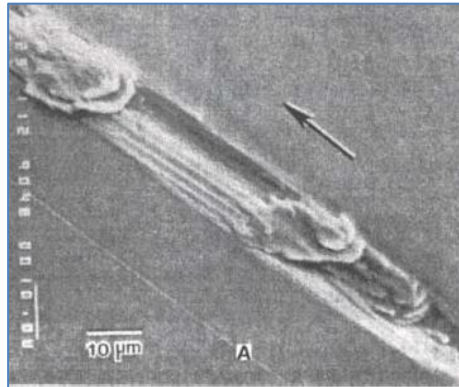
#### a) Desgaste por adhesión:

Ocurre cuando se encuentran en contacto dos superficies y se desplazan una sobre la otra donde las crestas de las superficies en contacto fluyen plásticamente, formando fuertes uniones endurecidas (soldadura en frío) a medida que se rompen por la tracción tangencial, por lo que los sólidos

desprenden material. Existe una gran influencia de varios parámetros sobre este mecanismo entre los que se encuentran:

- Estructura electrónica
- Estructura cristalina
- Orientación del cristal
- Fuerza cohesiva

En la Figura 2. 26 se muestra el desgaste adhesivo, en donde se observa el desprendimiento de las asperezas al unirse con el material que se desliza sobre estas. La fuerza de las uniones depende en gran parte de la naturaleza física y química de las superficies en contacto (13).



**Figura 2. 26 Micrografía de una superficie desgastada por adhesivo (14)**

Concluyendo, el desgaste adhesivo es vulnerable a casi cualquier alteración del tribosistema, por lo que se recomienda el estudio previo del material bajo las condiciones en las que se aplicara, así como evitar los factores que aumentan el desgaste en estos.

#### **b) Desgaste por abrasión:**

La sociedad americana de materiales (ASM, por sus siglas en inglés) considera que el desgaste abrasivo es debido a protuberancias o partículas

duras que son forzadas y movidas a lo largo de una superficie de un sólido más blando, teniendo como resultado una pérdida de material o rayado de la misma (14). Sin embargo esta apreciación resulta un tanto general, por ello se emplea una de carácter más específica, en donde la abrasión es generada por las partículas duras que se introducen entre dos superficies más blandas, que se deslizan e interactúan mutuamente. Las partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el producto del desgaste de las mismas que tienden a cortar y o arrancar material de la superficie, generando virutas y o causando deformación plástica severa (17). En el caso de que las partículas sólidas impacten las superficies, se le conoce como erosión, lo cual puede ser considerado como un mecanismo del desgaste abrasivo (13).

Cuando dos superficies están en contacto y movimiento relativo, se presenta el fenómeno de desgaste en ambas, donde una de ellas, es más dañada que otra, esto no solo debido a las propiedades del material y a las condiciones superficiales, sino que también depende de la velocidad de contacto, medio ambiente, tipo de carga así como la presencia y naturaleza del abrasivo (14) (17).

### Clasificación del desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo se puede clasificar de acuerdo a su tipo de contacto entre las superficies, como abrasión de dos o tres cuerpos y erosión como lo muestra la Figura 2. 27 Clasificación del desgaste abrasivo por el tipo de contacto a) Abrasión de dos cuerpos, b) Abrasión de tres cuerpos, c) Erosión .

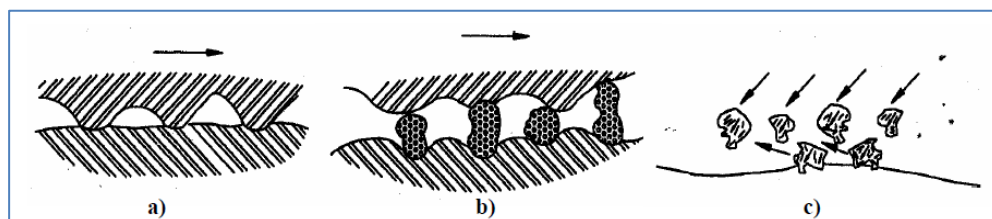


Figura 2. 27 Clasificación del desgaste abrasivo por el tipo de contacto a) Abrasión de dos cuerpos, b) Abrasión de tres cuerpos, c) Erosión (17)



El desgaste abrasivo de dos cuerpos se produce cuando las asperezas de una superficie dura presionan sobre otra más suave, al estar en movimiento relativo se genera el daño en esta última, ya sea por deformación o por desprendimiento de material. Para el caso, en que entre ambas superficies se encuentren presentes partículas duras, las cuales se encargan de transmitir las cargas entre las superficies, esto se conoce como desgaste abrasivo de tres cuerpos, generando el mismo tipo de daño. El desgaste erosivo se inicia cuando partículas duras, líquidos, o una mezcla de estos se impactan sobre una superficie sólida, generando un desprendimiento de material donde los ángulos de incidencia entre 15 a 30 grados muestran una mayor tasa de desgaste para materiales dúctiles (13).

#### **c) Desgaste por Fatiga:**

Este desgaste está presente cuando los materiales están sometidos a grandes esfuerzos cíclicos, provocando propagación de grietas por la acción repetitiva de las fuerzas. Cuando existen piezas sometidas a deslizamientos las superficies son deformadas por la acción simultánea de las tensiones de contacto y la fuerza de fricción, los esfuerzos a los que están sometidos los materiales particularmente en las capas superficiales, promueven en la mayoría de los casos, alteraciones en la estructura cristalina y en el tamaño de grano (14).

#### **d) Desgaste por corrosión:**

La corrosión por definición es el fenómeno que deteriora un material por acción química o electroquímica del medioambiente. En relación con el desgaste resulta ser la degradación acelerada de los materiales debido al movimiento relativo entre las superficies. El proceso de desgaste corrosivo se da cuando los productos de la reacción son removidos por el movimiento relativo de las superficies, en materiales que forman capas pasivas es acelerado cuando esta capa es débil (14).

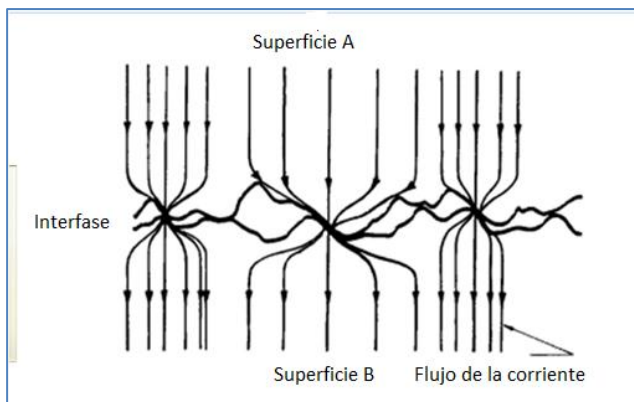
### **Desgaste por Erosión Eléctrica:**

Este tipo de desgaste ocurre cuando la corriente eléctrica pasa entre dos superficies metálicas (por ejemplo, el elemento rodante y la pista) a través de la película lubricante de aceite o grasa o puede ser por medio de un contacto seco. Se subdivide en la severidad del desgaste. La erosión eléctrica no debe ser confundida con la erosión causada por partículas. Voltaje Excesivo (picadura eléctrica) es causado por una elevada corriente eléctrica o amperaje que pasa a través de alguna de las asperezas de la superficie del metal. La elevación del voltaje origina arcos, que causan calor/fundición y vaporización en áreas localizadas en la superficie del metal. Esto causa cráteres grandes y profundos o picaduras en la superficie del metal, que pueden ser equivalentes al espacio entre los elementos rodantes de los rodamientos

Fugas de corriente (acanalado eléctrico) es una forma menos severa de daño causado por una corriente continua de baja intensidad. El daño puede ser en forma de cráteres superficiales estrechamente colocados y de una coloración gris oscura. Si la descarga eléctrica ocurre mientras el rodamiento está en movimiento, con una lubricación a película gruesa, el efecto ondulaciones aparece en el total de la pista del rodamiento y es llamado acanalado (19).

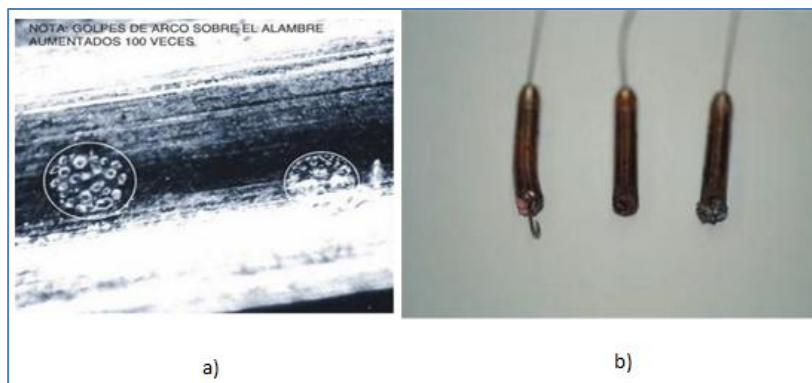
De manera que sabemos que el resultado final de un contacto de arco es una vida útil corta del componente, dependiendo de la severidad y duración del arco y la frecuencia en que se da éste, se produce la erosión, provocando una pérdida de material de contacto (20).

En la Figura 2.28 se muestra un esquema de la interface eléctrica entre los dos materiales que están en contacto y dentro de los cuales se transmite la corriente de uno a otro en diferentes puntos de contacto.



**Figura 2.28 Diagrama esquemático de la interface eléctrica (20)**

En la Figura 2. 29 se muestra los efectos del arco que se produjo entre el alambre de soldadura y la punta de contacto, esto sucede más cuando existe una holgura de más entre el orificio de la punta de contacto y el electrodo, de igual forma en la imagen b) se muestra los efectos del sobrecalentamiento (distorsión), provocada por los arcos en las puntas de contacto.



**Figura 2. 29 Fotografías a) Golpes de arco sobre el alambre consumible b) deformación de las puntas por el sobrecalentamiento del trabajo (3).**

El desgaste por erosión eléctrica se utiliza de una manera controlada para mecanizar componentes por un método llamado “electro erosión”. Éste proceso consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conducir las formas deseadas. Ambos pieza y electrodo deben de ser conductores para que

pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque del material. Donde se pueden obtener algunos componentes que son de formas muy caprichosas y que solo se pueden mecanizar por este medio (19).

## **2.3 Cobre**

### **2.3.1 Introducción**

El cobre es un metal importante y un elemento esencial utilizado por el hombre, este y sus aleaciones constituyen uno de los principales grupos de metales comerciales, ampliamente utilizados debido a sus excelentes conductividades térmica y eléctrica, excelente resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y buena resistencia a la fatiga. Generalmente son no magnéticos. Muchos cobres y aleaciones de cobre pueden ser soldados por diversos gases, arco y métodos de resistencia. Las aleaciones de cobres se pueden pulir a casi cualquier textura y lustre deseado (21).

El cobre es uno de los recursos naturales más importantes del mundo. No sólo por su valor intrínseco sino para los muchos usos que se le pueden dar todos los días. El cobre y aleaciones de cobre se utilizan para el transporte de la electricidad desde y en nuestros hogares y negocios. El cobre es el conductor eléctrico principal para los electrodomésticos y la electrónica. Se utiliza en aplicaciones durables y decorativas, como techos de cobre, herrajes para puertas, barandillas y elementos decorativos. Se utiliza en nuestros coches y aviones y en nuestros sistemas de plomería.

El cobre se entrelaza con la historia del progreso de la humanidad. Su papel crucial en nuestros hogares, en el transporte, así como en la infraestructura y en nuestras industrias es omnipresente (22).

### **2.3.2 Historia del cobre**

El uso del cobre se remonta a los orígenes de la civilización, cuando en algún lugar del mundo el ser humano dejó de depender de las herramientas de piedra y comenzó a usar un metal disponible en la naturaleza, manipulable, dúctil y con una resistencia hasta entonces desconocida (23). Fue descubierto y utilizado hace unos 10.000 años antes. De manera que es el metal más antiguo y el primer material de ingeniería conocido por el hombre, desde entonces ha sido un material esencial para el hombre (22).

Se encuentra en depósitos de mineral de todo el mundo, y una de las principales "edades" o etapas de la historia de la humanidad se nombra para una aleación de cobre, que es el "bronce". El cobre y sus muchas aleaciones han jugado un papel importante en muchas civilizaciones, desde los antiguos egipcios, romanos a las culturas de hoy en día en todo el mundo (22).

Aunque su uso perdió importancia relativa con el desarrollo de la siderurgia, el cobre y sus aleaciones siguieron siendo empleados para hacer objetos tan diversos como monedas, campanas y cañones. A partir del siglo XIX, concretamente de la invención del generador eléctrico el cobre se convirtió de nuevo en un metal estratégico, al ser la materia prima principal de cables e instalaciones eléctricas.

Hoy en día, los usos del cobre se han ampliado para incluir la calefacción, la refrigeración, cableado eléctrico, la electrónica, la generación y transmisión de energía, aplicaciones de automoción, usos antimicrobianos y muchos más (22).

### **2.3.3 Producción del cobre**

Hay dos tipos básicos de minerales de cobre: minerales de sulfuro y óxidos minerales. Cada tipo de mineral requiere diferentes técnicas de extracción y procesamiento. Minerales de sulfuro incluyen: bornita, calcocita y calcopirita, mientras que los minerales de óxido incluyen: malaquita, azurita y crisocola.

Estos minerales se extraen de la mina y se transportan a la planta para su procesamiento y refinación.

El procesamiento varía ligeramente dependiendo del tipo de mineral que se está extrayendo. Los sulfuros primero se envían a una trituradora para reducir las rocas a unos 7-8 centímetros, este material se alimenta a un molino secundario que reduce más el tamaño de alrededor de 1-2 pulgadas. El siguiente paso es alimentar el mineral triturado en un proceso de molienda en húmedo en molinos de volteo para reducir aún más las partículas con el tamaño óptimo para el proceso de flotación que sigue.

Los minerales de sulfuro se mezclan con agua y productos químicos especiales que crean una suspensión. La suspensión, cuando se agita hace que los minerales de sulfuro de cobre floten, momento en el que se desnata la superficie, el material recolectado se seca. A este material se le llama concentrado el cual se envía entonces a la fundición, en el que se reduce y se funden en varias operaciones. Al final de este proceso de fusión, el cobre es aproximadamente 99% puro.

Si bien esto puede parecer alto, todavía no es lo suficientemente puro para aplicaciones eléctricas, por lo que se requiere un procesamiento, adicional. Después de la fusión, el material de cobre 99% puro se vierte en moldes de "ánodos", utilizando una rueda de colada y transportadas hasta la sala de chapado. Después de esto están listos para el siguiente paso, que consiste en la disolución y re-chapado del cobre para aumentar su nivel de pureza. Los ánodos de 99% de cobre puro se envían a la refinera electrolítica para su purificación en cátodos de cobre muy puros. Ellos se sumergen en un tanque de electrolito. El electrolito es una solución acuosa de ácido sulfúrico y sulfato de cobre. El cobre se disuelve fuera del ánodo y se cultiva en placa sobre el acero inoxidable, mientras que todas las impurezas permanecen en el electrolito. Después de 7 - 14 días, el traslado al cátodo es completado y se retira del tanque. El cobre se elimina de la hoja de acero inoxidable, se lava y se envía a

los clientes. Ahora está listo para ser convertido en productos que todos conocemos.

Mientras que los minerales de óxido generalmente sólo se trituran antes del procesamiento adicional, la lixiviación, y no requiere el mismo tamaño de partícula pequeño como de flotación, este consiste en que se colocan sobre una plataforma de lixiviación y se saturaran con soluciones de ácidos débiles que disuelven el contenido mineral de cobre. La solución que contiene cobre resultante se recoge y se bombea a una planta de extracción con disolvente. Se procesa a través de una serie de pasos que combinan un solvente orgánico o ácido sulfúrico en solución, hasta que la concentración de cobre es lo suficientemente alta para galvanoplastia eficaz. La solución que contiene cobre, de las operaciones de extracción con disolventes, se recuperaron en cátodos de cobre puro usando un proceso llamado extracción electrolítica. Bloques de acero inoxidable se sumergen a los tanques de galvanoplastia para actuar como cátodos, el cobre se adhiere sobre ellos por deposición electroquímica. Se tarda aproximadamente una semana antes de que el cátodo esté listo para ser retirado del tanque, y el cobre pueda ser retirado de los bloques de acero inoxidable. Los cátodos son ahora de cobre 99.99% puro y listo para ser convertido en alambre, tubo o cualquier número de productos útiles.

Los cátodos son enviados a diversas plantas de producción para que sea convertido en: varilla, alambre, cable, tubo, formas tubulares especiales, hojas, tiras y placas. Durante la producción de materiales de cobre con forma, se añaden otros metales para darle al cobre propiedades adicionales. Estos elementos de aleación añaden resistencia, ductilidad, durabilidad, protección contra la corrosión y otras propiedades. Todas estas formas de productos de cobre y sus aleaciones se utilizan para hacer productos que usamos todos los días. El cobre es un material importante para la mejora de nuestra calidad de vida (22).

### 2.3.4 Características del cobre

El cobre es esencial para la vida moderna. Suministra electricidad y agua limpia a nuestros hogares y ciudades y hace una importante contribución al desarrollo sustentable. Más que eso, es esencial para la vida misma. Es un elemento natural del cual aún se tienen bastos yacimientos aun sin extraer, tiene una infinidad de usos y aun se le siguen encontrando nuevas aplicaciones, es de los mejores conductores de calor y de corriente eléctrica, se utiliza mucho en ornamentos artísticos por los diferentes colores y acabados que puede tomar así como por su gran resistencia, tiene la cualidad de ser antimicrobiano, es fácil de unir por diferentes procesos de soldadura, es un elemento versátil, maleable, dúctil que también se utiliza para la elaboración de instrumentos musicales. Además es un metal duradero, ya que se puede reciclar un número casi ilimitado de veces sin que pierda sus propiedades mecánicas (22).

#### **Propiedades del cobre:**

##### **1) Físicas:**

La conductividad eléctrica del cobre puro fue adoptada por la Comisión Electrotécnica Internacional en 1913 como la referencia estándar para esta magnitud, establecido en el estándar internacional del cobre recocido (IACS, por sus siglas en inglés). Según esta definición, la conductividad del cobre recocido medida a 20 °C es igual a  $5.80 \times 10^7$  S/m. A este valor de conductividad se le asigna un índice 100% IACS y la conductividad del resto de los materiales se expresa en porcentaje de IACS. La mayoría de los metales tienen valores de conductividad inferiores a 100% IACS pero existen excepciones como la plata o los cobres especiales de muy alta conductividad designados C-103 y C-110 (23).



## 2) Mecánicas:

Tanto el cobre como sus aleaciones tienen una buena maquinabilidad, es decir, son fáciles de mecanizar. El cobre posee muy buena ductilidad y maleabilidad lo que permite producir láminas e hilos muy delgados y finos. Es un metal blando, con un índice de dureza 3 en la escala de Mohs (50 en la escala de Vickers) y su resistencia a la tracción es de 210 MPa, con un límite elástico de 33.3 MPa. Admite procesos de fabricación de deformación como laminación o forja, y procesos de soldadura y sus aleaciones adquieren propiedades diferentes con tratamientos térmicos como temple y recocido (23), en la tabla 2.2 se mencionan algunas características de este material.

**Tabla 2.2 Características y propiedades físicas de cobre (22)**

Información	General	Propiedades	Físicas
Nombre	Cobre	Estado ordinario	Sólido
Símbolo	Cu	Densidad	8960 kg/m <sup>3</sup>
Numero Atómico	29	Punto de fusión	1084 °C
Masa atómica	63,536u	Punto de ebullición	2927 °C
Dureza Mohs	3	Entalpia de vap.	300 kJ/mol
Estructura crist.	CCC	Entalpia de fusión	13.1 kJ/mol
Vel. de sonido	3570 m/s (20 °C)	Cond. Eléctrica	58.108x10 <sup>6</sup> S/m
Estado magnético	Diamagnético	Cond. Térmica	400 W/(K.m)

### 2.3.5 Aleaciones de cobre

Para muchas aplicaciones, las propiedades de cobre se pueden personalizar fácilmente. Esto se logra mediante la aleación: hacer un nuevo metal de dos o más metales diferentes. Las familias de aleaciones de cobre más conocidas son de latón (cobre y zinc), bronce (cobre y estaño) y el cobre-níquel. Estas son las que representan familias de aleaciones, todos hechos por la variación de la cantidad de elementos de aleación específicos. Las aleaciones se pueden hacer para lograr ciertos colores, mejorar la fuerza o la

resistencia a la corrosión, mejorar la conformación e incremento de propiedades, o alcanzar cualquier número de demandas específicas que los elementos individuales no pueden lograr por sí solos. Mediante la combinación de cobre con otros metales y el ajuste de los porcentajes, se hacen aleaciones para adaptarse a casi cualquier aplicación. Hay más de 800 aleaciones de cobre registrados en los Estados Unidos (23).

Junto con su fuerza, la resistencia a la fatiga, y su capacidad de tomar un buen acabado, los principales criterios para la selección del cobre y de sus aleaciones son (24):

- Resistencia a la corrosión
- Conductividad eléctrica y térmica
- Color
- Facilidad de fabricación

Como se mencionó anteriormente el cobre puro es dúctil por naturaleza, pero se puede endurecer por una serie de mecanismos que pueden ser trabajado en frío, solución sólida, endurecimiento por precipitación y fortalecimiento por dispersión (25).

# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

### **3.1 Metodología experimental**

El diagrama de flujo de la Figura 3.1 esquematiza de manera general la metodología experimental llevada a cabo en esta tesis. Para posteriormente abordar a detalle cada uno de los procedimientos que se siguieron, es decir describir paso a paso de qué manera fue realizada la metodología experimental, mencionando además las diferentes consideraciones que se tomaron en cuenta en cada una de estos pasos.

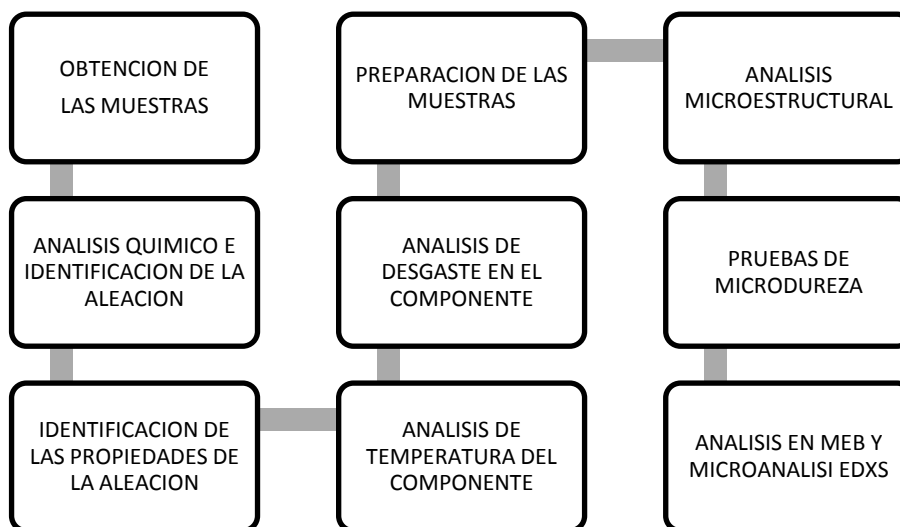


Figura 3.1 Metodología experimental

### 3.1.1 Obtención de las muestras

Se obtuvieron 30 puntas de contacto nuevas de la planta en donde se llevó a cabo la experimentación, a estas se les realizaron mediciones de sus diámetros interno y externo, así como de su longitud y se identificaron con una numeración. Se seleccionaron estaciones de trabajo que tienen un alto consumo de este componente y que de igual manera trabajan con algunos de los parámetros de soldadura más altos que son utilizados en la planta; fue en estas estaciones donde se colocaron las puntas de contacto ya identificadas dándoles seguimiento durante varios días, hasta que presentaron falla en su funcionamiento y se retiraron del proceso. Cabe mencionar que se contó con el apoyo de los soldadores de cada una de las estaciones de trabajo; los cuales estaban al tanto del estudio y utilizaban las puntillas hasta que estas ya no cumplían con su función. En los casos en los que el componente seguía en buenas condiciones para el siguiente turno, se retiraba de la pistola de soldar y se volvía a colocar al día siguiente en la misma estación y con el mismo soldador, y así sucesivamente hasta el momento en que dejara de funcionar correctamente.

### 3.1.2 Análisis químico e identificación de la aleación

Dentro de las 30 puntas que se obtuvieron de la planta, una de ellas no se utilizó en el proceso de soldadura. Si no que se destinó para análisis químico, para el cual fue necesario el servicio de un laboratorio externo el cual por espectrometría de plasma obtuvo los elementos presentes en este componente. Se compararon los elementos constitutivos de la punta de contacto ver Tabla 3.1 contra diferentes aleaciones de cobre de alta pureza identificando de esta manera el tipo de aleación, resultando ser cobre C12200 ver Tabla 3.2.

**Tabla 3.1 Elementos presentes en el analisis de la punta de contacto**

	Cu	Al	P	Si	Cr	Mg	Mo	Mn	Zn	Ti	V
% Peso	Balance	0.001	0.020	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.061	<0.001	<0.001
	Zr	Fe	Sn	Pb	Sb	Co	Cd	Ni			
% Peso	<0.001	0.012	0.002	0.004	0.001	<0.001	<0.001	0.001			

**Tabla 3.2 Composición química del cobre C12200 DHP (22)**

Composición Química	Elemento Cu	Elemento P
Min (%)	99.9	0.015
Max (%)		0.04

### 3.1.3 Identificación de las propiedades de la aleación

Una vez identificada la aleación del componente como C12200 se procedió a obtener sus propiedades físicas y mecánicas, en la página oficial de la asociación de desarrollo de cobre (CDA, por sus siglas en ingles) (22). Información necesaria como punto de partida para comprender el comportamiento del material ante las condiciones de trabajo a las que está sometido el componente. Cabe mencionar que la aleación de cobre C12200 es la aleación de cobre más común utilizada para la fabricación de puntas de contacto (26) (25).

En la Tabla 3.3 y en la Tabla 3.4 se enlistan algunas de las propiedades más importantes de la aleación de Cobre C12200 (desoxidado alto residuo de Fosforo - DHP)

**Tabla 3.3 Propiedades mecánicas del cobre C12200 DHP (22)**

Forma	Resistencia a la tensión	Elongación	Dureza Rockwell B
Tubo	45 ksi	10 %	50

**Tabla 3.4 Propiedades físicas del cobre C12200 DHP (23)**

Punto de fusión	Densidad	Conductividad eléctrica	Conductividad térmica
1082 °C	8.94 gr/cm <sup>3</sup> a 20 °C	85% IACS A 20 °C	339.47 W/m a 20 °C
Coef exp térmico	Calor específico	Módulo de rigidez	Módulo de elasticidad
16.435	385.48 J/kg °C	44126.72 Mpa	117211.6 Mpa

### 3.1.4 Análisis de temperatura del componente

Esta prueba se realizó con una de las puntillas nuevas y en una estación de trabajo fuera de las líneas de producción replicando las condiciones de trabajo utilizadas en las estaciones donde se colocaron las muestras y las cuales se observan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Parámetros de soldadura utilizados**

Voltaje	Corriente	Gas	Flujo de gas	Velocidad de alimentación	Velocidad de soldadura	Sobresaliente
32 V	330 amp.	Ar + 10%CO <sub>2</sub>	45 cfh	16.5 m/min	510 mm/min	25 mm

La manera en que se obtuvo la temperatura de trabajo se muestra en el esquema de la Figura 3.2. Para esta medición fue necesario realizar una perforación a la tobera muy cercana al extremo de la pistola, en donde se

introdujo un termopar hasta donde pudiera censar la temperatura en la punta de contacto, una vez en esta posición se fijó a la pistola y se procedió a soldar de modo manual con la ayuda de un soldador, llevando una lectura y registro de las mediciones de temperatura alcanzadas por el componente.

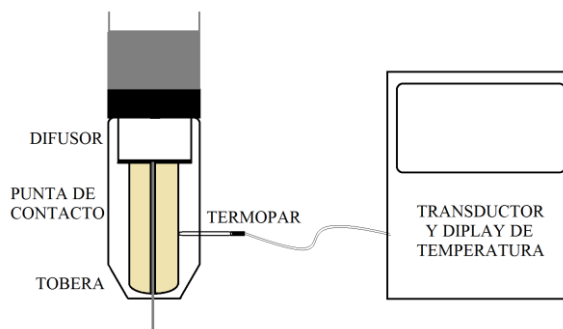


Figura 3.2 Esquema de la medición de temperatura del componente

### 3.1.5 Análisis de desgaste en el componente

Una vez recolectadas las puntillas de las estaciones de trabajo anteriormente mencionadas se sometieron a una limpieza en dos pasos la primer parte de esta limpieza fue por ultrasonido durante 50 min, la segunda parte de esta fue desbastado con lija del número 600, con la finalidad de eliminar desechos, suciedad y las restos de salpicadura del frente de la puntilla antes de tomar las imágenes en donde se mediría el desgaste como se muestra en la Figura 3.3. Se midió el área del orificio sin desgastar, es decir antes de soldar, a esta área se le llamo  $A_o$ , después se midió el área desgastada del orificio, es decir después de soldar, a esta área se le llamo  $A_t$ , y se utilizó la ecuación 1 para presentar el desgaste relativo como  $W_t$  en porcentaje de pérdida de peso.

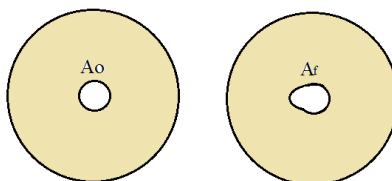


Figura 3.3 Esquema de la medición del desgaste de la punta de contacto, vista superior.

$$Wt(\%) = \frac{A_t - A_0}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

### 3.1.6 Preparación de las muestras

Una vez medido el desgaste en las puntillas se les realizó un corte longitudinal como se muestra en la Figura 3.4 y se revisó la superficie del orificio de la punta de contacto con ayuda del estereoscopio, tomando imágenes de las condiciones en las se encuentra la canal (antes orificio) después de que ya la puntilla fue utilizada para soldar, para presentar un análisis de los cambios superficiales del orificio. Posterior a esto se les realizó otro corte a las muestras, esta vez de manera transversal y se realizaron los pasos de montaje en baquelita como se muestra en la Figura 3.5, desbaste en lijas número 400 y 600, pulido fino con pasta de diamante de 1 micra y pulido en baño coloidal de sílica de 0.4 micras para finalmente atacar con reactivo: bicromato de potasio  $K_2Cr_2O_7$  aplicado con algodón humedecido por un tiempo aproximado de 8 seg. Procedimiento realizado a muestras donde se midió la dureza como para muestras donde se observó la microestructura y los cambios que en ella sucedieron; realizándolo a puntas de contacto antes y después de ser utilizadas para soldar.

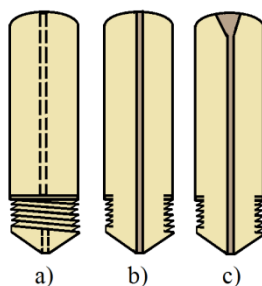


Figura 3.4 Vista de la punta de contacto nueva a) completa b) con corte longitudinal y c) usada con corte longitudinal.



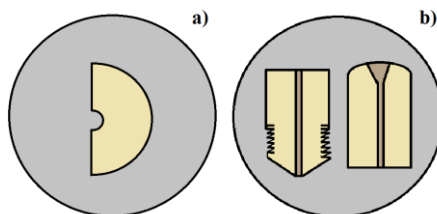


Figura 3.5 Punta de contacto montada para a) metalografía y b) pruebas de durezas.

### 3.1.7 Análisis de la microestructura

Con ayuda del microscopio óptico se tomaron imágenes a diferentes magnificaciones de las muestras ya preparadas, para poder identificar los cambios en su microestructura, en este caso los fenómenos de recristalización y crecimiento de grano, tomando imágenes de muestras nuevas, es decir 0 minutos de tiempo arco y muestras que trabajaron 70, 90, 120, 152, 170, 250, 300 y 600 minutos de tiempo arco, cabe mencionar que una vez tomadas la micrografía fue necesario el uso de un analizador de imágenes para realizar la medición de tamaño de grano del material por el método de intercepción como lo marca la norma ASTM E112 – 96. Métodos de prueba estándar para determinar el tamaño de grano promedio (27).

### 3.1.8 Mediciones de dureza Vickers

Las mediciones de dureza en los componentes se realizaron a las puntas seccionadas longitudinalmente y se fueron 10 mediciones en total a cada componente 5 a cada extremo de la punta de contacto en el orden en el que se muestran en la Figura 3.6, tanto en el componente antes de soldar como en el componente que ya estuvo sometido a el proceso de soldadura.

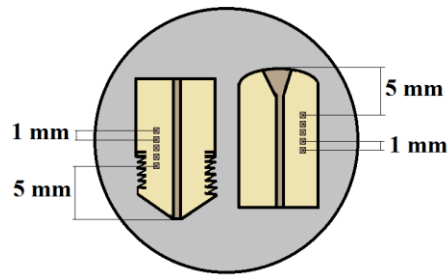


Figura 3.6 Muestra preparada de la punta de contacto donde se observan los puntos de medición de la dureza.

### 3.1.9 Análisis por MEB y EDS

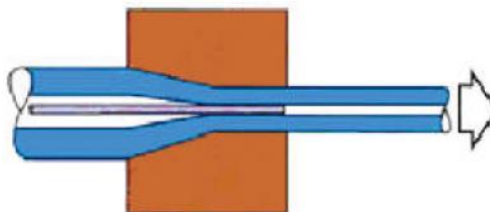
Por último con la ayuda del microscopio electrónico de barrido (MEB) se analizaron algunas muestras significativas en donde se notaban cambios en la superficie del orificio de la punta de contacto. Se tomaron algunas imágenes a diferentes aumentos en ciertas zonas de interés, y se realizaron microanálisis para identificar los elementos presentes en estas áreas y de esta manera conocer los fenómenos ocurridos en el interior del componente. Así mismo esta técnica de caracterización avanzada fue utilizada para identificar los mecanismos de desgaste presentes en el orificio de las puntas de contacto.

## 3.2 Materiales y equipos

### 3.2.1 Descripción del material

El material del cual está fabricada la punta de contacto se identificó como una aleación de cobre C12200, esta aleación de cobre es la más común utilizada para la fabricación de puntas de contacto, otras aleaciones comúnmente usadas son cobre-cromo (C18200), cobre-plata, y cobre-cromo-zirconio (C18100) cada una se utiliza bien para aplicaciones específicas (26) (25).

El proceso de fabricación de las puntas de contacto es por extruido como se muestra en la Figura 3. 7 el cual modifica las propiedades mecánicas del material por el trabajo en frío. En este proceso en el último paso por el dado se le genera el orificio interno con un mandril el cual determina la forma y la medida del orificio. La superficie interior del tubo de contacto debe ser liza para que el electrodo se alimente con facilidad a través del tubo sin dejar de mantener un buen contacto eléctrico. En general, el agujero del tubo de contacto debe ser entre 0.13 y 0.25 mm (0.005 y 0.010 pulg) mayor que el alambre empleado.



**Figura 3. 7 Proceso de extrusión en la fabricación de las puntas de contacto.**

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de fases binario para estos dos elementos que componen a las puntas de contacto analizadas en este estudio.

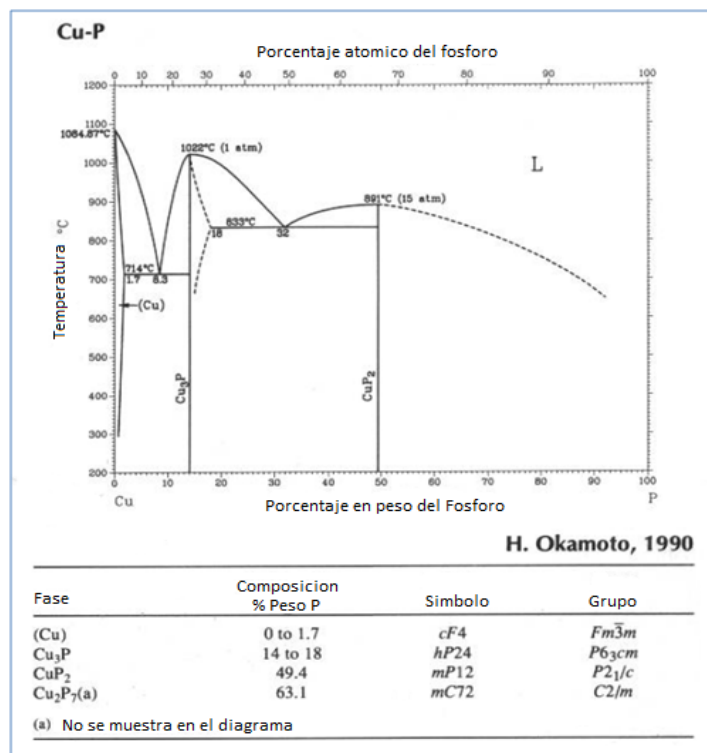


Figura 3.8 Diagrama de fases binario Cu-P (25)

### 3.2.2 Descripción del equipo

#### De soldadura:

Las pruebas de temperatura se realizaron en el taller de capacitación de la planta donde fue realizado el estudio, con un equipo de soldar igual que el que se encontraba en las diferentes estaciones de trabajo que se analizaron.



Figura 3.9 Equipo de soldar a) Miller Deltaweld 652 b) alimentador de electrodo Miller

**De laboratorio:**

Los equipos que se necesitaron para realizar el análisis en las puntas de contacto fueron:

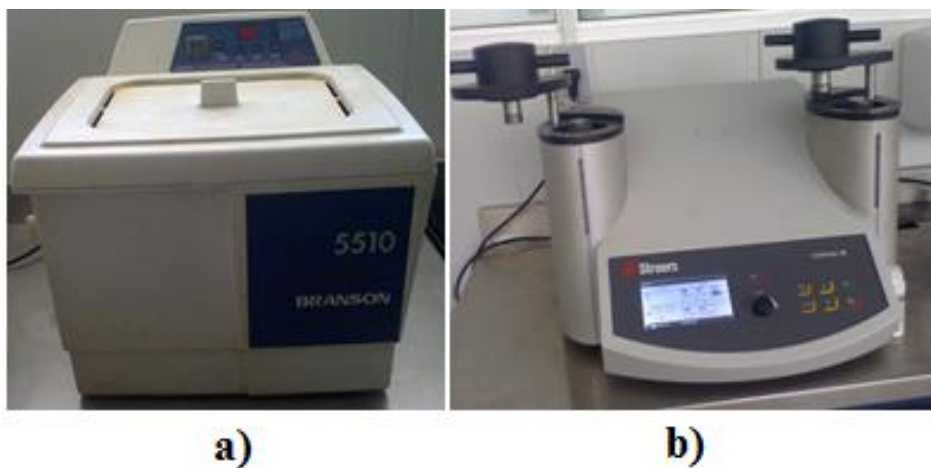


Figura 3.10 a) Limpiador ultrasonico Branson 5510 b) montadora Struers Citompress 20

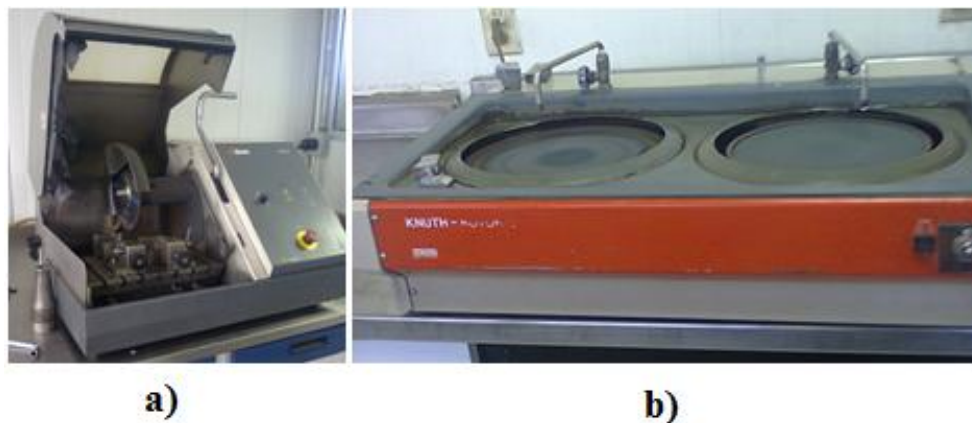


Figura 3.11 a) Cortadora Struers Discotom-6 y b) desbastadora metalografica Knuth

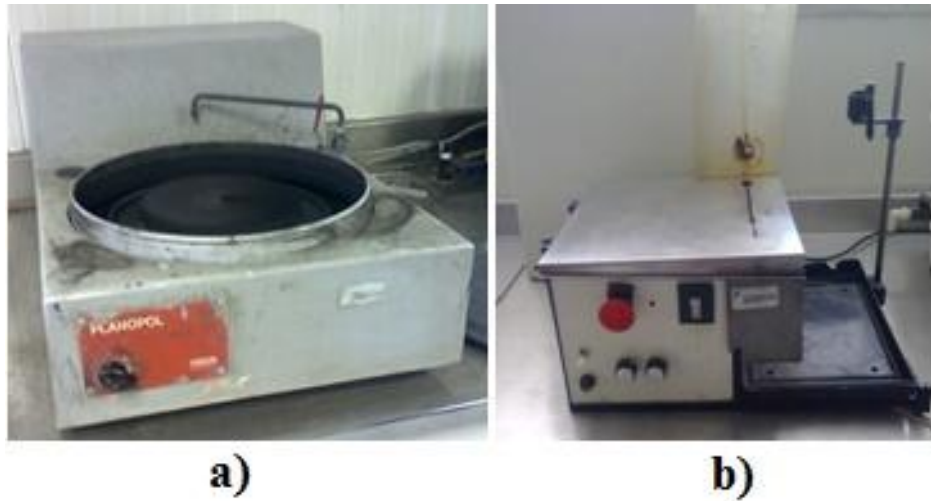


Figura 3.12 a) Pulidora Struers Planopol y b) cortadora de disco de diamante

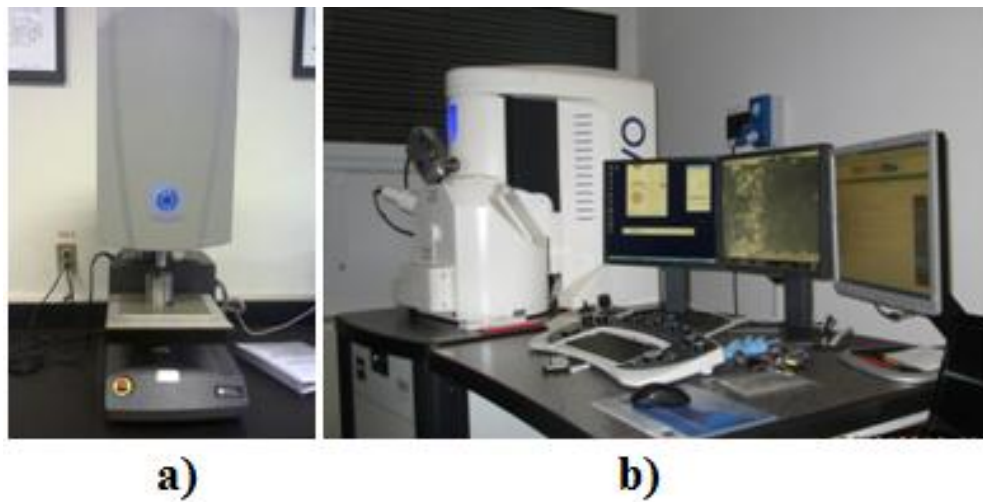


Figura 3.103 a) Microdurómetro Wilson Hardness y b) MEB JEOL JSM-6490LV

# CAPÍTULO 4

## ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Temperatura de trabajo del componente

El comportamiento de la temperatura de la punta de contacto en función del tiempo cuando se encuentra trabajando bajo los parámetros

Tabla 3.6 Parámetros de soldadura utilizados

Voltaje	Corriente	Gas	Flujo de gas	Velocidad de alimentación	Velocidad de soldadura	Sobresaliente
32 V	330 amp.	Ar + 10%CO <sub>2</sub>	45 cfh	16.5 m/min	510 mm/min	25 mm

En la Figura 4.1 En donde se observa que la temperatura máxima alcanzada por la punta de contacto es de 850 °C después de 180 segundos y es alrededor de esta temperatura donde se estabiliza.

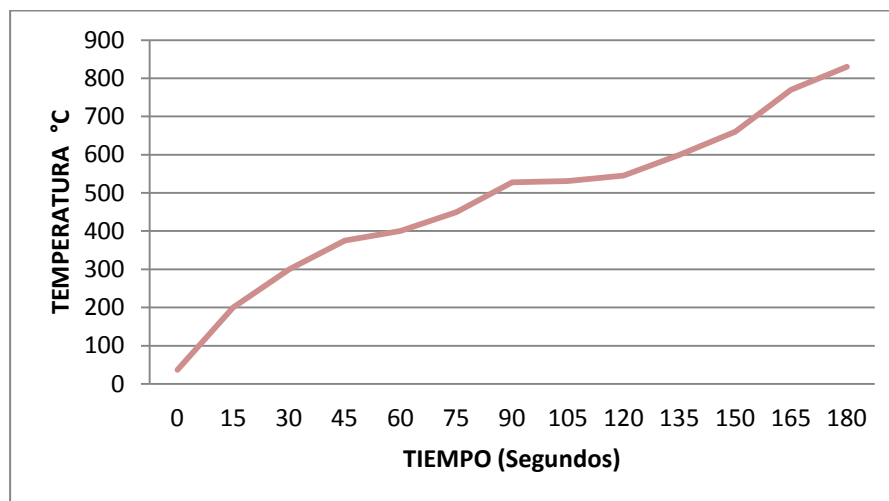


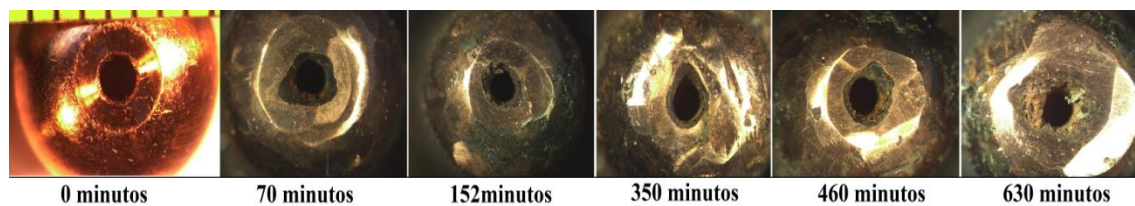
Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura del componente en función del tiempo.

Este comportamiento indica la temperatura a la que se encuentra trabajando el componente la mayor parte del tiempo y esto sirve para contemplar los fenómenos naturales recristalización y crecimiento de grano que le sobrevienen al material sabiendo que por su proceso de fabricación cuenta con deformación por el trabajo en frío al que fue sometido.

## 4.2 Mediciones de desgaste

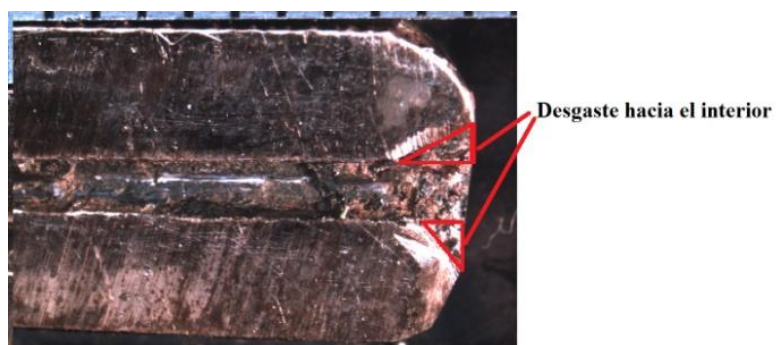
Las mediciones de desgaste en la puntas de contacto se realizaron de acuerdo a lo descrito en apartado 3.1.5 midiendo el orificio sin degastar y el orificio de la punta de contacto cuando ya fue expuesta al proceso de soldadura, en la Figura 4.2 se muestra un avance progresivo del desgaste en el área del orificio en función del tiempo arco que soporto cada una de las puntas de contacto.





**Figura 4.2 Desgaste en muestras a diferentes tiempos arco**

Mientras que en la Figura 4.3 se observa el desgaste generado hacia el interior del componente, aunque es posible observar pérdida de la forma cilíndrica del orificio en uno de sus extremos no es posible llevar a cabo una medición del desgaste sobre estas punta seccionada, ya que al momento de seccionarla se perdió 0.5 mm del componente en la parte del orificio.



**Figura 4.3 Desgaste hacia el interior del componente**

En la Tabla 4.1 de mediciones de desgaste relativo se perciben valores por encima del 100%, esto es porque en la ecuación 1 el área de referencia para presentar el desgaste relativo es la del orificio interno de la punta de contacto antes de someterse al proceso de soldadura la cual es  $A_0 = 1.54 \text{ mm}^2$ .

Tabla 4.1 Resultados de las mediciones de desgaste relativo.

Muestra (numero)	Área At mm <sup>2</sup>	Wt % peso	tiempo min	Muestra (numero)	Área At mm <sup>2</sup>	Wt % peso	tiempo min
10	2.661	72.792	25	7	2.043	32.662	200
20	2.609	69.415	45	2	2.968	92.727	215
15	3.761	144.220	70	23	3.2	107.792	250
18	2.05	33.116	72	4	3.096	101.038	265
6	2.753	78.766	85	22	5.53	259.090	265
11	4.545	195.129	90	26	3.384	119.740	312
21	2.89	87.662	95	30	2.358	53.116	342
28	3.3	114.285	100	3	3.084	100.259	350
27	2.504	62.597	120	9	3.069	99.285	420
16	2.034	32.077	135	5	3.919	154.480	460
19	3.405	121.103	152	24	4.84	214.285	608
25	2.904	88.571	170	1	6.322	310.519	630
12	2.002	30	197				

En la Figura 4.4 se observa que el tiempo máximo de duración de al menos una de las 25 puntas de contacto que fueron tomadas en cuenta para este análisis de desgaste fue de aproximadamente 10 hrs de tiempo arco, cabe mencionar que en la Tabla 4.1 se observan los diferentes tiempos arco que soporto cada una de las muestras analizadas. Otro aspecto importante a notar es que el comportamiento del desgaste no es completamente uniforme, esto se puede deber a que el proceso de soldadura empleado fue en modalidad manual, es decir la aplicación de la soldadura la realizo un soldador, y fue este mismo el que aplicaba sus técnicas de limpieza sobre el componente cuando él consideraba que era necesario, retirando el exceso de salpicadura de la superficie de la punta con sus pinzas de trabajo, de manera que con esta acción se pudo haber aumentado o disminuido el efecto del desgaste medido en el orificio del componente y por eso se observa este comportamiento.

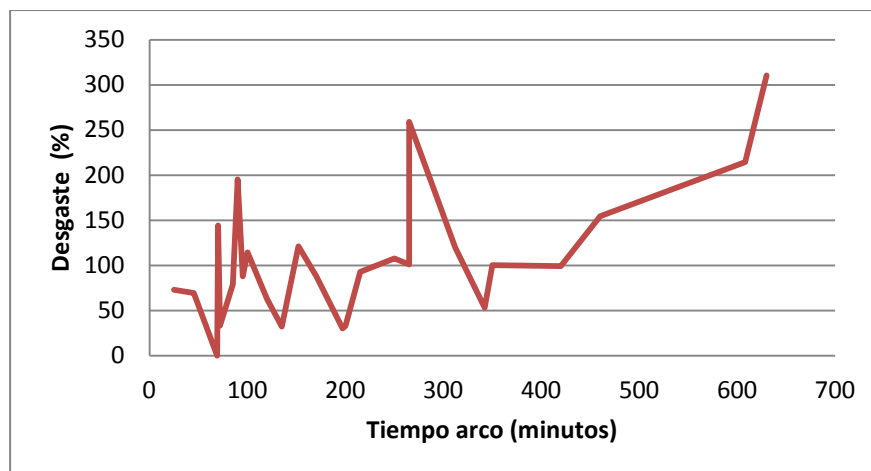


Figura 4.4 Mediciones de desgaste en función del tiempo arco.

### 4.3 Cambios en la superficie del orificio

Una vez realizados los cortes longitudinales en las puntas de contacto se observaron con estereoscopio y se tomaron imágenes de la superficie del orificio de una puntilla nueva contra las usadas con el fin de analizar los cambios sufridos en esta superficie como se observa en la Figura 4.5.

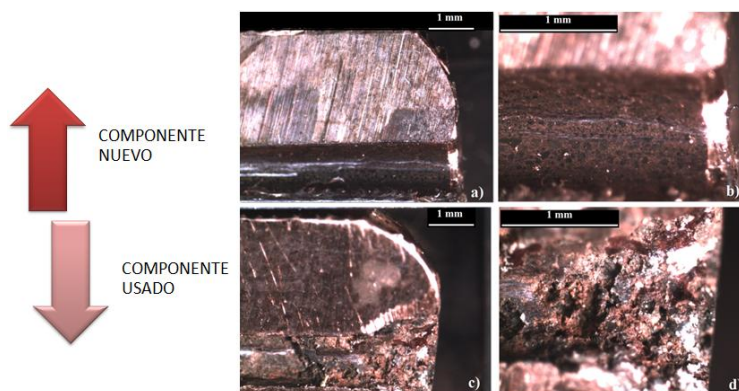
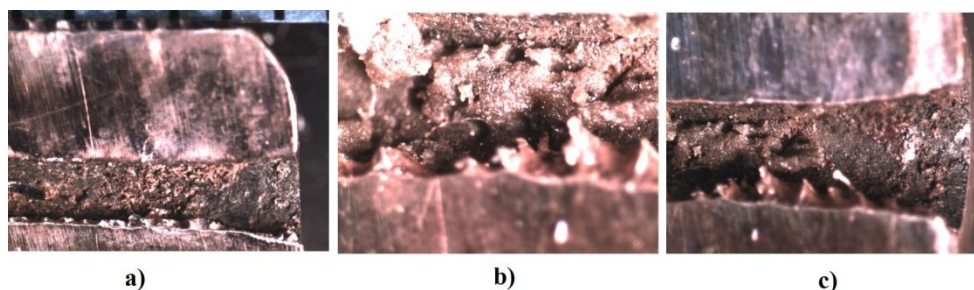


Figura 4.5 Comparación del a) y b) interior del orificio una punta de contacto nueva c) y d) contra una usada

En la Figura 4. 6 se encontraron cambios importantes en la rugosidad y el acabado de la superficie a lo largo de todo el orificio de la punta de contacto, aunque en el extremo cercano al charco de soldadura fue más marcado este efecto, estos cambios complican el buen desempeño del componente al

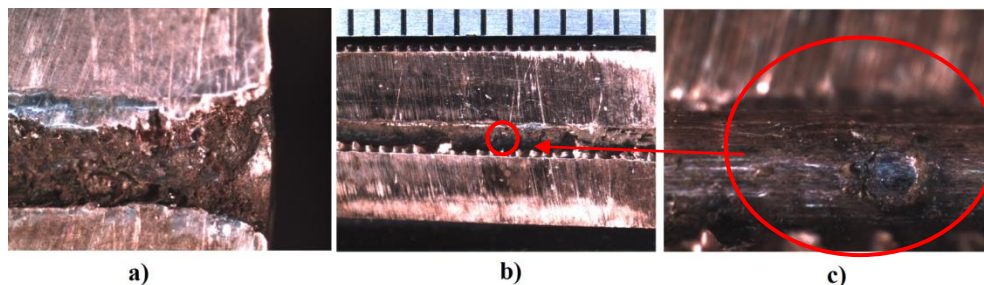
obstaculizar el paso del electrodo a través de la punta de contacto y al impedir el paso eficiente de la corriente eléctrica entre estas dos superficies, como ya se vio en el capítulo 2, entre dos superficies aparentemente lisas el área de contacto real en donde circula la corriente eléctrica es mucho menor que el área de contacto aparente ya que solo hacen contacto los picos o crestas de estas dos superficies, ahora entre dos superficies que nos son lisas el área de contacto real es mucho menor, y es esto lo que sucede entre estos dos componentes. Este efecto obstaculiza e inclusive impide el paso de la corriente eléctrica entre la punta de contacto y el electrodo.



**Figura 4. 6 Condiciones de la superficie del orificio de la punta de contacto despues de soldar a a) 20X y b) 50X**

Además de esto como se muestra en la Figura 4. 7 se encontró la presencia de acero en el interior del orificio; tanto en el extremo que está más cercano al arco como en la sección media del componente. El acero encontrado en el interior del orificio en el extremo cercano al arco se debe a la salpicadura generada en el proceso de soldadura la cual se proyecta desde el arco y se impacta sobre la superficie de la punta de contacto, algunas gotas son tan pequeñas que se introducen en el interior del orificio, entre la punta de contacto y el electrodo que está siendo alimentado. Mientras que el acero encontrado en la sección media del componente se debe a los arcos generados entre el electrodo que está siendo alimentado y la superficie del orificio de la punta de contacto, al haber un espacio muy pequeño entre estas dos superficies se genera un arco entre estas produciendo una temperatura muy elevada la cual funde el material de las dos superficies en contacto y es por esto que se da el

intercambio de material entre el electrodo y la punta de contacto. Cabe mencionar que este análisis fue confirmado con ayuda del MEB y de micro análisis EDX en estas zonas.



**Figura 4. 7** Presencia de acero en el interior del orificio a) en un extremo de la puntilla y b) en la zona media de la puntilla, c) vista ampliada.

La acumulación de salpicaduras es promovida por la alta temperatura de la superficie y superficies rugosas. El uso de aleaciones de cobre, que tienen una conductividad térmica menor que el cobre puro, puede causar la acumulación excesiva de salpicaduras, Las puntas de Contacto que contengan bordes afilados cerca de la parte delantera son más propensas a la acumulación excesiva de salpicaduras. Lo mismo se aplica a puntas de contacto que contienen restos de metal o imperfecciones cerca de o en el interior del orificio (7).

#### **4.4 Cambios en la microestructura del componente**

Se obtuvieron imágenes por microscopio óptico de las puntillas, la Figura 4.8 a) muestra el material del cual fue hecha la punta de contacto, formada de una microestructura dendrítica, con granos alargados por el efecto del proceso de extrusión, en la figura 4.8 b) se observa la condición del material después de 300 minutos de trabajo mientras que en la Figura 4.8 c) se observa que después de 600 minutos de trabajo se formaron granos recristalizados,

equiaxiados, así como de algunas áreas con maclas. Afectando de esta manera las propiedades mecánicas del material, como la dureza y de igual manera su resistencia al desgaste.



Figura 4.8 Crecimiento de grano a 100x, a) 0 min, b) 300 min, c) 600 min

## 4.5 Mediciones de dureza

Para analizar los cambios en la dureza del material de la punta de contacto por el efecto del tiempo arco que estuvo trabajando bajo la temperatura ya mencionada anteriormente, se realizaron mediciones de dureza conforme al procedimiento mencionado en el apartado 3.1.8 evidenciando el comportamiento de la dureza en la Figura 4.9.

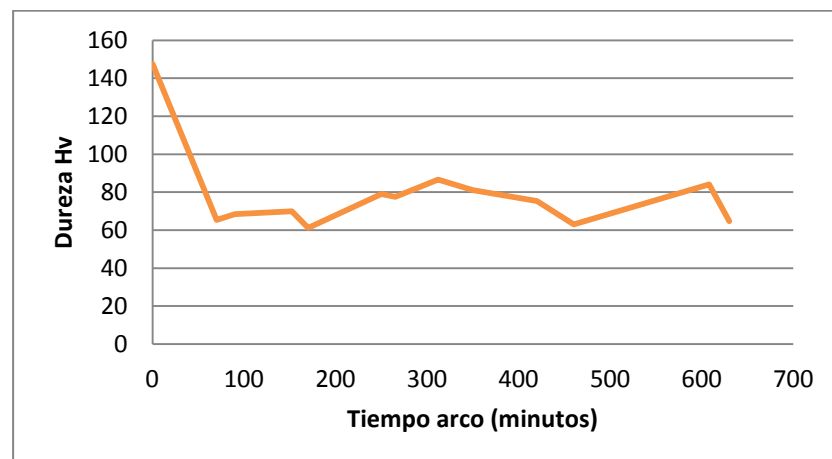


Figura 4.9 Gráfica de dureza de la sección de la punta



El comportamiento de la dureza está directamente relacionado con el comportamiento microestructural del material ya que en cuando por efecto de la recristalización del material previamente deformado la aleación pierde su fortaleza esta se ve disminuida en el gráfico, y continua de esta manera por efecto del crecimiento de grano, y aunque aparentemente después de los 500 minutos de tiempo arco la dureza pareciera que empieza a aumentar, no hubo suficientes muestras que soportaran este tiempo, para sostener dicho comportamiento. Para que una muestra soportara 600 minutos de tiempo arco fue necesario 5 días de trabajo en un turno de 8 hrs, con un promedio de tiempo arco de 2 hrs por día.

## **4.6 Caracterización mediante microscopia electrónica de barrido**

Para complementar los estudios realizados a la punta de contacto, se empleó el microscopio electrónico de barrido. Existía la sospecha del intercambio de material entre el electrodo y la punta de contacto, como anteriormente se había mencionado. En esta capítulo con ayuda del análisis de espectrometría de energía dispersiva de rayos x, se obtuvieron los elementos presentes en diferentes zonas de interés identificando altos contenidos de Fe en algunos de estos puntos dentro del orificio del componente. En la Figura 4.10 se observa un alto contenido de Fe en zonas muy cercanas al extremo que está cerca del charco de soldadura, en donde no solo por efecto de la acumulación de salpicadura se dan estos altos contenidos, sino que también se da por la fusión de los materiales en contacto por efecto de los arcos generados entre ellos por el paso de la corriente. Los componentes en la zona de análisis se pueden encontrar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Análisis EDS y contenido de elementos en zona de interés

Elemento	% Peso	% Atómico
C K	6.61	21.23
O K	9.23	22.26
Fe K	64.61	44.64
Cu K	19.55	11.87
Total	100.00	

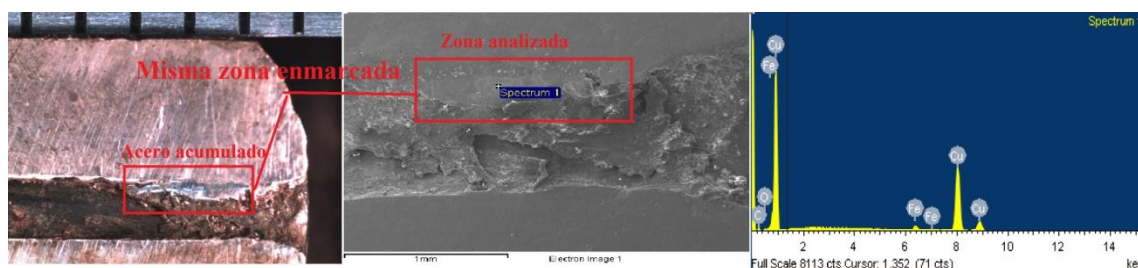


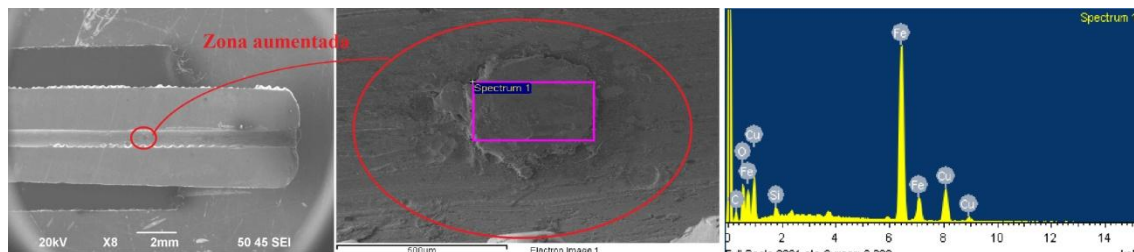
Figura 4.10 Imágenes de estereoscopio, MEB y análisis EDS del componente seccionado con presencia de acero

En la Figura 4.11 se observa un círculo oscuro pequeño en la sección media del orificio de la punta de contacto, esta sección se seleccionó para ser vista a mayor magnificación y se le realizó un microanálisis, confirmado un alto contenido de Fe como se puede ver en la Tabla 4.3, de manera que el intercambio de material del electrodo hacia la punta de contacto se lleva a cabo en diferentes zonas a lo largo del orificio del componente por efecto de los arcos generados entre estas superficies por el paso de la corriente eléctrica.

Tabla 4.3 Análisis EDS y contenido de elementos en zona de interés

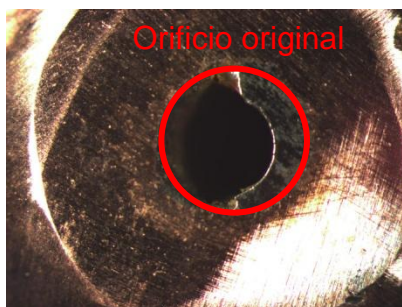
Elemento	% Peso	% Atómico
C K	8.84	26.42
O K	9.93	22.28
Si K	1.16	1.48
Fe K	58.68	37.73
Cu K	21.41	12.10
Totals	100.00	





**Figura 4.11 Imagen de MEB y análisis EDS del componente seccionado con presencia de acero**

Este efecto del intercambio de material del electrodo hacia la punta de contacto perjudica el libre paso del electrodo a través del orificio, al ir incrementando la acumulación de acero en diferentes zonas internas del componente se va cerrando en diámetro interno de la puntilla impidiendo de manera progresiva la circulación de electrodo. Este efecto es mayor en la punta del componente y la acumulación de acero se da por dos efectos, uno la fusión del electrodo por efecto de los arcos entre las dos superficies y otro por la acumulación de salpicadura en el borde del orificio. En la Figura 4. 12 puede observar como el orificio se cierra por estos efectos.



**Figura 4. 12 Punta de contacto obstruida por la acumulacion de salpicadura en el orificio**

Además de estos efectos confirmados, se utilizó el MEB para identificar los mecanismos de desgaste presentes en el orificio del componente, lamentablemente el efecto de desgaste que sucede en donde se pierde material de la punta de contacto va generando una vacío el cual es ocupado por capas de salpicadura de acero, ver Figura 4.13, impidiendo con esto la observación de las zonas de interés para identificar estos mecanismos de desgaste.



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

Los análisis realizados y las herramientas utilizadas para este estudio proporcionan información con la cual podemos llegar a las siguientes conclusiones sobre el comportamiento de la punta de contacto ante las condiciones normales a las que es sometido por el proceso de soldadura.

- 1) La aleación de la cual están fabricadas las puntas de contacto es C12200, la cual presenta una conductividad de 85% IACS y es usada normalmente para este propósito.
- 2) La temperatura de trabajo máxima alcanzada por el componente fue de 850 °C bajo los parámetros analizados.
- 3) La microestructura del material pasa por un proceso de recristalización el cual elimina la microestructura dendrítica con granos alargados que se forman por el efecto del trabajo en frío que generó un mecanismo de endurecimiento. Posteriormente al ser expuesta la punta de contacto a altas temperaturas con ciclos mayores a los 500 minutos generan la formación de granos

recristalizados, equiaxiados con la presencia de áreas de maclaje. Es desde este punto donde la dureza del material se ve afectada.

- 4) Los valores de la dureza del material disminuye rápidamente dentro de los primeros 60 minutos de trabajo del componente hasta la mitad de la dureza que el material tenía inicialmente, es decir de 130 Hv a 65Hv.
- 5) El cambio en la superficie del orificio de la punta de contacto es de los efectos más perjudiciales que le suceden al componente ya que al cambiar la superficie de lisa a áspera, rugosa y des uniforme evita que la corriente fluya eficientemente comprometiendo de esta manera una de sus funciones principales.
- 6) El intercambio de material del electrodo hacia la punta de contacto y la acumulación de salpicadura cierran el diámetro del orificio del componente obstaculizando el libre paso del electrodo en la puntilla y de igual manera comprometiendo otra de funciones principales de la puntilla que es la libre alimentación del electrodo hacia el charco de soldadura.
- 7) El desgaste que se midió indica el comportamiento de la aleación ante los efectos de fricción entre el electrodo y el orificio de la punta de contacto a elevada temperatura, así como la erosión eléctrica la abrasión y oxidación que promueven las densidades de corriente y temperatura a las que se sometió la punta de contacto (28), mas sin embargo los valores observados y el desgaste evidenciado en el componente no son suficiente motivo para que el componente deje de cumplir con sus funciones principales, es decir el desgaste no es de los principales motivos por los cuales el componente sea reemplazado.

- 8) De manera que la aleación C12200 muestra un buen desempeño ante el fenómeno de desgaste, cuenta con una buena conductividad eléctrica. El principal motivo por el cual el componente es reemplazado es porque deja de circular libremente el electrodo o se deja de conducir la corriente eléctrica entre estos dos componentes por los efectos mencionados en los puntos 6 y 7.
- 9) Una de las tendencias normales ante el consumo elevado de este componente es cambiar de fabricante, de aleación o de diseño del componente, pero en este estudio se concluye que el efecto de salpicadura normal en el proceso seguirá obstaculizando el libre paso del electrodo. Aunque se trate de una aleación más dura y mejor conductora.
- 10) Se recomienda una técnica de limpieza mejor por parte de los soldadores, la aplicación de líquido anti salpicadura y un constante monitoreo de la condición de componente, utilizar el diámetro de puntilla correcto para el diámetro de electrodo utilizado, que para este caso es de 0.045" y si es posible el uso de una técnica de soldadura que disminuya la generación de la salpicadura.

## Listado de Figuras:

Figura 1. 1 Metodología para resolver el Problema .....	15
Figura 1. 2 Cronograma de MTSI 2013-2014 <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 2. 1 Proceso de soldadura por arco metálico con gas de protección (3) .....	19
Figura 2. 2 Esquema de modos de transferencia en el proceso de soldadura por arco metálico con gas de protección (5) .....	20
Figura 2. 3 Modos de transferencia y cantidad de salpicadura en el proceso de soldadura por arco metálico con gas de protección (5) .....	21
Figura 2. 4 Modo de transferencia por aspersion axial (6) .....	22
Figura 2. 5 Características de corriente de soldadura de arco de rocío a pulsos (3) .....	23
Figura 2. 6 Corrientes de soldadura típicas contra velocidad de alimentación del alambre para diferentes diámetros de electrodos de acero al carbón (1) ...	24
Figura 2. 7 Ajuste adecuado del voltaje de arco (5) .....	26
Figura 2. 8 Sobresaliente o extensión del electrodo y longitud de arco (8).	27
Figura 2. 9 Sobresaliente del electrodo sugerido en función de la corriente (2) .....	27
Figura 2. 10 Esquema del equipo para soldadura por arco metálico con gas de protección (3) .....	28
Figura 2. 11 Relación Volt-Ampere de una fuente de potencia de voltaje constante (1) .....	29
Figura 2. 12 Rodillos tipo: ranura en U, ranura en V y ranura estriada (8)..	30
Figura 2. 13 Vista seccional de la pistola (8) .....	32
Figura 2. 14 Curvatura y diámetro permisible en el cable de la pistola de GMAW (5) .....	32
Figura 2. 15 Imagen de microscopio electrónico de barrido muestra micro salpicaduras dentro del orificio de la punta de contacto (7). <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	

Figura 2. 16 Posiciones relativas de la punta de contacto con la tobera (9)	34
Figura 2. 17 Presentaciones paquetes a granel del alambre solido: Accu-Pak box, Accu-Trak drum, Horizontal Reel y bobinas y carretes (8)	36
Figura 2. 18 Cast y Hélix en el electrodo de alambre para GMAW (8)	37
Figura 2. 20 Tribología ciencia multidisciplinaria (13)	40
Figura 2. 21 Tribosistema (13)	40
Figura 2. 22 Área de contacto aparente (13)	42
Figura 2. 23 Área de contacto real (13)	42
Figura 2. 24 Diagrama del cuerpo libre que ilustra el deslizamiento de un cuerpo sobre una superficie (15)	43
Figura 2. 25 Mecanismos de fricción (17)	44
Figura 2. 26 Tipos de acciones mecánicas sobre los materiales (18)	44
Figura 2. 27 Tasa de desgaste en función de la temperatura (13)	46
Figura 2. 28 Micrografía de una superficie desgastada por adhesivo (14)	47
Figura 2. 29 Clasificación del desgaste abrasivo por el tipo de contacto a) Abrasión de dos cuerpos, b) Abrasión de tres cuerpos, c) Erosión (17)	48
Figura 2. 30 Diagrama esquemático de la interface eléctrica (21)	51
Figura 2. 31 Fotografías a) Golpes de arco sobre el alambre consumible b) deformación de las puntas por el sobrecalentamiento del trabajo(3)	51
Figura 3.1 Metodología experimental	60
Figura 3.2 Esquema de la medición de temperatura del componente	63
Figura 3.3 Esquema de la medición del desgaste del componente	63
Figura 3.4 Vista de la punta de contacto nueva a) completa b) con corte longitudinal y c) usada con corte longitudinal.	64
Figura 3.5 Punta de contacto montada para a) metagrafia y b) pruebas de durezas.	65
Figura 3.6 Muestra preparada de la punta de contacto donde se observan los puntos de medición de la dureza.	66
Figura 3. 7 Proceso de extrusión en la fabricación de las puntas de contacto.	67

Figura 3.8 Diagrama de fases binario Cu-P (25).....	68
Figura 3. 9 Equipo de soldar Miller Deltaweld 652	Figura 3. 10 Alimentador de electrodo Miller.....
68	68
Figura 3.11 Limpiador ultrasonico Branson 5510	Figura 3.12 Montadora Struers Citompress 20 .....
69	69
Figura 3.13 Cortadora Struers Discotom-6	Figura 3. 14 Desbastadora metalografica Knuth .....
69	69
Figura 3. 15 Pulidora Struers Planopol	Figura 3. 16 Cortadora de disco de diamante.....
70	70
Figura 3. 17 Microdurómetro Wilson Hardness	Figura 3. 18 MEB JEOL JSM-6490LV .....
70	70
Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura del componente en funcion del tiempo. ....	72
Figura 4.2 Avancel del desgaste en muestras a diferentes tiempos arco ...	73
Figura 4.3 Desgaste hacia el interior del componente .....	73
Figura 4.4 Mediciones de desgaste en funcion del tiempo arco. ....	75
Figura 4.5 Comparación del interior del orificio una punta de contacto nueva contra una usada .....	75
Figura 4. 6 Cambios en las condiciones de la superficie del orificio del componente .....	76
Figura 4. 7 Presencia de acero en el interior del orificio .....	77
Figura 4.8 Crecimiento de grano a 100x,a) 0 min, b) 300 min, c) 600 min .	78
Figura 4.9 Grafica de dureza de la sección de la punta.....	78
Figura 4.10 Imagenes de Estreo, MEB y análisis EDS del componente seccionado con presencia de acero.....	80
Figura 4.11 Imagen de MEB y análisis EDS del componente seccionado con presencia de acero .....	81
Figura 4. 12 Punta de contacto obstruida por la acumulacion de salpicadura en el orificio.....	81
Figura 4.13 Analisis en sem de los mecanismos de desgaste.....	82



## Listado de Tablas:

Tabla 2. 1 Gases protectores para transferencia por aspersion en GMAW (1)	38
.....	38
Tabla 2. 2 Características y propiedades físicas de cobre (23)	57
Tabla 2. 3 Composición química del cobre C12200 DPH (23)	61
Tabla 2. 4 Propiedades mecánicas del cobre C12200 DPH (23)	62
Tabla 2. 5 Propiedades físicas y de fabricación del cobre C12200 DPH (23)	62
.....	62
Tabla 3.1 Elementos presentes en el analisis de la punta de contacto.....	61
Tabla 3.2 Composición química del cobre C12200 DHP (23)	61
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas del cobre C12200 DHP (23)	62
Tabla 3.4 Propiedades físicas del cobre C12200 DHP (23)	62
Tabla 3.5 Parámetros de soldadura utilizados	62
Tabla 4.1 Resultados de las mediciones de desgaste relativo.....	74
Tabla 4.2 Análisis EDS y contenido de elementos en zona de interés	80
Tabla 4.3 Análisis EDS y contenido de elementos en zona de interés	80

# BIBLIOGRAFÍA

1. **Holliday, D. B.** *Manual de Soldadura.* [ed.] R. L. O'Brien. Edo. de Mexico : Prentice Hall hispanoamerica S.A., 1996. 968-880-766-4.
2. **Juers, Raymond H.** *ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing and Soldering.* Estados Unidos de America : ASM Internacional, 1993. 0-87170-382-3.
3. **Jeffus, Larry.** *Soldadura Principios y Aplicaciones.* España : Ediciones Paraninfo S.A., 2009. 978-1-40181-0467.
4. **Horwitz, Henry.** *Soldadura Aplicaciones y Prectica.* Mexico : Alfaomega , 1997. 9686062734, 9789686062731.
5. **Shinagawa, Kita y Shinagawa, Ku.** *Essential Factors in Gas Metal arc Welding.* Tokyo, Japan : KOBE STEEL LTD, 2011. 141-8688.
6. **Althouse, Andrew D., Turnquist, Carl H. y Bowditch, William A.** *Modern Welding.* Unated States of America : The Goodheart-wilcox company, 2012.
7. **Villafuerte, Julio.** *Caring for your contact tips.* Canada : Practical Welding Today The fabricator.com, 2004.  
<http://www.thefabricator.com/article/consumables/caring-for-your-contact-tips>.
8. **Armao, Frak.** *GMAW Welding Guide.* United States of America : Lincoln Electric, 2006.
9. **Technologies, Victor.** *Mig gun nozzle to tip relationship.* USA : Victor Technologies International Inc., 2013.  
[http://victortechnologies.com/Shop\\_Talk/Tweco/mig-gun-nozzle-to-tip-relationship.php](http://victortechnologies.com/Shop_Talk/Tweco/mig-gun-nozzle-to-tip-relationship.php).

10. **ESAB.** *Welder Guide Book*. USA : ESAB Welding y Cutting Product, 2011.
11. **Society, American Welding.** *Specification for Carbon Steel Electrodes and rods for Gas Shielded Arc Welding*. USA : American National Standards Institute, 2001.
12. **Stolarski, T. A.** *Tribology in Machine Design*. Inglaterra : Butterworth-Heinemann, 2000. 0750636238.
13. **López, Jesus.** *Estudio Experimental del Desgaste Abrasivo en Aceros AISI 8620, D2 y H13 con y sin Tratamiento Superficial*. Mexico : IPN-ESIME, 2004.
14. **Larsen-Basse, Jorn.** *ASM Handbook Volume 18 Friction, Lubrication and Wear Technology*. USA : ASM International, 1992. 0-87170-380-7.
15. **Gómez, Maryory Astrid.** *Caracterizacion de las Propiedades Tribologicas de los Recubrimientos Duros*. Barselona : Universidad de Barselona, 2005.
16. **Hutchings, I. M.** *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*. Inglaterra : Elsevier Limited, 1992. 13-978-0340561843.
17. **Bayer, Raymond G.** *Mechanical Wear Prediction and prevention*. USA : Marcel Dekker, 1994.
18. **Czichos, Horts.** *Metallurgical Aspects of Wear, Systems Analysis and description of wearProcesses*. Berlin : Federal Institute for Materials Testing, 1981.
19. **Scott, Robert.** *Mecanismos Basicos de Desgaste en Sistemas Lubricados*. Mexico : Machinery Lubrication en Español, 2008. [http://www.machinerylubrication.com/sp/mecanismos-basicos\\_de\\_desgaste.asp](http://www.machinerylubrication.com/sp/mecanismos-basicos_de_desgaste.asp).

20. **Perez, Alberto.** *Tribologia*. Nuevo Leon, Mexico : UANL-FIME, 2011.
21. **Tyler, Derek E. y Black, William T.** *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. USA : ASM International, 1990. 0-87170-378-5.
22. **Inc., Copper Developmet Association.** *Copper is...* USA : Copper Developmet Association Inc., 2013. <http://www.copper.org/education/copper-is/>.
23. **CODELCO.** *Historia del cobre*. Chile : CODELCO, 2013. [http://www.codelco.com/historia-del-cobre/prontus\\_codelco/2011-06-03/222414.html](http://www.codelco.com/historia-del-cobre/prontus_codelco/2011-06-03/222414.html).
24. **Baker, Hugh.** *ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams*. USA : ASM international, 1992.
25. **Yamada, T. y Takana, O.** *High Performance, Long Lasting Welding Tips*. USA : Superior Consumables, 2008.
26. **Henderson, Jeff.** *A GMAW consumable check list*. USA : The Fabricator, 2010. <http://www.thefabricator.com/article/consumables/a-gmaw-consumables-check-list>.
27. **International, ASTM.** *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size<sup>1</sup>*. Estados Unidos de America : ASTM Internacional, 1996.
28. **Villafuerte, Julio.** *Understanding contact tip longevity for gas metal arc welding*. USA : Welding Journal 78 (12) 2935, 1999.