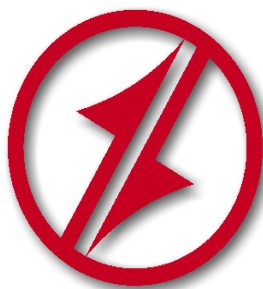


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DEL PROCESO DE SOLDADURA POR  
TRANSFERENCIA DE ARCO POR PLASMA EN LA RECUPERACIÓN DE  
COMPONENTES DE ACERO GRADO HERRAMIENTA.**

**POR**

**ÁLVARO AGUIRRE SÁNCHEZ.**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA, DICIEMBRE DEL 2010.**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTADO DEL ARTE DEL PROCESO DE SOLDADURA POR  
TRANSFERENCIA DE ARCO POR PLASMA EN LA RECUPERACIÓN DE  
COMPONENTES DE ACERO GRADO HERRAMIENTA.**

**POR**

**ÁLVARO AGUIRRE SANCHEZ.**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA, DICIEMBRE DEL 2010.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios:** Por permitirme cumplir con esta meta y por todas las bendiciones otorgadas.

**A mi familia:** Por el apoyo brindado incondicional durante toda mi vida.

**A mis asesores y maestros:** Por todo el apoyo otorgado durante mis estudios y el conocimiento que disfrutan en compartirlo con los estudiantes.

**A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales:** por toda la confianza y el apoyo brindado para poder continuar con mi preparación profesional.

**A CONACYT:** Por el apoyo económico otorgado para mi preparación académica.

# ÍNDICE

Síntesis		1
	<b>CAPITULO 1</b>	
	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
		2
Antecedentes		2
1.1 Objetivos		4
1.2.1 Objetivo general		4
1.2.2 Objetivos específicos		4
1.3 Justificación		5
1.4 Planteamiento del problema		6
1.5 Alcance		7

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

2.1 Aceros grado herramienta	8
2.1.1 Aceros grado herramienta para trabajo en frío	8
2.1.2 Aceros grado herramienta para trabajo en caliente	9
2.1.3 Aceros para moldes de plástico	10
2.2 Características de los aceros para herramienta	11
2.3 Mecanismos de desgaste	14
2.3.1 Fricción	14
2.3.2 Impacto	15
2.3.3 Abrasión por desgarramiento	16
2.3.4 Abrasión bajo esfuerzo	17
2.4 Procesos de soldadura empleados en la recuperación de componentes de aceros grado herramienta	17

2.4.1	Proceso rociado térmico.	17
2.4.2	Inyección del polvo mediante el proceso de rociado térmico	18
2.4.3	Gas de protección en el proceso de rociado térmico	19
2.4.4	Tamaño del material de aporte en polvo	19
2.4.5	Aplicaciones	20
2.5	Derivación y origen del proceso de plasma transferido por arco.	20
2.5.1	Proceso de soldadura por arco de tungsteno	21
2.5.1.1	Fundamentos del proceso GTAW	21
2.5.2	Proceso de soldadura por plasma (PAW)	22
2.5.2.1	Tipos de corriente utilizada en el proceso PAW	24
2.5.2.2	Longitud del arco	25
2.5.2.3	Ventajas y desventajas del proceso PAW	25
a)	Ventajas	25
b)	Desventajas	26
2.5.2.4	Técnica de soldadura ojo de cerradura	26
2.5.2.5	Metales base	27
2.5.2.6	Metales de aporte	27

2.6 Descripción del proceso de soldadura por plasma transferido por arco. (PTA)	28
2.6.1 Equipo utilizado en el proceso de PTA	29
2.6.2 Aplicaciones del proceso	32
2.6.3 Recubrimientos por plasma transferido por arco.	33
2.6.4 Análisis de los parámetros de soldadura en el proceso	33
2.6.5 Comparativo del proceso PTA con otros procesos	36
2.6.6 Ventajas y desventajas del proceso PTA	39
a) Ventajas	39
b) Desventajas	39
2.7 Descripción del impacto de las variables del proceso PTA en diferentes sustratos de acero grado maquinaria y herramienta.	41

### **CAPÍTULO 3 DISCUSIÓN**

Discusión y análisis de bibliografía	69
--------------------------------------	----

### **CAPÍTULO 4**

#### **CASO DE ESTUDIO**

4.1 Recuperación de componentes de acero grado herramienta D2 utilizando el proceso de plasma transferido por arco	72
--	----

Conclusiones	80
Índice de figuras	81
Índice de tablas	84
Bibliografía	86
Resumen autobiográfico	90



# SÍNTESIS

En el siguiente trabajo se presenta una revisión bibliográfica del proceso de plasma transferido por arco donde se describe el principio de funcionamiento derivado de los procesos convencionales de soldadura ya existentes en el sector industrial. Además se presentan sus componentes, las variables del proceso, ventajas y desventajas incluyendo las principales aplicaciones. La relevancia del proceso de plasma transferido por arco es la facilidad de aportar material en forma de polvo, el bajo aporte térmico y su fácil automatización. Otros de los puntos que describe este trabajo son las aplicaciones de este proceso en la recuperación de componentes de aceros grado maquinaria y aceros grado herramienta.

Una de las principales ventajas de este proceso comparado con los procesos convencionales es la mínima dilución que se genera en el metal base, por lo tanto, se aprovechan las características del metal de aporte.

En este trabajo se determinarán las principales variables que causan mayor impacto en este tipo de aceros al realizar un proceso de reparación.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La vida útil de los equipos o componentes expuestos a condiciones severas de desgaste superficial se ha ampliado a través del uso de aleaciones resistentes al desgaste base cobalto. Una de las alternativas para la recuperación es el proceso de plasma transferido por arco (PTA) el cual es un método generalmente aplicado para recubrir con aleaciones resistentes al desgaste. Uno de sus principales beneficios es el depósito de cordones de 0.250 mm en una sola capa, en comparación con otras técnicas convencionales de revestimiento SMAW, GTAW, SAW. La aplicación de este proceso depende de varios factores, como las condiciones de funcionamiento, las características del metal base, la geometría y las dimensiones de la pieza, además de un estudio de costo-beneficio sobre los componentes.

El proceso de deposición de plasma transferido por arco, tiene características únicas, las cuales hacen que el proceso sea atractivo debido al uso de aporte en forma de polvo obteniéndose recubrimientos con una dilución baja, una distorsión mínima y buen acabado superficial. El PTA es un proceso de arco eléctrico que utiliza un electrodo no consumible de tungsteno o de aleación de tungsteno con protección de gas inerte y alta densidad energética [1].

Hay una gran variedad de materiales que pueden ser utilizados como revestimiento, entre los más importantes se pueden citar las superaleaciones base cobalto y base níquel. Estas aleaciones son las más utilizadas ya que

presentan una excelente resistencia a la abrasión, erosión, impacto y la cavitación.

Existen procesos difusionales de endurecimiento superficial, tales como el carburizado y nitrurado, que ofrecen buenos resultados para aplicaciones no tan severas y que son económicos y fáciles de aplicar a las piezas de trabajo. En cambio los procesos de soldadura por fusión endurecen de manera diferente la superficie ya que la zona afectada por la temperatura es controlada por las variables del proceso. Debido a que existe una adherencia por medio de difusión se genera un crecimiento dendrítico al fundir una pequeña capa de la superficie de las piezas de trabajo, al igual que el metal de aporte.

Diversos estudios se han desarrollado y demuestran la alta efectividad del proceso PTA para evitar la alta disolución de los metales base y de aporte, lo que permite mantener las propiedades del metal de aporte en la superficie [2].

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Revisión del estado del arte del proceso de soldadura por plasma transferido por arco aplicado en la recuperación de componentes de aceros grado herramienta mediante el endurecimiento superficial.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Generar información fundamental de los parámetros de mayor impacto al usar el proceso PTA.
- Definir las principales causas de falla de los componentes de acero grado herramienta mediante el proceso PTA.
- Analizar el impacto que tienen las variables del proceso PTA en las propiedades metalúrgicas de la deposición de soldadura.
- Realizar un caso de estudio para determinar cual aporte es recomendado para la recuperación de un acero grado herramienta D2.

### 1.3 Justificación

La recuperación de componentes de aceros grado herramienta es una actividad que reduce los costos generados por el remplazo de piezas fuera de servicio ya que existen empresas que importan gran cantidad de componentes metálicos para el área de mantenimiento. Por tal motivo se busca realizar el trabajo de recuperación de componentes metálicos para evitar esa importante salida de capital del país. Esto se puede lograr con el uso del proceso de plasma transferido por arco (PTA) el cual tiene buenas características de baja dilución por lo que el proceso puede ser una buena alternativa para la recuperación de componentes de acero grado herramienta. Por lo tanto, este proceso presenta un gran potencial para el desarrollo tecnológico del país.

El conocimiento generado aportará grandes beneficios como incrementar la vida útil de componentes sujetos a desgaste, así como también, generará conocimiento acerca de las variables principales del proceso. De tal manera que el proceso de plasma transferido por arco se puede aplicar como alternativa de recuperación con el fin de reducir costos de mantenimiento en la recuperación de piezas.

## Planteamiento del problema

En la actualidad se utilizan procesos de soldadura por fusión para endurecer la superficie de piezas que estarán sometidas a condiciones severas de desgaste. Los principales procesos de soldadura por fusión que se aplican con este propósito, son la soldadura por arco de metal (SMAW), la soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW) y la soldadura de arco sumergido (SAW). Estos procesos presentan la ventaja de ser económicos, aunque la desventaja principal es la disolución que ocurre entre el metal de la pieza de trabajo (metal base) y el metal de aporte, esta condición de disolución reduce la efectividad del endurecimiento superficial ya que lo que se busca es que el metal base presente baja disolución para conservar las propiedades del metal de aporte.

El proceso de soldadura de plasma transferido por arco PTA presenta menores niveles de disolución del aporte respecto a los procesos utilizados para la recuperación de componentes de tal manera que lo hacen atractivo para aplicaciones de endurecimiento superficial. El problema radica en el escaso conocimiento de éste proceso de soldadura en el país por lo que este trabajo se enfoca a la revisión del estado del arte con respecto al impacto de las variables del proceso y las ventajas de dilución.

## **1.4 Alcance**

El alcance de este trabajo consiste en realizar una recopilación de información referente al estado del arte en el que se encuentra el proceso de plasma transferido por arco (PTA), enfocándose en el impacto que tienen las variables del proceso en la recuperación de componentes de acero grado herramienta. Esto con el objetivo de utilizar este proceso en la industria como alternativa en la recuperación de componentes de acero grado herramienta para establecer las ventajas de la implementación de este proceso en el sector tecnológico e industrial del país.

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Aceros grado herramienta

En la actualidad las aplicaciones de los aceros grado herramienta se han incrementado considerablemente debido a la creciente demanda del sector industrial en el área de procesos de conformado y manufactura de herramientas. Esto ha generado el desarrollo de técnicas y procedimientos con diversos procesos de soldadura como SMAW, GTAW, SAW, para la recuperación de componentes expuestos al desgaste mecánico y ambientes corrosivos, en donde el campo de aplicación de estos aceros es para trabajo en frío, trabajo en caliente y para la fabricación de moldes de inyección para plástico [1].

#### 2.1.1 Aceros grado herramienta para trabajo en frío

Las principales operaciones de los aceros para trabajo en frío es para operaciones de corte y conformado en frío, como cizallas, cuchillas, matrices de corte, punzones de corte, cuchillas de dobladoras, rodillos de conformado, rodillos guías, etc. Estos aceros principalmente trabajan sobre metal y plástico,



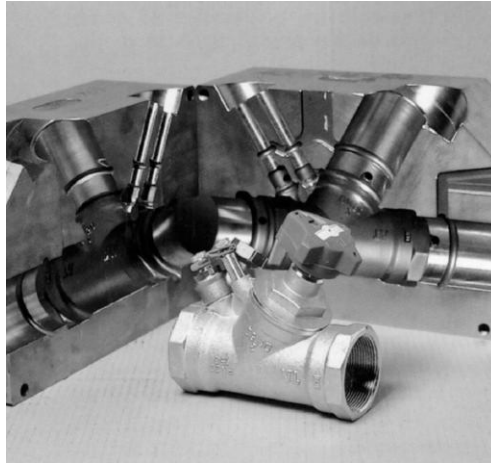
por ejemplo: cuchillas de conformado de madera o molinos de plástico (trituración).

La principal función de estos aceros es trabajar con durezas altas, las cuales generan una gran resistencia al desgaste, combinada con la tenacidad que se requiere para el trabajo a efectuar, sin embargo, la dureza será obtenida dependiendo de la composición química del material y de la aplicación del componente

Otro de los aceros aplicado en la elaboración de dados de estampado y en moldes de inyección de plástico es el Cr, Mo, V, éste acero tiene buenas características de maquinabilidad y se puede tratar térmicamente hasta alcanzar una dureza de 64 HRC [2].

### **2.1.2 Aceros grado herramienta para trabajo en caliente**

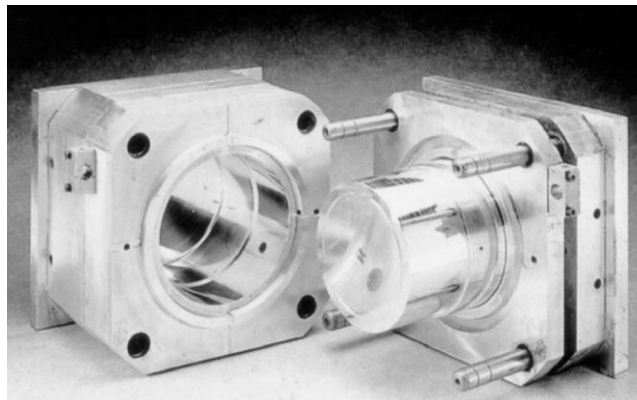
Son aceros que normalmente trabajan a altas temperaturas ideales para trabajo con metales calientes en inyección, forja, extrusión, etc. Un ejemplo de estos aceros es AISI H13 que normalmente puede trabajar con un buen rendimiento con zinc y aluminio, uno de los principales características de estos aceros es su coeficiente de dilatación térmica lo cual permite trabajar a ciertas temperaturas en la figura 2.1 se muestra una imagen de la aplicación de estos aceros en la fabricación de herramientas para trabajado en caliente, en este caso un molde de una pieza fabricada por inyección [2].



**Figura 2. 1. Acero grado herramienta para trabajo en caliente [2].**

### **2.1.3 Aceros para moldes de plástico**

Este tipo de aceros tienen la propiedad de poder trabajar a cambios de temperatura y son utilizados para la construcción de moldes para procesos de extrusión, inyección y sople su resistencia al desgaste producida por el plástico es buena por lo que son utilizados para la fabricación de moldes. De manera ilustrativa se muestra en la figura 2.2 un molde fabricado con acero H13 utilizado para la fabricación de recipientes cilíndricos de plástico [1].



**Figura 2.2 Ejemplo de aceros para moldes de plástico [2].**

## 2.2 Características de los aceros para herramienta

Los aceros para herramientas y matrices están clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero por sus siglas en inglés (AISI) y la sociedad de ingenieros automovilísticos (SAE) en 7 grupos principales. Esta nomenclatura hace referencia al contenido de carbono y aplicaciones generales de estas aleaciones. Sus principales características son la alta resistencia a la abrasión, impacto y vibraciones mecánicas a continuación.

En la tabla 2.1 se muestran los aceros más comunes aplicados para la elaboración de dados de estampado y componentes mecánicos así como sus principales aplicaciones [3].

**Tabla 2.1** Características de los aceros grado herramienta [3].

Acero	Aplicaciones
Cr-Mo-V	Acero robusto para trabajo en frío indicado para corte y conformado
D2	Presentan alta resistencia al desgaste y gran tenacidad
S1	Alta resistencia al impacto, trabajo en frío, troqueles cuchillas y en caliente
S2	Troqueles resistencia al impacto
H13	Apto para continuos choques térmicos
L6	Para dados en forja y muy alta tenacidad
M2	Herramientas de corte, demanda alta tenacidad
T1	Herramientas de corte de alto rendimiento con 18%W
P4	Moldes de plástico pulido espejo
AISI 1045	En construcción engranes, piñones, tornillos, flechas de bomba, flechas de transmisión, cigüeñales Y componentes de maquinaria.
AISI 1020	Engranes y pines endurecidos superficialmente, piñones, cadenas, tornillos, componentes de maquinaria, prensas y levas.

En la tabla anterior 2.1 se muestran algunos de los aceros más utilizados en la construcción de herramientas y componentes de maquinaria los cuales están expuestos a diferentes mecanismos de desgaste.

La Tabla 2.2 se describe la composición química de algunos aceros utilizados para la elaboración de moldes de estampado y componentes de maquinaria, componentes de estampado, construcción de flechas y engranes, de tal manera se observa que principalmente todos estos tipos de aceros contienen en común los elementos C, Mn, Mo y Cr por lo que estos elementos hacen que los aceros tengan buena resistencia al desgaste y capacidad para absorber energía.

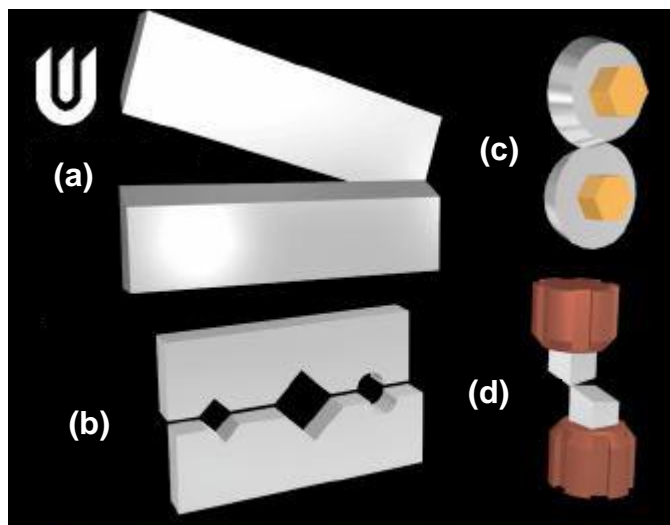
**Tabla 2.2** Composición química de algunos aceros grado herramienta y grado maquinaria [4].

<b>Composición % e.p.</b>										
	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
Cr-Mo-V	0.6	0.8	0.35	4.5	-----	0.5	-----	0.2	-----	-----
D2	1.60-1.40	0.60 max	0.60 max	11.00-13.00	-----	0.70-1.20	-----	1.10 max	-----	-----
S1	0.40-0.55	0.10-0.40	0.15-1.20	1.00-1.80	0.30 max	0.50 max	1.50-3.00	0.15-0.30	-----	-----
S2	0.40-0.55	0.30-0.50	0.90-1.20	-----	0.30 max	0.30-0.60	-----	0.50 max	-----	-----
H13	0.32-0.45	0.20-0.50	0.80-1.20	4.75-5.5	0.30 max	1.10-1.75	-----	0.80-1.20	-----	-----
L6	0.65-0.75	0.25-0.80	0.50 max	0.60-1.20	1.25-2.00	0.50 max	-----	0.20-0.30	-----	-----
M2	0.78-0.15	0.15-0.40	0.20-0.45	3.75-4.50	0.30 max	4.50-5.5	5.50-6.75	1.75-2.20	-----	-----
T1	0.65-0.80	0.10-0.40	0.20-0.40	3.75-4.5	0.30 max	-----	17.2-18.7	0.90-1.30	-----	-----
P4	0.12 max	0.20-0.60	0.10-0.40	4.00-5.25	-----	0.40-1.0	-----	-----	-----	-----
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.04	0.05
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.04	0.05

En los siguientes puntos se describen los diferentes mecanismos de desgaste a los que están sujetos los componentes de acero grado herramienta y maquinaria.

## 2.3 Mecanismos de desgaste

En la actualidad en el sector industrial automotriz se presentan problemas por desgaste mecánico de sus componentes cuando estos están sujetos al desgaste por fricción o impacto. El desgaste por corrosión ocurre cuando los elementos se encuentran en contacto con sustancias químicas o expuestos al medio ambiente, los cuales se describen en la figura 2.3, en la cual se ilustra de forma esquemática los modos de desgaste de herramientas que se presentan con mayor frecuencia en los componentes metálicos, (a) desgaste por cizalla, (b) desgaste por abrasión, (c) abrasión bajo esfuerzos y (d) desgaste por impacto [2].



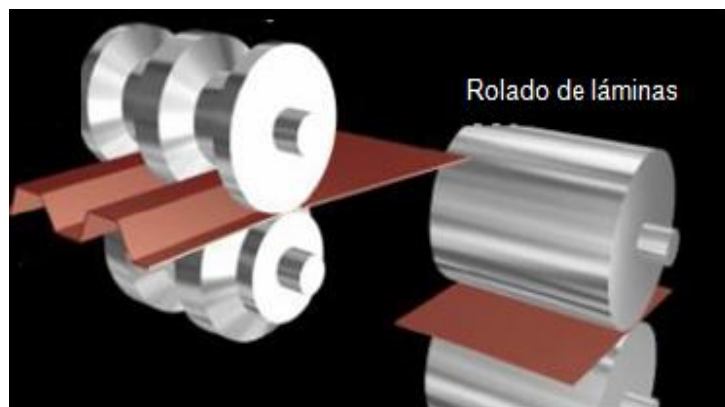
**Figura 2.3.** Diferentes tipos de mecanismos de desgaste [2].

### 2.3.1 Fricción

Genera pérdida de material por rozamiento continuo de una superficie metálica a otra, ésta se hace presente en los herramientas utilizados en los procesos de estampado y constituye uno de los problemas más de severos de

desgaste de partes y piezas. Esto se debe al acabado superficial de las piezas y en específico de las micro secciones soldadas donde las áreas más suaves del sustrato tienden a desgastarse más fácilmente.

El desplazamiento relativo de una superficie contra la otra produce el choque de aristas encontradas y se genera una deformación localizada, un aumento de temperatura y ruptura de dichas aristas o bordes [6]. El cual se ilustra en la figura 2.4.



**Figura 2.4.** Esquema de un mecanismo de desgaste por fricción [2].

### 2.3.2 Impacto

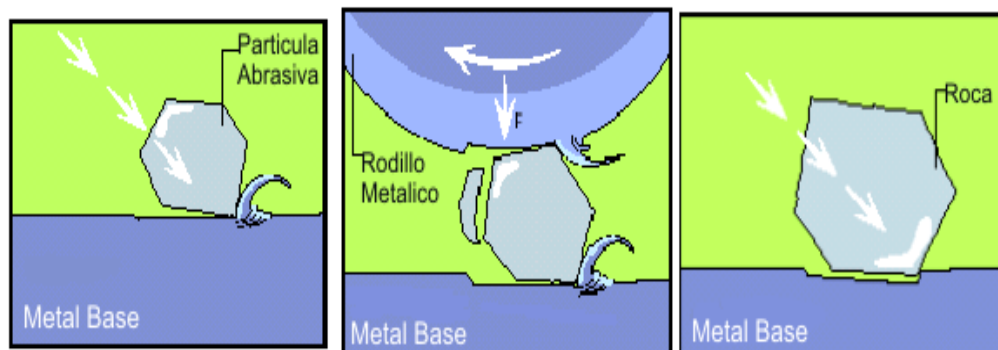
El desgaste por impacto, es la capacidad del material de absorber energía como se sabe, por la ley de conservación de la energía, la energía no se pierde ni se destruye, sólo se transforma. Para este caso, la energía acumulada se convierte, al impacto en trabajo de deformación plástica o elástica, dependiendo de la característica de la superficie y su habilidad de poder absorber dicha energía. La habilidad de poder absorber la energía del impacto en un metal está determinada por las características de tenacidad del mismo, siendo así una de las principales características de la materia que está expuesta a impactos

frecuentes, por lo que se busca tener una buena tenacidad no solo buenas propiedades de fricción [6].

### 2.3.3 Abrasión por desgarramiento

El desgaste de las piezas mecánicas se puede definir como una pérdida gradual del metal en función del tiempo, mediante algún mecanismo que actúa sobre los componentes. Cuando una pieza o una parte de la misma sufre deformación y desgaste a tal grado que no puede trabajar adecuadamente, debe ser reemplazado o reconstruido. Mientras que los resultados finales producidos por el desgaste provocan que la pieza ya no realice su función adecuadamente, por lo tanto es esencial entender dichos mecanismos involucrados antes de realizar la selección del material para recuperar un componente desgastado. Este tipo de desgaste combina la abrasión de alta tensión con impacto, generando deformación plástica dentro del metal base.

Uno de los ejemplos donde se puede observar este tipo de desgaste es en rodillos de laminación y dados para reducción de diámetros en caliente de tal manera que al estar sujetos a fricción y presión el material se desgasta gradualmente, lo cual se ilustra de forma esquemática en la figura 2.5 [6].

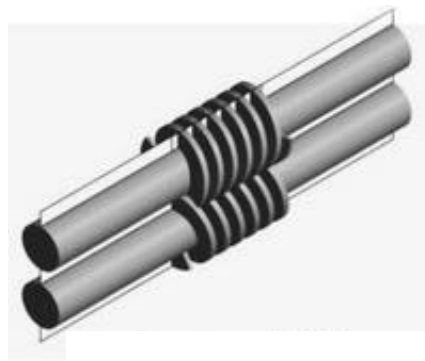


**Figura 2.5.** Esquema representativo del mecanismo de abrasión por desgarramiento [2].



### **.3.4 Abrasión bajo esfuerzo**

Es un tipo de desgaste que agrega una fuerza de compresión a la abrasión, ésta se produce mediante partículas que se deslizan sobre la superficie a un ángulo de incidencia pequeño, este tipo de abrasión se presenta en mecanismos que se deslizan entre sí en medio de partículas que ejercen altas presiones sobre las superficies actuando la partículas como una película de desbaste, este mecanismo es ilustrado en la figura 2.6 [6].



**Figura 2.6.** Esquema representativo de abrasión bajo esfuerzo [2].

## **2.4 PROCESOS DE SOLDADURA EMPLEADOS EN LA RECUPERACION DE COMPONENTES DE ACEROS GRADO HERRAMIENTA.**

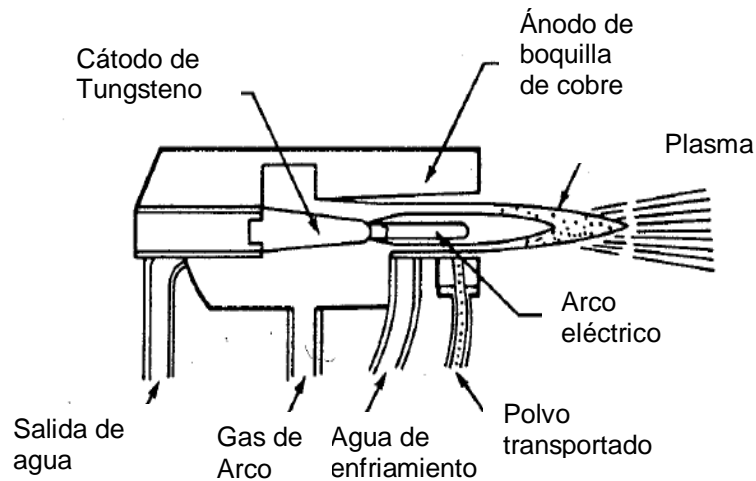
### **2.4.1 Proceso rociado térmico**

Esta técnica de proyección puede ser empleada con una amplia variedad de materiales, incluyendo los cerámicos, los cuales proporcionan al material excelentes propiedades al desgaste. La única limitante en estos recubrimientos es que exceden el espesor permisible de 30  $\mu\text{m}$  por el tipo de adherencia mecánica, debido al acabado superficial diseñado para la unión a recubrir este.

Su empleo disminuye el riesgo de degradación del revestimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas [9].

### **2.4.2 Inyección del polvo mediante el proceso de rociado térmico**

El material de revestimiento es transportado por medio de un gas portador e inyectado en la llama de plasma, el inyector de polvo puede estar situado en el interior o en el exterior de la boquilla. La llama de plasma acelera las partículas de polvo inyectadas, fundiéndose estas debido a la elevada temperatura del plasma. Estas gotas de material fundido se proyectan hacia la superficie del material a recubrir; ahí se acumulan y solidifican, originando un recubrimiento protector grueso y compacto. El criterio básico utilizado es que las partículas deben fundirse completamente sin una excesiva vaporización y permanecer fundidas hasta que colisionen con el sustrato. Este equipo incluye un sistema de enfriamiento con agua en circulación en su interior, lo que evita la fusión de dichos electrodos. Las principales partes de la antorcha son cátodo de tungsteno, ánodo de cobre, arco eléctrico, polvo transportado, agua de enfriamiento, gas de protección los cuales se muestran en la Figura 2.7 se puede observar las partes de la antorcha [9].



**Figura 2.7.** Esquema ilustrativo de los componentes de la antorcha utilizada en el proceso [9].

### 2.4.3 Gas de protección en el proceso de rociado térmico

Una de las variables más importantes es el gas de protección ya que el medio en el que se puede realizar la proyección por plasma que puede ser al aire o al vacío. La proyección al vacío tiene excelentes características pero el proceso es más lento que al aire, se utiliza del 5% al 20% de hidrógeno ya que ayuda a elevar el contenido calorífico del plasma [8].

### 2.4.4 Tamaño del material de aporte en polvo

Cada uno de los materiales de revestimiento tiene un tamaño de partícula dependiendo del cañón de proyección. El tamaño adecuado de las partículas del polvo, oscila entre 5 y 60  $\mu\text{m}$ . Un tamaño superior originará que las partículas no lleguen a fundirse por falta de temperatura, con lo cual podrán separarse de la llama o rebotar en el sustrato sin adherirse, por lo contrario, un tamaño inferior al adecuado puede producir la vaporización de dichas partículas antes de llegar al sustrato.

Otras de las variables esenciales es la distancia de la pieza a la antorcha de proyección y la velocidad de la partícula, la cual debe ser la adecuada para lograr la adherencia mecánica para que estas no reboten en el sustrato.

### **2.4.5 Aplicaciones**

El proceso de rociado térmico se utiliza para brindar protección contra diferentes mecanismos de desgaste abrasión, adhesión y erosión también como protección ante los siguientes tipos de corrosión, oxidación, corrosión por gases calientes, atmosférica y corrosión por inmersión además se utiliza en la reparación de piezas con desgaste o defectos localizados. Las superficies deben reunir cualidades especiales como el aumento de la superficie específica recubriendo la superficie activa o inerte [8].

## **2.5 Derivación y origen del proceso de plasma transferido por arco (PTA)**

Los orígenes del proceso de plasma transferido por arco surgen como base del proceso de soldadura de arco de tungsteno y gas (GTAW) por lo que el principio de generación del plasma es muy similar al del proceso de plasma transferido por arco (PTA) donde se hace pasar una cantidad de corriente a través de un electrodo de tungsteno no consumible y una boquilla constrictora para abrir o cerrar el arco de tal manera que el proceso de PTA surge de los principios de generación del plasma del proceso de soldadura de arco de tungsteno, solo con la diferencia de que el metal de aporte, es en forma de polvo, el cual es suministrado por medio de una cavidad donde se hace fluir el material de aporte usando un gas inerte que funge como gas de arrastre.

## **2.5.1 Proceso de soldadura por arco de tungsteno (GTAW)**

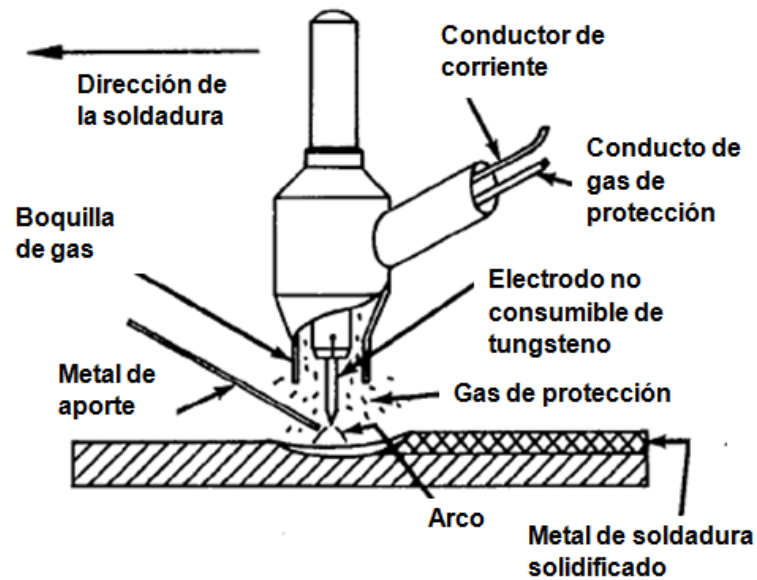
Dentro de los procesos de soldadura aplicados en la reparación de herramientas se tiene el proceso GTAW. Este es un proceso de soldadura por fusión donde se utiliza un arco entre el electrodo y el charco de soldadura, además se emplea un gas de protección sin presión [9].

De tal manera el principio de generación del plasma del proceso GTAW es muy similar al aplicado en el proceso de PTA, solamente que en el proceso GTAW el electrodo se encuentra por fuera de la tobera y en el proceso de plasma transferido por arco se encuentra alojado en el interior de la boquilla.

### **2.5.1.1 Fundamentos del proceso GTAW**

El proceso GTAW se basa en el uso de un electrodo de tungsteno (o una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en una antorcha (o soplete). Se alimenta un gas de protección para proteger el electrodo y el charco de metal líquido [9].

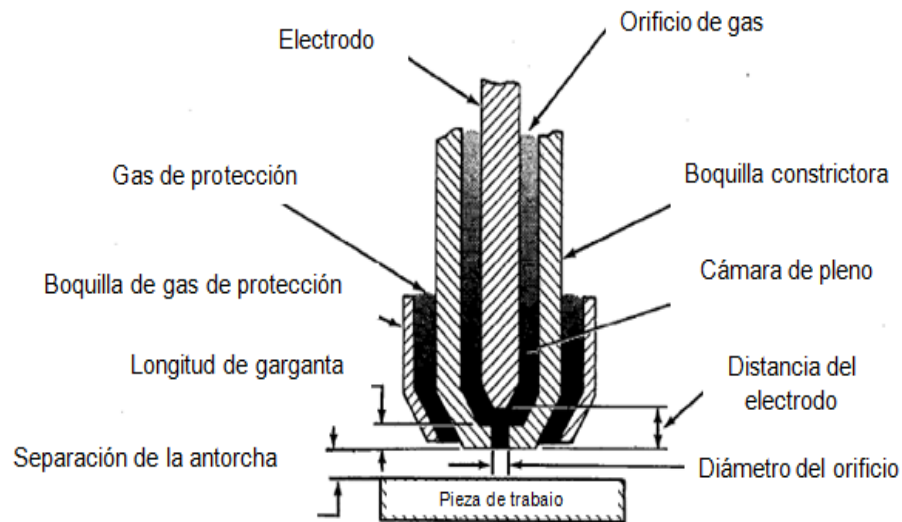
El arco eléctrico se produce por el paso de la corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y la superficie de trabajo. Los principales componentes del proceso son soplete o antorcha, electrodo no consumible, fuente de poder y sistema de alimentación del gas de protección los cuales se muestra de forma esquemática en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Esquema representativo del proceso de soldadura GTAW [9].

## 2.5.2 Proceso de soldadura por plasma (PAW)

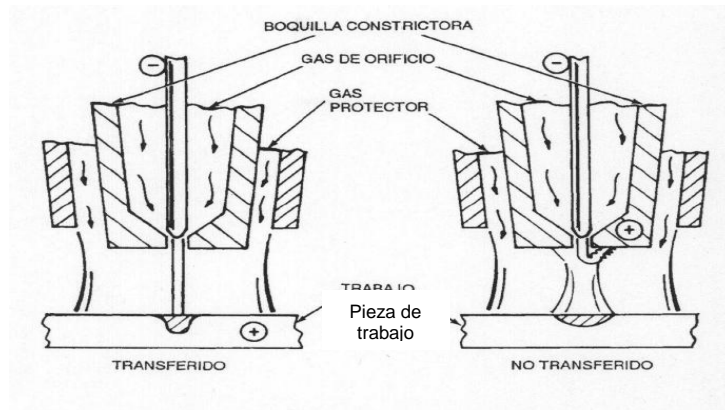
La soldadura por plasma (PAW del inglés plasma arc welding) es un proceso de soldadura por arco que produce coalescencia de metales calentándolos con un arco constreñido entre un electrodo y la pieza de trabajo (arco transferido) o entre el electrodo y la boquilla de restricción (arco no transferido), la protección generalmente se obtiene del gas caliente ionizado que sale del soplete, (ver figura 2.9). Este gas de plasma por lo regular se complementa con una fuente auxiliar de gas protector, el cual puede ser un solo gas inerte o una mezcla de gases inertes. No se aplica presión, y se puede añadir o no metal de aporte [11].



**Figura 2.9.** Esquema representativo del proceso de plasma por arco (PAW) [10].

El propósito de la constricción del arco es obtener una mejora considerable en la estabilidad direccional del plasma.

En la soldadura por arco de plasma se usan dos modalidades de arco transferido y el no transferido. La modalidad de arco transferido consiste en establecer la polaridad negativa al electrodo y la polaridad positiva a la pieza esto con el objetivo de que el arco de plasma se concentre en un solo punto y como característica genere un cordón con buena penetración y no tan ancho. La modalidad del arco no transferido consiste en cerrar el circuito en la misma boquilla de la antorcha y no en la pieza dando como característica principal la expansión del plasma lo cual se ilustra de forma esquemática en la figura 2.10 [10].



**Figura 2.10.** Esquema de las modalidades del arco transferido y no transferido del arco de plasma [11].

### 2.5.2.1 Tipos de corriente utilizada en el proceso PAW

En la mayor parte de las aplicaciones de soldadura por arco de plasma se emplea corriente continua con el electrodo negativo (CCEN) y un electrodo de tungsteno puro o de tungsteno de torio con arco transferido. El intervalo de corrientes para la soldadura por plasma con CCEN es de cerca de 0.1 a 500 A, con frecuencia se usa la pulsación de corriente. Comúnmente se sueldan aleaciones de acero, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y titanio.

Por lo general se usa la corriente continua en forma limitada con el electrodo positivo (CCEP) para soldar aluminio. El excesivo calentamiento del electrodo es el principal factor que limita el uso de CCEP; su corriente máxima suele ser menor que 100 A [10].



### **2.5.2.2 Longitud del arco**

La naturaleza columnar del arco estrecho hace que el proceso de arco de plasma sea menos sensible a las variaciones de la longitud del arco que el proceso de arco de tungsteno y gas. Debido a que el arco de tungsteno y gas no constreñido tiene forma cónica, el área de aporte de calor a la pieza de trabajo varía con el cuadrado de la longitud del arco, donde un cambio pequeño en esta longitud causa un cambio relativamente grande en la tasa de transferencia de calor por unidad de área [10].

### **2.5.2.3 Ventajas y desventajas del proceso PAW**

#### **a) Ventajas**

Las modalidades de baja corriente y de alta corriente (fusión en surco) tienen las siguientes ventajas en comparación con la soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno.

- Cuando la concentración de energía es mayor las velocidades de soldadura son más altas que en otros procesos.
- No se requieren corrientes altas por lo tanto hay menos contracción del material de base.
- La distorsión puede reducirse hasta en un 50%.
- La penetración puede controlarse ajustando las variables de soldadura y por lo tanto el arco es más estable.

- La columna del arco tiene mayor estabilidad direccional.
- El cordón de soldadura es más angosto (relación profundidad/anchura más alta) lo que redundaría en una menor distorsión debido a la reducción del tiempo inactivo invertido en rectificar el electrodo de tungsteno y la eliminación de la contaminación de la soldadura [10].

#### **b) Desventajas**

- Como el arco constreñido es muy angosto, el proceso no tolera mucho la falta de alineación de las uniones.
- Los sopletes manuales para soldadura por arco de plasma generalmente son más difíciles de manipular que un soplete de GTAW.
- Si se desea obtener soldaduras de buena calidad, la boquilla constrictora debe recibir un buen mantenimiento e inspeccionarse con regularidad para detectar indicios de deterioro [10].

#### **2.5.2.4 Técnica de soldadura ojo de cerradura**

Cuando se suelda por arco de plasma, se debe tener una combinación apropiada de flujo de gas de plasma, corriente de arco y velocidad de desplazamiento esto con el objeto de producir un charco de soldadura relativamente pequeño con un agujero que atraviese por completo el metal base. Este agujero se conoce como keyhole [10].

### **2.5.2.5 Metales base**

El proceso de soldadura por arco de plasma puede servir para unir todos los metales que pueden soldarse con el proceso GTAW y es posible soldar la mayor parte de los materiales con espesores entre 0.3 y 6.4 mm (0.01 y 0.25 pulgadas) en una sola pasada de un arco transferido. Todos los metales excepto aluminio, magnesio y sus aleaciones se sueldan con CCEN. Cuando se suelda aluminio o magnesio se usa corriente de onda cuadrada para eliminar de manera efectiva los óxidos refractarios de estos metales [10].

### **2.5.2.6 Metales de aporte**

Los metales de aporte que se usan para soldar los materiales base son los mismos que se emplean en los procesos GTAW y GMAW. Se añaden en forma de varillas cuando la soldadura es manual o en forma de alambre cuando es mecanizada [10].

## **2.6 Descripción del proceso de soldadura por plasma transferido por arco (PTA)**

El proceso de plasma transferido por arco (PTA) utiliza un material metálico en forma de polvo para unirse a un sustrato y producir un recubrimiento duro y resistente al desgaste, el cual está metalúrgicamente unido al sustrato. Dependiendo del material usado los materiales también pueden ser resistentes a la corrosión y ser completamente densos para estar en ambientes extremos sometidos a desgaste. Un arco piloto es generado entre un electrodo y un ánodo (boquilla). El gas de proceso es generalmente argón o una mezcla argón helio, es ionizado al estado de plasma logrando que sea eléctricamente conductor. Esto genera un arco transferido entre el electrodo y el metal base, creando un charco de fusión en la superficie de la pieza de trabajo. El material del recubrimiento se inyecta en la corriente del gas del plasma, depositándolo sobre el metal base.

El proceso PTA se aplica por medio de una boquilla cuya estructura interna se muestra en la figura 2.12. El electrodo de tungsteno se encuentra alojado en el interior de una boquilla que dirige el gas de plasma, esta boquilla generalmente es de cobre, y su función es generar un arco entre la punta del electrodo y la boquilla. Este arco se controla por una fuente de poder que funciona a determinadas frecuencias de oscilación.

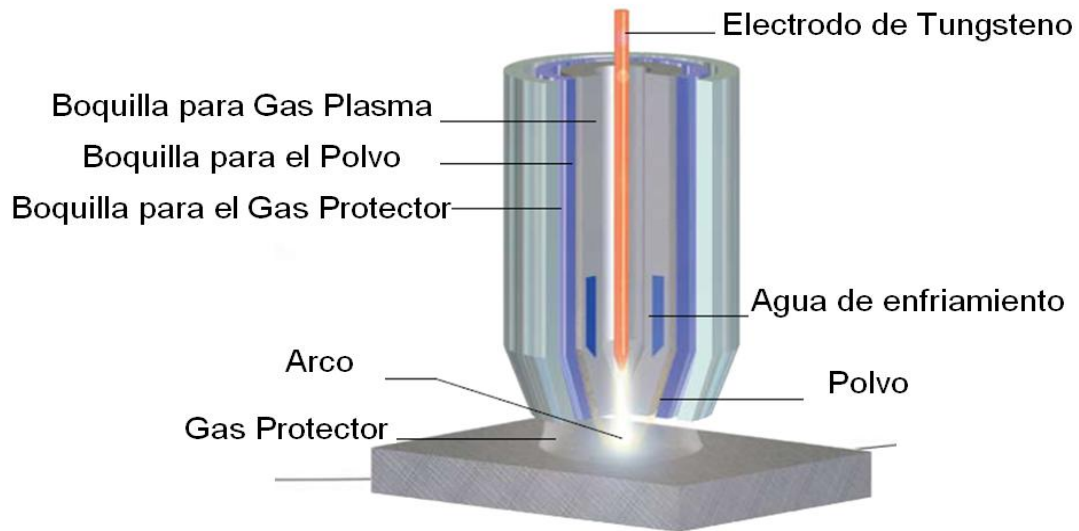
El arco hace que el gas se convierta en plasma aumentando su temperatura hasta niveles mayores a 10,000 °K. A estos niveles de temperatura, el gas separa sus cargas negativas y se convierte en iones positivos, generándose de esta manera lo que conocemos como plasma. El gas que se utiliza es argón, aunque puede utilizarse helio o alguna combinación de ambos. Se realiza una deposición de material en polvo, de una aleación o mezcla de elementos. Esta proyección térmica forma un denso depósito con excelente conexión con el

metal base. Como resultado de la constricción de la boquilla y el aumento de la velocidad del gas de plasma los recubrimientos obtenidos son homogéneos y densos con una unión metalúrgica excelente con el sustrato y con menos tendencia a la distorsión. En este proceso se obtiene una baja dilución normalmente alrededor de un 5% tomando en cuenta la fiabilidad en el control de los parámetros y la flexibilidad en la elección del material a depositar ya que utiliza metal de aporte en forma de polvo y varilla [10].

El proceso PTA tiene las siguientes características: los depósitos pueden extenderse de tamaño aproximadamente de 0.01" de espesor por 3/16" de ancho y máximo ¼" de espesor por 1 ½" de ancho, simplemente variando la corriente de soldadura, la velocidad de alimentación del polvo, la oscilación y la velocidad de recorrido. El proceso es favorable para adaptarlo a la automatización, lo cual genera una buena precisión de la soldadura.

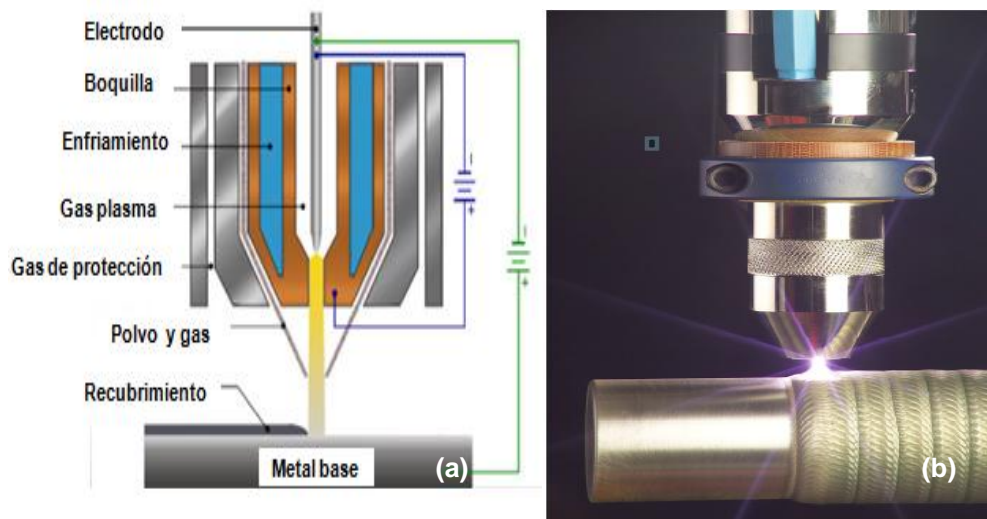
### **2.6.1 Equipo utilizado en el proceso de PTA**

En la figura 2.11 se ilustra el principio de operación del proceso se puede observar que el metal de aporte en forma de polvo se alimenta a través de un alojamiento interno, que rodea la boquilla del gas plasma. Este metal de aporte se hace fluir por medio de un gas de arrastre con velocidad variable. Generalmente se utiliza argón y se hace circular agua a través de conductos internos en la boquilla de cobre, esto con el fin de disipar calor generado por el arco piloto. Una vez establecido el arco la fuente de poder adicional genera una diferencia de potencial entre el electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo, con lo que se genera el arco de transferencia. Debido a la conductividad del plasma y el orificio en la boquilla de cobre, la transferencia de calor es de alta efectividad por lo que se concentra y se dirige de manera muy controlada [13].



**Figura 2.11.** Esquema de boquilla aplicada en el proceso PTA [19].

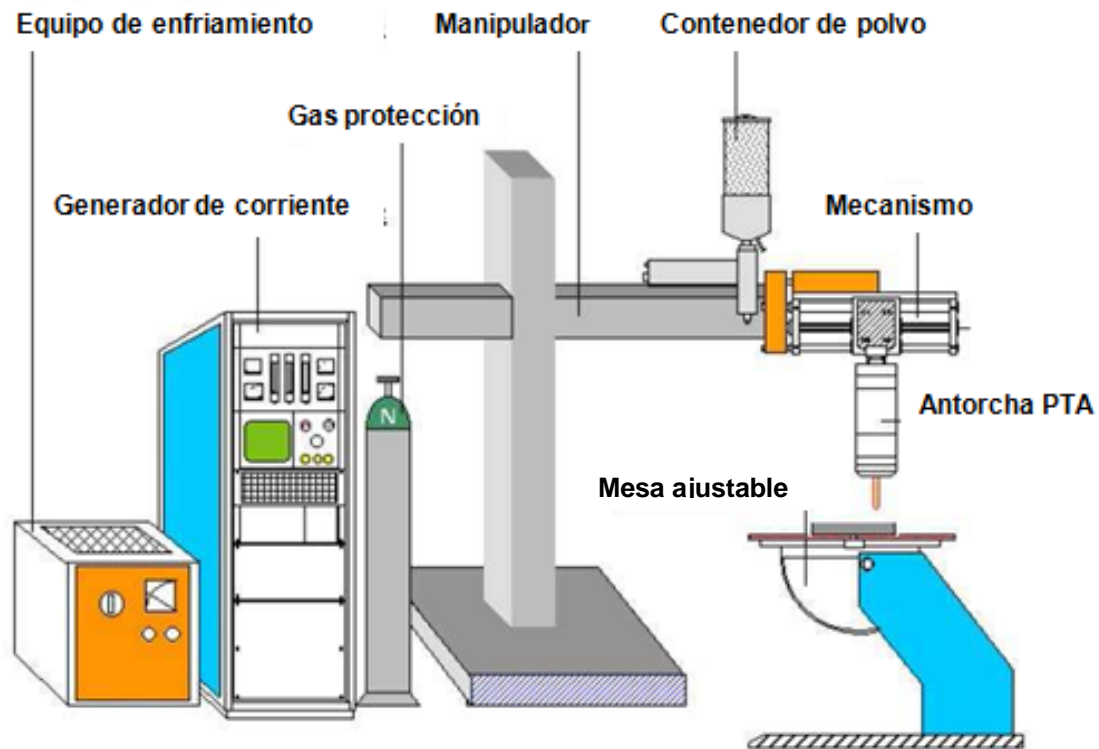
Este arco de transferencia es el que funde el polvo del metal de aporte, también funde una pequeña capa de la pieza de trabajo. Los metales base y de aporte solidifican de manera que se unen en una capa de espesor muy pequeño, produciéndose de esta forma la unión entre los metales. Se hace fluir una cantidad adicional de argón que sirve como protección en la zona de fusión, también un pre flujo y pos flujo para mejorar la calidad del cordón. En la figura 2.12 se muestra otra perspectiva del proceso de soldadura por PTA [11].



**Figura 2.12.** (a) Boquilla del proceso PTA. (b) Aplicación del proceso PTA [11,19].

Como se mencionó anteriormente, la naturaleza del tipo de uniones producidas mediante el proceso PTA es de tal forma que la disolución del metal de aporte con el metal base es muy baja, por lo tanto, se mantiene las propiedades mecánicas del material de aporte como una alta resistencia al desgaste.

En la figura 2.13 se observa un esquema de los componentes del proceso PTA. Este consta de un generador que proporciona la energía para el sistema de soldadura, la unidad de control funciona por separado a la corriente del gas de plasma en el circuito al incorporar alta frecuencia del arco piloto. En este proceso la antorcha tiene la función de establecer el arco y dirigirlo, el electrodo es de una aleación de tungsteno, esta consta de canales para el paso de gas y de agua para enfriamiento, además incluye una protección para cubrir el orificio constrictivo por donde fluye el gas de protección [12].



**Figura 2.13.** Esquema del equipo que conforma el proceso PTA [12].

## 2.6.2 Aplicaciones del proceso PTA

En general el uso del proceso PTA es de gran conveniencia para la recuperación de componentes que están sometidos a condiciones severas de desgaste, como se había mencionado. Existen metales de aporte además de proteger contra el desgaste, protegen contra ambientes corrosivos o para aplicaciones a altas temperaturas. La principal diferencia de las aleaciones es el metal de aporte que las componen, principalmente se utiliza aleaciones de base cobalto y base níquel [14].



Las aplicaciones típicas del proceso PTA son recubrimientos de tuberías de gas y aceite, válvulas y coples, partes aeroespaciales, rodillos de laminación, componentes de minería, trituradores de piedra y moldes para componentes de vidrio y metal, así como en la recuperación de componentes grado herramienta utilizados en los procesos de estampado.

### **2.6.3 Recubrimientos por plasma transferido por arco**

El proceso de plasma transferido por arco PTA tiene una aplicación muy amplia en recubrimientos de aceros, en los cuales se busca mejorar sus propiedades mecánicas aportando súper aleaciones base níquel o base cobalto las cuales generan propiedades mecánicas elevadas

### **2.6.4 Análisis de los parámetros del proceso PTA**

Los principales parámetros que afectan la calidad de soldaduras en el proceso PTA son los siguientes [14].

- Material de aporte.
- La corriente del arco de transferencia.
- La velocidad de alimentación del polvo.
- El precalentamiento y post-calentamiento a la pieza de trabajo.

A continuación se enlistan a manera de resumen, las características de los parámetros del PTA.

La posición de la boquilla determina el flujo del plasma y del calor de entrada. La energía que se libera en el arco se determina por la corriente que se aplica al producir el arco de transferencia, así como también la longitud del arco tiene un efecto significativo sobre la penetración del mismo.

- Aumentando el flujo de gas plasma, se incrementa la velocidad del flujo de gas hacia el metal base.
- Al incrementar el flujo de plasma hacia la pieza base se reduce la temperatura del arco.

Se necesitan altas energías de entrada (kw) para poder fundir el metal base, de lo contrario, solamente se produce el arco piloto y no el de transferencia. Por lo tanto, la velocidad del gas de plasma en la antorcha está determinada por el flujo de gas. Las partículas de polvo del metal de aporte se depositan más rápido cuando hay un alto flujo de gas, debido a esto, es menor el tiempo en que interactúan con el arco de transferencia. Por tal motivo, la temperatura de las partículas al momento de depositarlas es menor, lo que provoca enfriamientos rápidos.

Los tipo de boquilla y el diámetro del electrodo son importantes en el proceso de plasma transferido por arco (PTA) por lo que se debe hacer una adecuada selección, cuando se trabaja con un amperaje alto se debe de incrementar el diámetro del electrodo y de la boquilla para poder obtener un rendimiento ,óptimo del equipo y una buena calidad de soldadura similar al proceso de (GTAW) en la tabla 2.3 se muestran los parámetros regularmente empleados en el proceso (PTA) donde se controla desde pre flujo de gas antes de la soldadura hasta el pos flujo de gas de protección para proteger de la oxidación el cordón de soldadura ofreciendo también un sistema de enfriamiento.

**Tabla 2.3.** Parámetros del proceso de plasma transferido por arco (PTA).

PARAMETROS DEL (PTA)	DESCRIPCIÓN
Amperaje 0-300 A	Esta variable aumenta la penetración y el calor de entrada
Voltaje	Es importante para el calor de entrada de la pieza
Corriente Pulsada piloto 5-140 A	Utilizada para inicial el arco piloto
Flujo de gas plasma .4-20 L/min	Es el que se encarga de generar el plasma
Flujo de gas de protección L/min	Se encarga de hacer una atmósfera protegida del contacto con el medio ambiente.
Corriente inicial 5 a 300 A	Es la utilizada para iniciar el arco
Tiempo de corriente inicial 0-20s	Es el tiempo que tarda en llegar la corriente inicial al inicio de la aplicación.
(bajada) 0-10	Se utiliza para cortar la corriente gradualmente.
Corriente externa limite 300 A	Corriente a la que puede trabajar la fuente de poder.
Velocidad de avance de la antorcha	Es un parámetro que afecta al calor de entrada.
Velocidad del polvo	Es importante por la cantidad de polvo a depositar en la soldadura.
Pregas de flujo 3-10 s	Previene la oxidación al inicio del cordón.
Tiempo de pos gas de flujo 5-30 s	Sirve para evitar la oxidación cuando termina el cordón de soldadura.
Flujo del rango de gas 0.2-10 L/min	Flujo del gas piloto para mantener en piloto encendido.
corriente piloto strik 5-140 A	Requerido para iniciar el arco.
corriente setpoint 5-100 A	Corriente aplicada al término de la soldadura
Control de agua 1.8 L/min operación 5 horas	Necesario para lograr enfriar la antorcha .

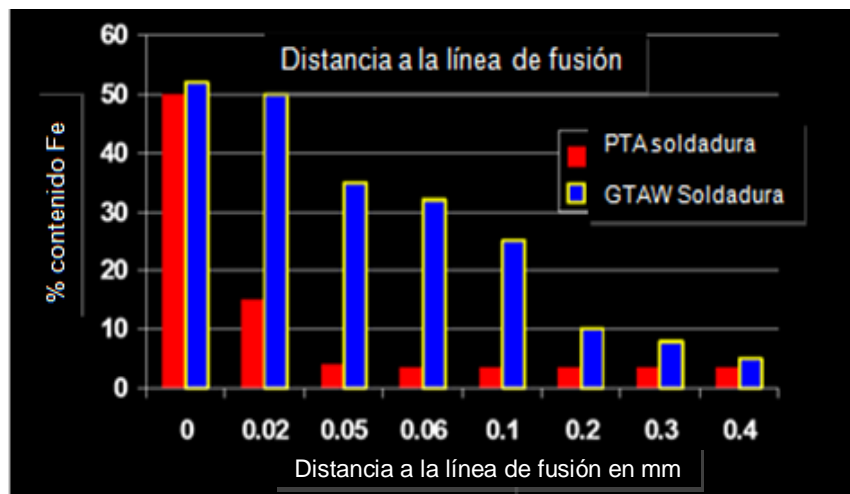
## 2.6.5 Comparativo del proceso PTA con otros procesos

En la tabla 2.4 se puede apreciar un comparativo de algunas características obtenidas con el proceso de PTA y otros procesos de depósito.

**Tabla 2.4** Comparativo del proceso PTA con otros procesos de soldadura [16].

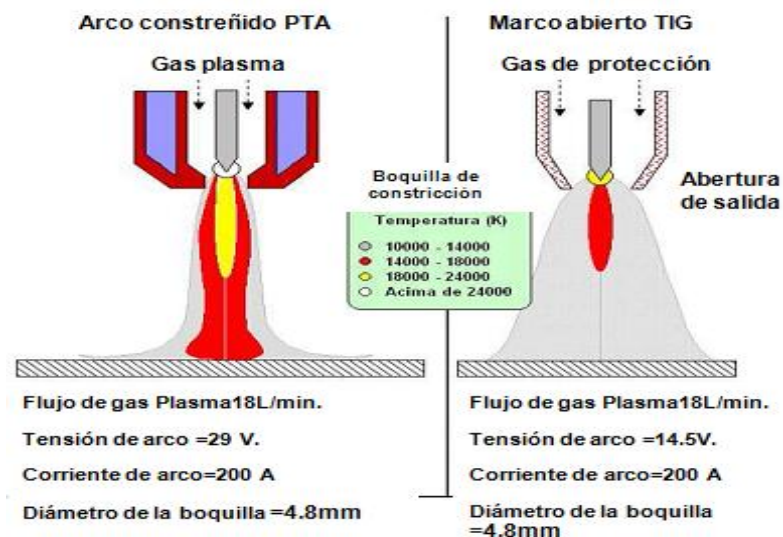
Proceso	Mezcla de gas [%]	Energía de fusión (Kg/H)	Mínimo espesor de una capa (mm)	Material de soldadura
PTA	5.0	12	0.25	POLVO
TIG	15	2.5	2.5	VARILLA
OXIFLAMA	1.0	1.8	1.2	POLVO, VARILLA
SAW	20	10-20	4.0	ALAMBRE
GAS DE PROTECCIÓN	20-30	6-10	3-4	ALAMBRE

En la figura 2.4 se muestra un comparativo del proceso PTA con GTAW donde se indica que a mayor distancia de la línea de fusión el porcentaje de Fe (% e.p.) disminuye rápidamente, por lo tanto, el proceso de plasma transferido por arco tiene mucho menos difusión y puede conservar las propiedades de corrosión y mecánicas del metal de aporte [16].



**Figura 2.14** Gráfica comparativa de la difusión de Fe en los procesos PTA Y GTAW [19].

En la figura 2.15 se muestra un comparativo de los procesos PTA y GTAW indicando la temperatura de trabajo que alcanza cada uno de los procesos [4].



**Figura 2.15** Esquema comparativo de las temperaturas de trabajo de los procesos PTA y GTAW [6].

El proceso PTA hace uso de diferentes polvos metálicos como materiales de aporte como carburo de cromo, carburo de tungsteno y polvos basados en Co y Ni (ver tabla 2.5). En aplicaciones futuras se podrán utilizar polvos basados en cerámicos y materiales compuestos. Usando estos materiales duros y resistentes al desgaste se puede mejorar la durabilidad de la soldadura y revestir materiales que constantemente se encuentran sujetos a desgaste ya sea que se encuentre en un ambiente corrosivo o en un mecanismo sujeto a fricción de metal con metal. También estos metales se pueden aplicar en sustratos que están sujetos a impacto y exposición a alta temperatura de tal manera que el proceso de recubrimiento PTA tiene múltiples aplicaciones [19].

**Tabla 2.5** Aplicaciones de aleaciones usadas en el proceso PTA [21].

<b>Aleación</b>	<b>Aplicación</b>
Base Cobalto	Resistencia a la corrosión y desgaste
Base Cobre	Reconstrucción de partes de maquinaria
Fe-Cr	Abrasión por alto esfuerzo
Acero al manganeso	Aplicación de desgaste
Base Níquel	Resistencia al desgaste metal-metal
Acero herramienta	Herramientales aplicación de desgaste

## **Ventajas y desventajas del proceso PTA [14]**

### **a) Ventajas**

- Alta repetitividad y un grado elevado de automatización del proceso de soldadura.
- Una acumulación de soldadura uniforme y bajos grados de dilución.
- Combinaciones de materiales difíciles de soldar por su composición química.
- El depósito del cordón puede extenderse de tamaño de aproximadamente 0.01" de espesor por 3/16" de ancho a aproximadamente 1/4" de espesor por 1 1/2" de ancho simplemente variando la corriente de soldadura, la velocidad de alimentación del polvo, la oscilación y la velocidad de recorrido [19].
- Las imperfecciones en la superficie pueden ser rellenadas y maquinadas.
- Las superficies pueden ser sin maquinado posterior o con maquinado.
- Los recubrimientos se aplican con rapidez.
- Este proceso produce diluciones de un 5% hasta 25% [21].

### **b) Desventajas**

- Equipo más complejo que otros procesos de soldadura, lo que crea mayor costo de mantenimiento.
- Equipo relativamente caro y requiere instalación especializada.
- Consumo del gas (argón) es ligeramente mayor que el usado en el proceso (GTAW).

- La antorcha es más compleja, requiere la configuración del electrodo y un posicionamiento preciso.
- Se requiere la correcta selección del flujo de gas plasma, el gas de protección y el gas de transporte.

Las temperaturas de trabajo que alcanza el electrodo en la punta de la boquilla es de 24,000°C, disminuyendo su temperatura gradualmente, se debe de tener muy controlado el sistema de enfriamiento de lo contrario se podría dañar la antorcha [16].



## 2.7 Descripción del impacto de las variables del proceso PTA en diferentes sustratos de acero grado maquinaria y herramienta

Hiromasa et.al (2008) estudiaron el impacto que tienen los parámetros del proceso de PTA en la condición superficial del metal base. Los parámetros de estudio fueron el ángulo de afilado del electrodo, el diámetro de la boquilla, flujo del gas y el amperaje. El metal de aporte en forma de polvo fue una aleación base cobalto en un sustrato de acero AISI 1020 en forma de placa con las siguientes dimensiones 100 mm x 100 mm x 12.5 mm, la composición química del aporte base cobalto se muestra en la tabla 2.6 [1].

**Tabla 2.6.** Composición química (% e.p.) del metal base y el aporte [1].

Nombre comercial	Co	Ni	Fe	C	Cr	Mn	Mo	Si	W	S	P
Base cobalto	Bal.	Max 3.0	Max 3.0	1.2	28.0	1.0	-	1.1	4.5		
AISI 1020			Bal	.18-.23		.30-.60				.05 Max	.04 Max

En la tabla 2.7 se listan los parámetros utilizados en el estudio donde los principales parámetros fueron el ángulo de afilado del electrodo de tungsteno de 10° y 30°, el diámetro de la boquilla de 3.2 y 4.8mm para cada ángulo y el flujo de gas.

**Tabla 2.7.** Parámetros de estudio utilizados para la evaluación del proceso PTA [1].

Angulo del electrodo	Diámetro de la boquilla (mm)	Flujo de gas L/m <sup>3</sup>	Corriente A
30°	4.8	2	100
			180
		1	100
			180
	3.2	2	100
			180
		1	100
			180
10°	4.8	2	100
			180
		1	100
			180
	3.2	2	100
			180
		1	100
			180

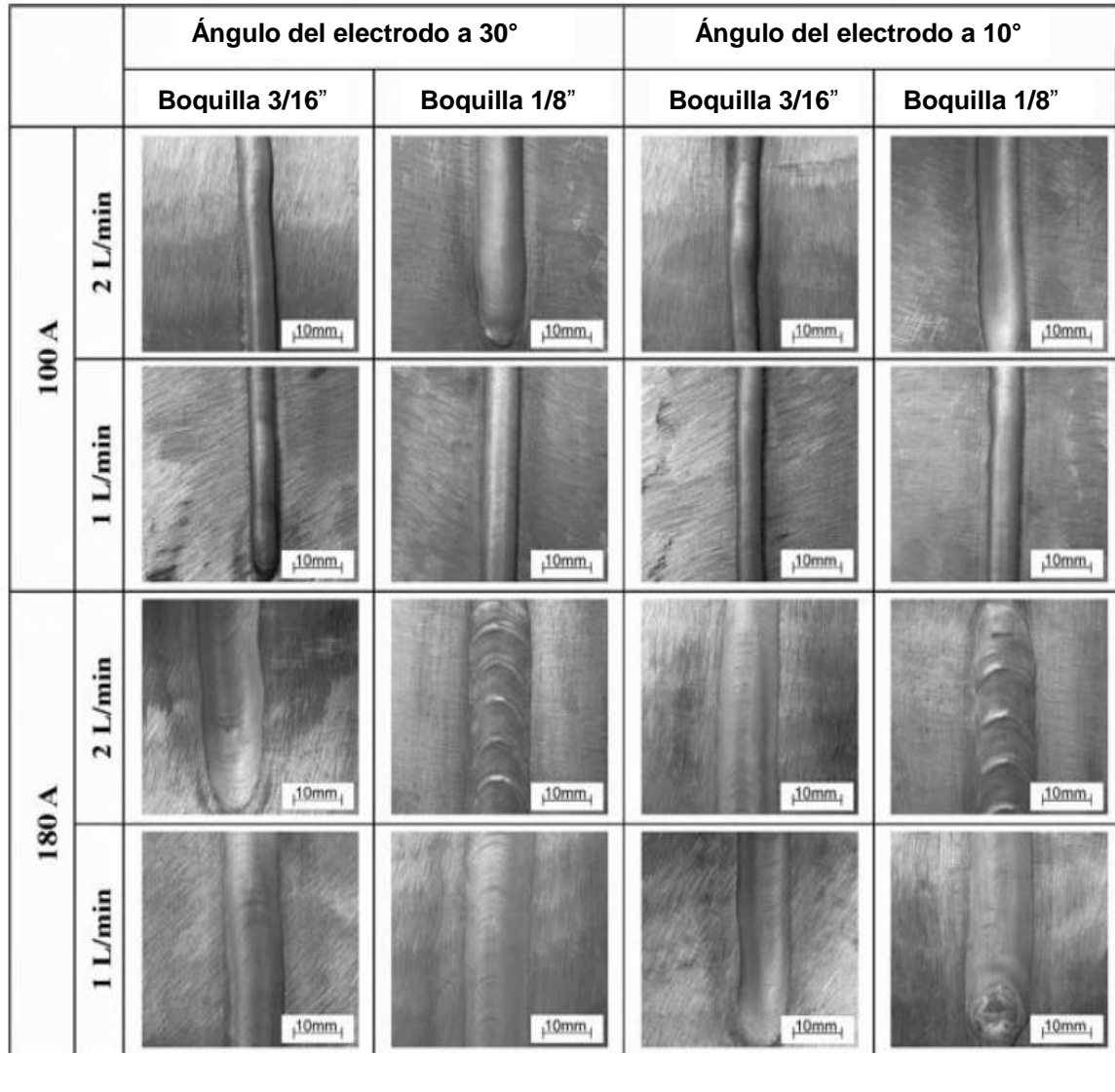
En este estudio se conservaron parámetros constantes los cuales se mencionan en la tabla 2.8. Estos son el flujo del gas de protección, el flujo del gas plasma, velocidad de depósito del material de aporte en polvo y la distancia de la antorcha a la pieza. Esto con el propósito de evaluar cuales son los parámetros que tienen mayor impacto en la calidad del depósito de soldadura.

**Tabla 2.8.** Parámetros utilizados en este estudio [1].

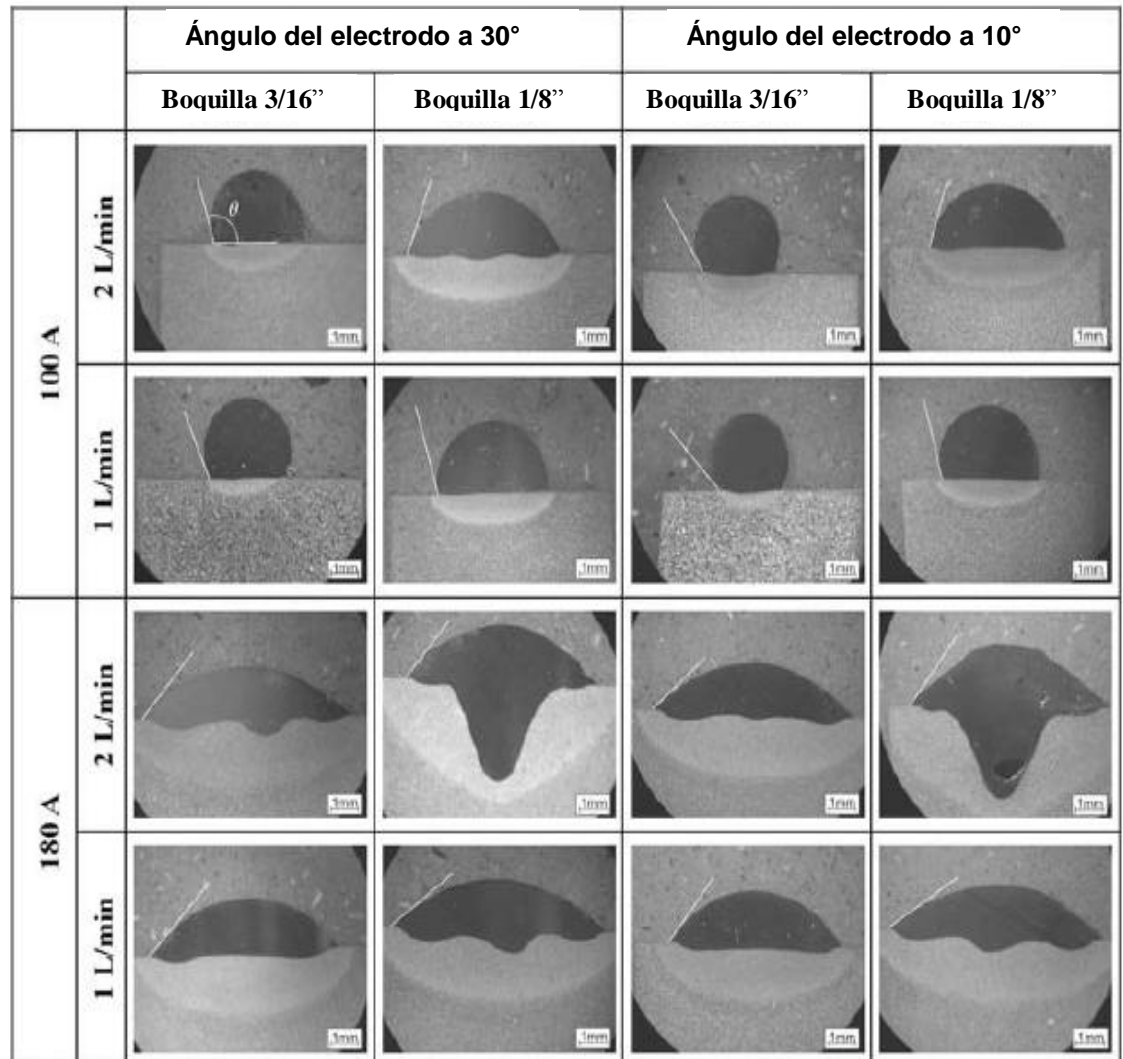
Parámetros del proceso	Datos
Velocidad de depósito (mm/s)	100
Flujo de gas de protección (L/min)	15
Flujo de gas de plasma de arrastre (L/min.)	2
Distancia de la antorcha (mm)	10

En la figura 2.17 se presenta una serie de imágenes que muestran el efecto de la variación del ángulo a 30° y 10° en el acabado superficial donde se utilizaron corrientes de 100 A y de 180 A y diámetros de boquilla de 3/16" y 1/8 en cada uno de los dos tipos de afilado. En las figuras se observa que al aumentar la corriente a 180 A, el cordón muestra un aumento en el espesor esto se debe al aumento de la corriente, lo cual ayuda a fundir más rápido el material de aporte y aumenta su penetración logrando su proyección en un área mayor.

Otro de los ejemplos es el amperaje el cual se muestra en la figura 2.16 este influye en la apariencia superficial del cordón de soldadura, de tal manera que cuando el amperaje es bajo presenta falta de penetración en la mayoría de las probetas con acepción del caso con boquilla se 1/8" y el flujo de 2 l/min donde debido a la reducción de la boquilla aumento la penetración considerablemente.



**Figura 2.16.** Las imágenes muestran el comportamiento de los parámetros utilizados en el proceso PTA en el acabado superficial.



**Figura 2.17.** Microestructuras de sección transversal que muestran el efecto de los parámetros del proceso PTA en la penetración.

Realizando un análisis de las imágenes de la figura 2.17 se puede observar que las muestras que tuvieron mejor apariencia sin marcas de oscilación no tienen una buena penetración como por ejemplo la muestra que se realizó con un electrodo de diámetro 3/16" y un afilado a 30°, una alimentación de gas de arrastre del metal en polvo de 1 (l/min) y 100 A, la cual muestra buena apariencia pero en cuestión de penetración prácticamente fue nula.

En general se presenta un engrosamiento en el aspecto del cordón cuando se usa una corriente de 180 A, mientras que para las pruebas realizadas a 100 A se presenta claramente la falta de penetración

Para las condiciones de transformación de arco de plasma transferido analizadas este trabajo; se concluye lo siguiente, los parámetros que más afectan a las características de los cordones que son la intensidad de la corriente del tratamiento, capacidad de humectación, el nivel de la dilución y el flujo de gas plasma. Este último puede ser considerado como un objetivo secundario, ya que el cambio del flujo de gas plasma influye en la rigidez del arco de plasma.

El efecto de la constricción de la boquilla es una función de la intensidad de los niveles actuales, siendo más significativo para la mayor intensidad de la corriente, que afecta a la penetración y la aparición de revestimiento en la superficie, de tal manera que los casos realizados con una boquilla de 1/8" tuvieron una mayor dilución. La agudización de los electrodos no afecta a las características evaluadas en relación con la dureza.

En este estudio se investigaron los efectos de la constricción de la boquilla, el ángulo de molienda de la punta del electrodo y el flujo del gas de plasma en la geometría del cordón, de tal manera que el ángulo de aplicación del afilado de los electrodos no es relevante. El ángulo de afilado del electrodo no mostro un efecto relevante en la geometría del cordón de soldadura.

(Rizzo T.R et al 2005) Estudio el efecto que produce la adición de carburo de tungsteno (WC) al metal de aporte base cobalto, Por el proceso PTA. Uno de los objetivos fue evaluar la resistencia al desgaste del metal de aporte base cobalto. Este es atomizado hacia la superficie del metal base formando una capa de WCoC con el propósito de mejorar la resistencia al desgaste. En este

trabajo se evaluó la soldabilidad de la aleación y el cambio de la microestructura que produce la aplicación del metal de aporte sobre la superficie de un acero AISI 1020 [12].

Las muestras de este estudio fueron preparadas utilizando como sustrato un acero AISI 1020 en forma de placa con dimensiones de 150x100x 12mm y con una previa limpieza de oxido, aceite y suciedad.

En este trabajo se utilizó como material de aporte una superaleación base cobalto en forma de polvo. Esta aleación se depositó agregándole una cantidad de carburo de tungsteno (WCoC), en porciones de 5% y 35% en peso donde los carburos se homogenizan antes de depositarse en el sustrato. En la Tabla 2.9 se muestran los datos que se analizaron mediante una matriz de experimentos con los porcentajes y la variación del amperaje, posteriormente se agregó la composición original 5 % y 35% de WC respectivamente en cada uno de los casos, variando el amperaje para poder evaluar cual es la combinación que producen las mejores propiedades.

**Tabla 2.9.** Parámetros utilizados en este trabajo de investigación [12].

WCoC (% e. p.)	Corriente de depósito (A)
0	150
0	170
5	150
5	170
35	150
35	170

Este estudio consistió en depositar dos cordones lineales de 70 mm en el sustrato. En la tabla 2.10 se muestra la composición química del metal base y los materiales de aporte [4].

**Tabla 2.10.** Composición química (% e.p.) del metal base y metal de aporte [12].

<b>Materiales</b>	<b>Co</b>	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>W</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>
AISI 1020		Bal	0.18-0.23				.30-.60	
Base Cobalto WCoC	Bal.	Max.3	1.2	28	Max. 3	4.5	1	1.1
Base Cobalto + 5%WCoC	56.2	2.9	1.4	26.6	2.9	8.2	1.0	0.7
Base cobalto 35% WCoC.	44.0	2.0	2.5	18.2	2.0	30.1	0.7	0.7

Para la realización de esta investigación se utilizó un equipo TS - UFPR - modelo Starweld 300 PTA Welding System R da Deloro Stellite ver Figura 2.19. En la tabla 2.10 se presentan los parámetros fijos utilizados durante este estudio. Para revelar las microestructuras la muestras fueron atacadas con una mezcla de 15 ml de H<sub>2</sub>O, 15 ml de HNO<sub>3</sub>, 15 ml de CH<sub>3</sub>COOH y 60 ml de HCL.



En la figura 2.18 se muestra el equipo utilizado para la realización de las uniones el cual tiene movimiento en 2 ejes.



**Figura 2.18.** Equipo PTA utilizado en la experimentación [12].

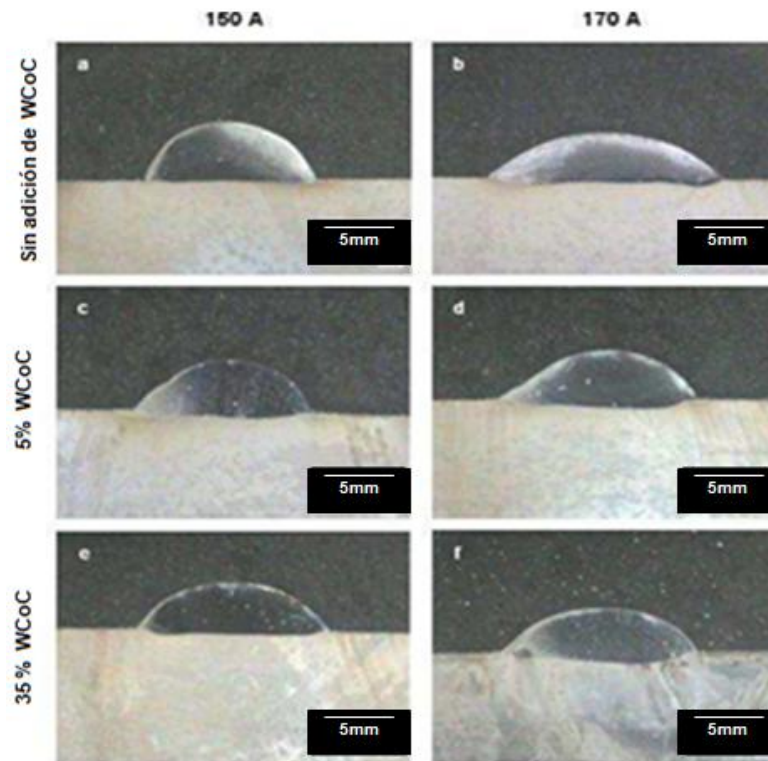
**Tabla 2.11.** Parámetros que se mantuvieron fijos durante la deposición de los cordones.

Parámetros	Valor
Velocidad de avance de la antorcha	100 mm/s
Distancia de la pieza a la antorcha	10 mm
Tasa de alimentación	Constante en volumen
Flujo de gas del plasma	2.0 L/min
Velocidad del gas de protección	Argón e hidrogeno 1.5 L/min
Velocidad del gas de transporte	Argón 2.0 L/min
Voltaje	20.6 - 23

Después del ataque químico, las muestras fueron analizadas mediante microscopía óptica. Éste análisis permitió evaluar los porcentajes de fases presentes utilizando el software (Imagen Pro Plus), por medio de microscopio óptico y se realizó una caracterización microestructural. De forma adicional se determinó el espaciamiento interdendrítico para conocer el porcentaje de WC que propicia un mayor espaciamiento interdendrítico, ya que por lo general, se busca que las dendritas sean pequeñas en una soldadura para evitar que se formen defectos originados en los pequeños brazos interdendríticos.

Después se expusieron las piezas a desgaste controlado por fricción a una temperatura de 850°C por 2 horas. El proceso utilizado para someter especímenes a fricción mediante la técnica de pin-on-disc consiste en el desgaste de contacto entre un pasador fijo y un disco giratorio se acerca el pin y se coloca una carga de 5kg.

Las muestras para ensayos fueron cortadas por electro erosionadora de hilo al fin de obtener especímenes de 3mm utilizando un disco de AISI 4340 templado y revenido con una dureza de 58 HRC, la duración del ensayo fue simulando un recorrido de 1000 m y 3000 m, a una velocidad de 2 m/s. Los resultados fueron evaluados en términos de pérdida de peso restando la masa final de la masa inicial de cada pin. Para ello se utilizó una balanza con exactitud de cuatro decimales (0.0001 g) en la figura 2.19 se observan las macrográficas de la zona de unión.

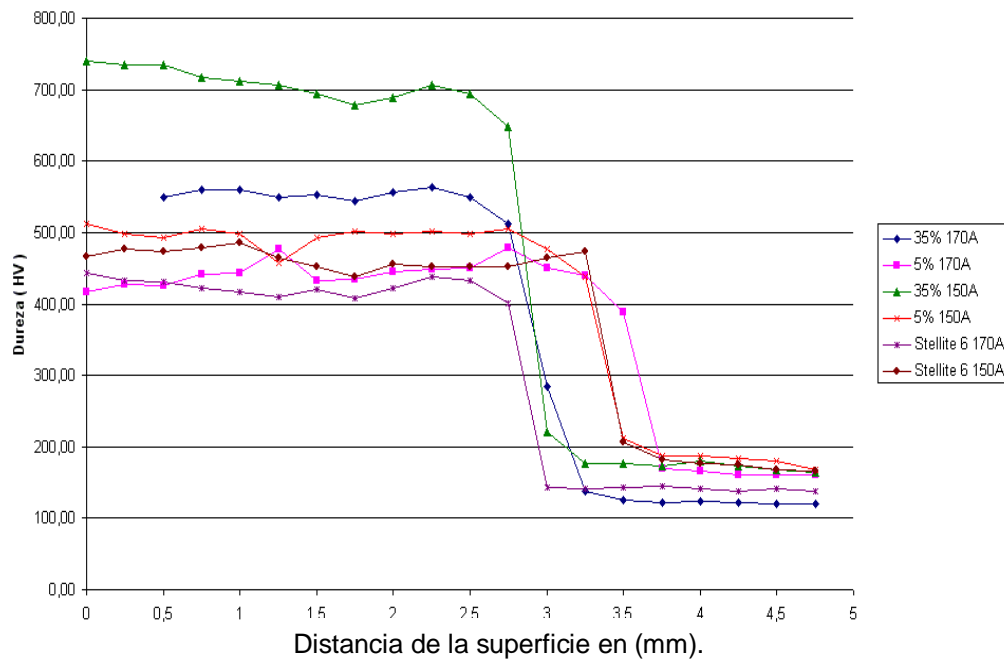


**Figura 2.19.** Corte transversal como resultado 150 A; (b), 170 A; (c) 5% WCoC 150 A; (d) 5% WCoC 170 A; (e) 35% WCoC 150 A; (f) 35% WCoC 170.

**Tabla 2.12.** Características de penetración del macro ataque con los dos aportes. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del cordón de soldadura

Muestra	Amperaje	Longitud (mm.)	Penetración (mm.)	Refuerzo (mm.)	Convexo (mm.)
CR	150	10.35	.3	3.96	.38
5%	150	11.26	.39	3.72	.33
35%	150	11.7	.49	3.38	.29
CR	170	14.5	.63	3.1	.21
5%	170	13.43	.56	3.49	.26
35%	170	11.88	.88	3.02	.25

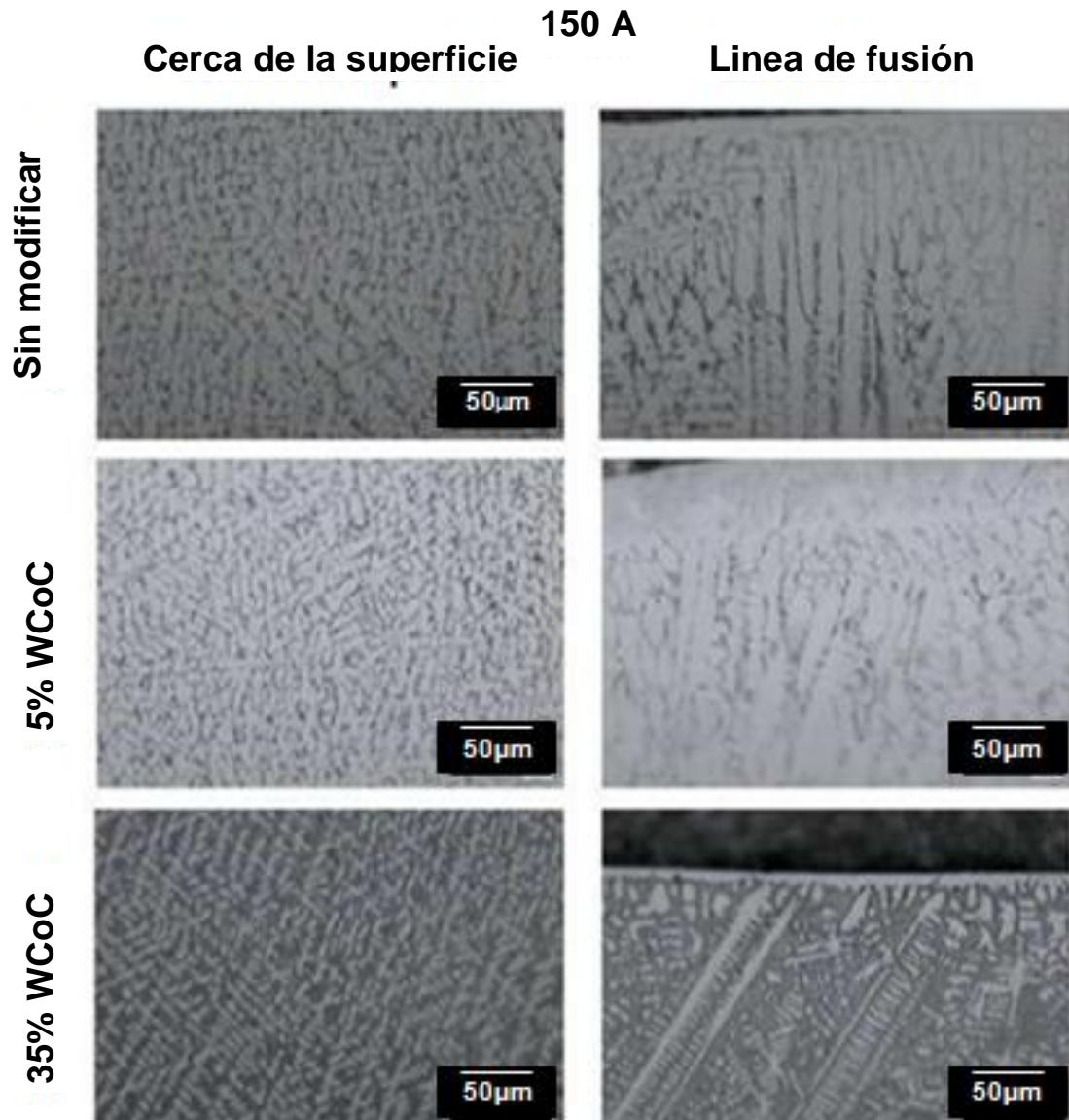
Posteriormente se determinó un perfil de microdureza en los especímenes donde se puede observar al agregar 35% WCoC al metal de aporte y utilizando una corriente de 150 A, se obtienen los mayores valores de dureza [1].



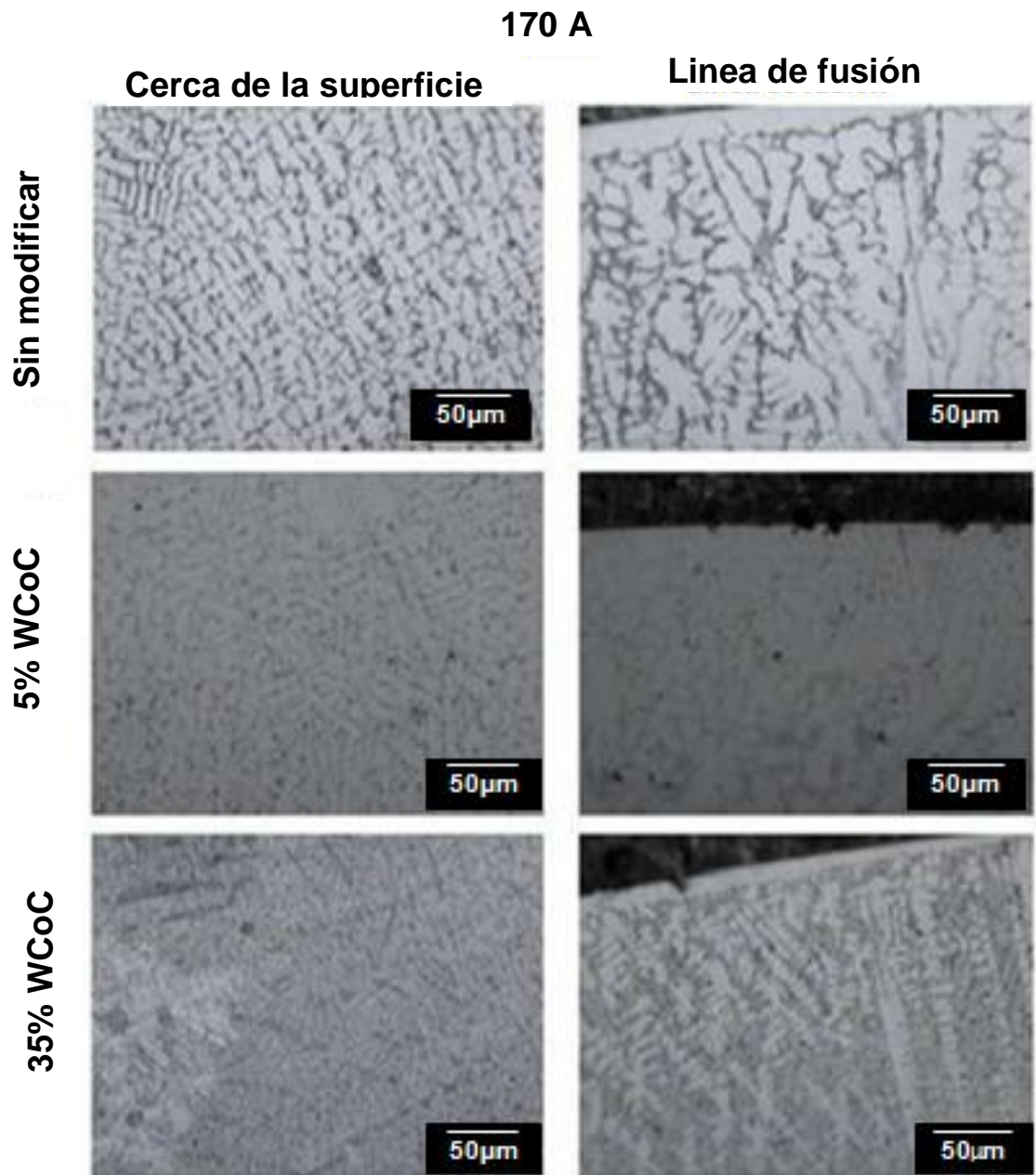
**Figura 2.20.** Perfiles de dureza realizados en las muestras.

En la figura 2.20 se observa los perfiles de dureza que se obtiene depositando el material con el proceso PTA y con la temperatura, donde la dureza disminuye cuando la temperatura aumenta, de este modo se puede explicar el comportamiento del aporte mezclado con 35% de WC y con amperaje de 170, comparado con las pruebas realizadas a 150 A.

En la figura 2.21. Se muestra las micrografías para los aceros recubiertos con el aporte base cobalto modificado con 5% y 35% de WCoC a 150 A con una magnificación de 500x.



**Figura 2.21.** Metalografías realizada sobre las muestras de sustrato AISI 1020 realizadas a 150 A y 500x [1].

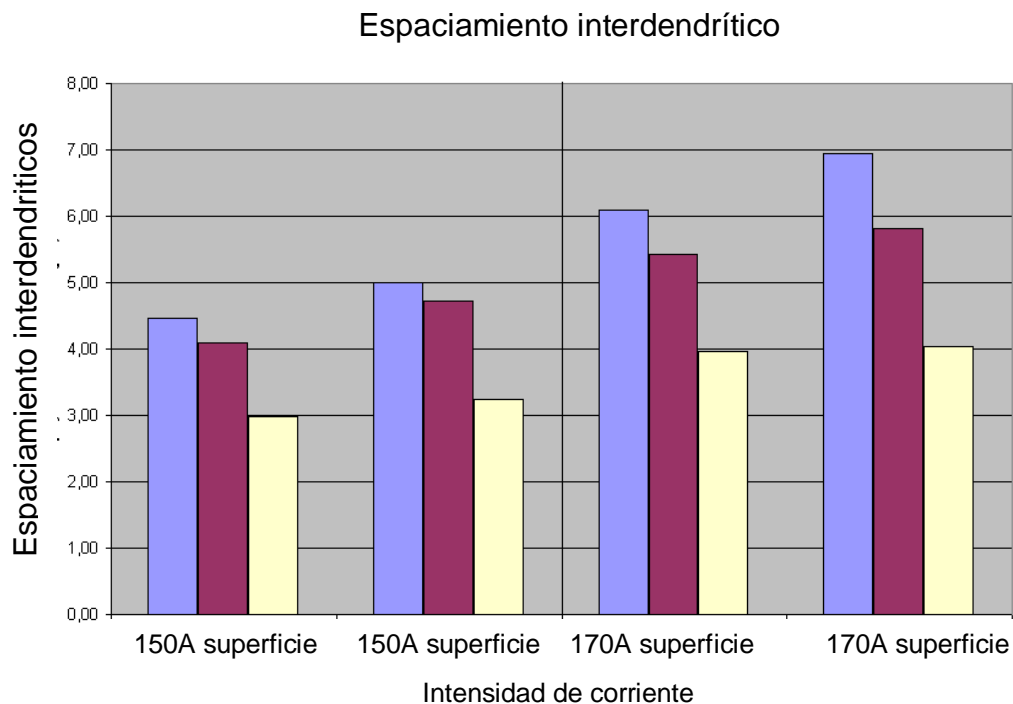


**Figura 2.22** Metalografías realizada sobre las muestras de sustrato AISI 1020 realizadas a 170 A y 500x [1]. Se debe de tener en consideración que las microestructuras obtenidas con una corriente de 150 A (Figura 2.21) presentan mayor grado de refinamiento que los de 170 A de (Figura 2.22).

Esta variación es debido a la mayor contribución de la temperatura proporcionada por una corriente de 170 A el cual favorece el enfriamiento más lento y crecimiento de grano.

La variación de la refinación tiene lugar incluso dentro de la misma estructura, de tal manera que las pruebas realizadas se puede apreciar un incremento considerable en el espaciamiento interdendrítico de las pruebas soldadas con amperaje más alto esto se debe al incremento del calor de entrada del material base dando más tiempo a que las dendritas incrementen su tamaño y en consecuencia su espaciamiento interdendrítico.

En la figura 2.23 se observa el espaciamiento interdendrítico donde el color azul es el material base, el morado contiene 5% WCoC y el color crema 35% WCoC [1].



**Figura 2.23.** Grafica de valores de espaciamiento dendrítico el cual se disminuye con 35% contenido de WCoC.

Se presentó cambio en porcentaje de volumen de las dendritas y del espaciamiento, como por ejemplo la muestra de 35% 150 A donde muestra un porcentaje de 44% de volumen en las dendritas y en el espaciamiento un 56%, donde el aumento considerable en el volumen interdendrítico es debido a un enfriamiento más rápido dando menos tiempo al crecimiento dendrítico de tal manera aumentando en volumen interdendrítico.

Para las condiciones analizadas en el estudio donde se modificó la aleación base cobalto con WCoC esto para poder buscar solución al desgaste de los componentes sujetos a desgaste manteniendo su buena soldabilidad.

El uso del proceso del PTA es recomendado por su buena soldabilidad, en recubrimientos base cobalto, incluso si se modifica con WCoC, permite lograr recubrimientos libres de agrietamiento con excelente apariencia general.

La alta concentración de energía proporcionada al proceso de plasma transferido por arco (PTA), permite una selectiva elección del proceso, ya que permite la disolución y dispersión fina de carburos añadidos en el aporte base cobalto, proporcionando el aumento de la dureza, lo que permite mejorar su rendimiento en la prueba de desgaste pin-on-disk.

Un aumento de la intensidad de corriente da como resultado en los revestimientos menor dureza en las estructuras y mayor dilución, Generándose un aumento en la cantidad de carburos WCoC añadido, mediante la aleación comercial base cobalto. Las estructuras presentan una mayor fracción volumétrica de la región interdendrítica por las mismas acciones y condiciones de transformación generando un aumento en la cantidad de carburos WCoC y una mayor dilución.



La exposición a alta temperatura mostró un pequeño aumento en la dureza de los recubrimientos, lo que sugiere una homogeneización y disolución de los carburos lo que resulta un endurecimiento de la solución sólida [12].

(E. Bourithis et al. 2002) estudió el endurecimiento superficial de un acero al carbono para herramientas de media aleación (Cr,Mo,V). Este acero se utiliza ampliamente para moldes y matrices en la industria de inyección de plásticos y aleaciones ligeras [21].

El material utilizado en la investigación es (Cr,Mo,V) acero para herramientas con una composición química que se muestra en la tabla 2.14, el acero se utiliza en la condición de recocido blando, con una dureza de 220 HV.

**Tabla 2.13.** Composición química % e.p. del sustrato.

Cr,Mo,V	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Bal.
	0.60	0.35	0.80	4.50	0.50	0.20	Fe

Las muestras utilizadas fueron en forma de placas de 43mmx 60mm con un espesor de 28mm, este material fue tratado superficialmente por el proceso de PTA. Antes de su tratamiento, los especímenes fueron pulidos con papel de lija hasta 1200 para eliminar los óxidos y obtener una superficie lisa.

La rugosidad se redujo al nivel de Ra  $\frac{1}{4}$  0.04 mm, lo mismo para todas las muestras, a fin de mantener estable el arco y evitar las fluctuaciones de corriente. El equipo principal utilizado fue un MP-200 con un arco de plasma con una consola capaz de controlar el plasma y el caudal de gas, una antorcha de plasma (PWH-3A) para bajo / medio de las aplicaciones actuales, una fuente de poder kempfi 2000 y una sistema automático para el control de la antorcha con movimientos en los planos horizontal (x-y-eje), los parámetros fijos de funcionamiento del sistema de PTA se muestran en la Tabla 2.15. Una primera

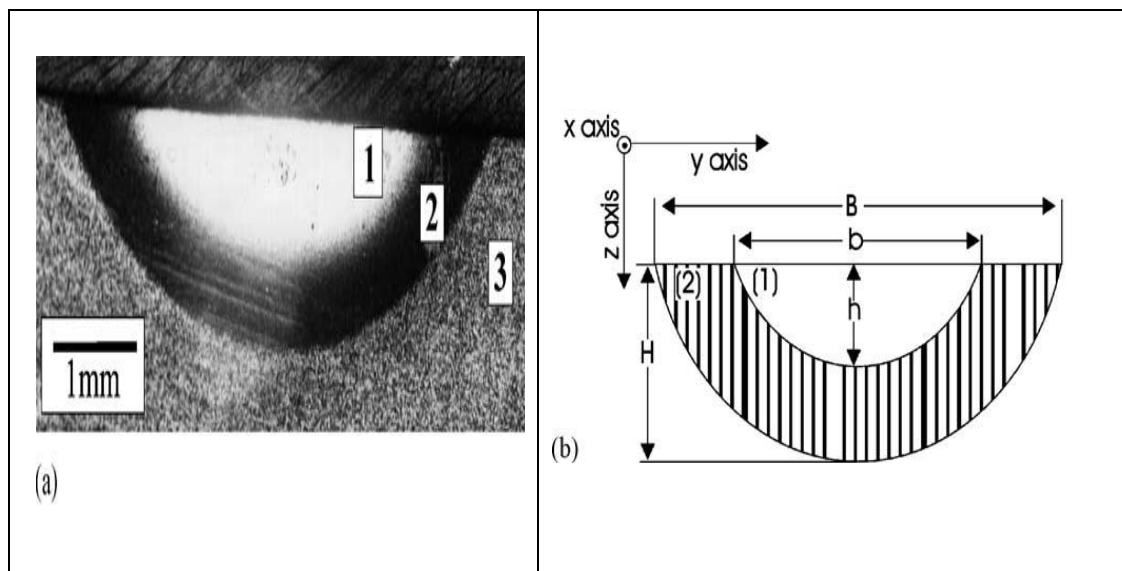
fase de la investigación se realizó a lo largo del eje central con una serie de pruebas con diferentes condiciones de arco. Donde el enfoque se realizó con referencia a las variables de (i), velocidad de recorrido (u) flujo de gas de plasma [19].

Todas las secciones se inspeccionaron visualmente y se realizaron pruebas de dureza vickers, haciendo un análisis verticalmente desde el metal de aporte y la ZAC hasta el metal base. La evaluación de las metalografías se llevó a cabo utilizando el microscopio óptico y microscopía electrónica de barrido (MEB). Una segunda fase basada en las condiciones óptimas identificadas durante los experimentos sobre toda la superficie de la muestra, un 60% de traslape en la zona de fusión donde se utilizó a fin de evitar fluctuaciones importantes en el cordón de soldadura. Para evitar sobrecalentamiento las muestras se colocaron sobre una placa de cobre y dentro de un tanque. Donde las variables del proceso se describen en la tabla 2.14. En la cual se puede observar los valores de las variables del proceso que causan mayor impacto en la aplicación del proceso de plasma transferido por arco donde cabe destacar las variables del gas de ionización, amperaje y velocidad de recorrido las cuales al surgir una modificación en sus valores afecta considerablemente en las características del cordón de soldadura.

**Tabla 2.14** variables del proceso [19].

Variables	Valores
Gas de plasma	Argón 99.9%
Gas de protección	Argón 99.9%
Gas de arrastre	1.6-4m <sup>3</sup> /s
Electrodo	W-2%
Diámetro del electrodo	2.4-3 mm
Ángulo del electrodo	45°
Diámetro del electrodo	1.8E-3 mm
Estándar de distancia	2.5E-3 mm
Diámetro recomendado	2.35E-3 mm

En la Figura 2.24. Se observa el macroataque del cordón y un esquema de medición de las características de penetración lograda en la experimentación marcando las 3 zonas presentes.

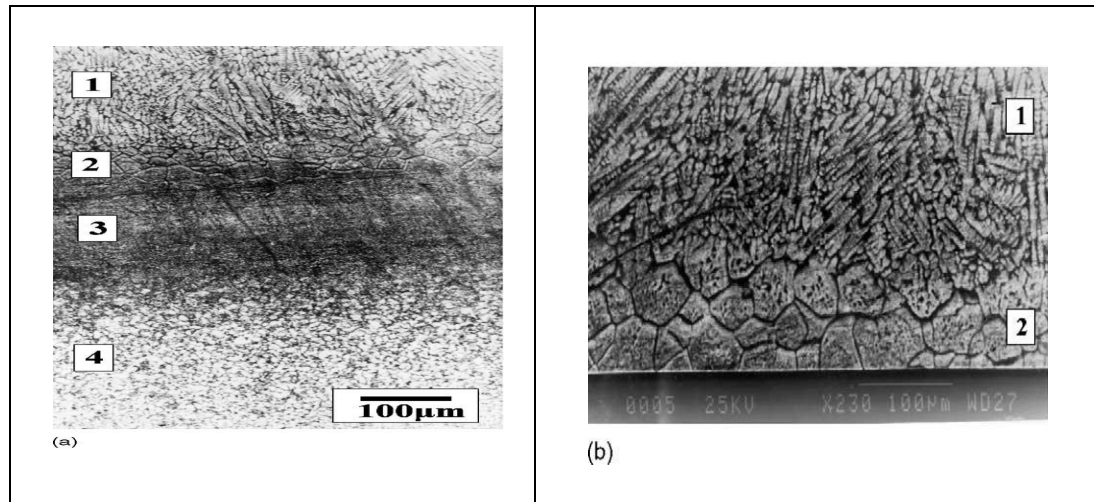
**Figura 2.24.** Macroataque y corte transversal para ubicación de las zonas [21].

La figura 2.24 se muestra un corte transversal con los siguientes parámetros del plasma, amperaje de 60, velocidad de  $2.7 \times 10^{-3}$  m/s y un caudal de  $1.7 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/min. Mostrando en el punto (1) una zona totalmente martensítica, 2) zona de austenización incompleta, 3) metales comunes no afectados. En el corte transversal en la figura 2.24 (b) se muestra un diagrama esquemático de un pase de plasma ilustrando (h, b, H) donde h es la penetración, b el espesor de la penetración y H la altura total de toda la zona afectada. Los siguientes puntos representan el tamaño del material totalmente afectado en el punto B. El ataque químico se realizó con una solución de ácido clorhídrico y nítrico en agua, con el fin de ser examinados por difracción de rayos X (DRX). Se demostró que los carburos presentes son del tipo  $M_7C_3$ .

Las microestructuras formadas son ferríticas con orígenes de dispersión uniforme carburos esférica ( $M_7C_3$ ) se ha transformado en una profundidad del orden de  $1.5 \times 10^{-3}$  m para una microestructura martensítica, que contiene una pequeña cantidad de austenita retenida. La dureza de los valores más altos alcanzados en comparación a los obtenidos con enfriamientos convencionales y los revenidos deben ser atribuidos a diferentes mecanismos, sobre todo el refinamiento de la microestructura durante solidificación rápida de la masa fundida y el endurecimiento secundario de la martensita.

Las grietas no están presentes en ninguno de los especímenes examinados, a pesar de las muy altas velocidades de enfriamiento alcanzadas, observándose el perfil de dureza no uniforme obtenido perpendicularmente al eje, dependiendo del tamaño de cada zona, que a su vez depende de los parámetros de funcionamiento utilizados.

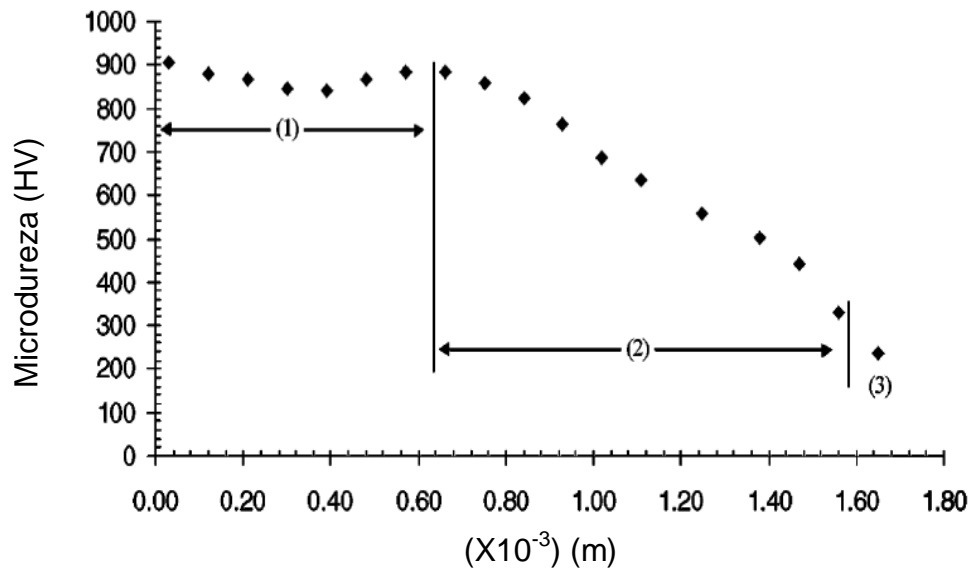
Una de las pruebas realizadas fue tratamiento térmico, dando como resultado un cambio en B y H que son el espesor y la altura [21].



**Figura 2.25.** Metalografía (a) líneas de fusión 110x, (b) 230X [19].

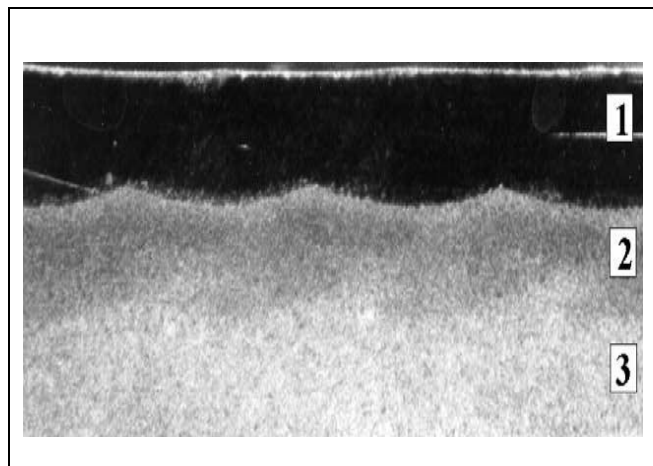
En la Figura 2.25 se muestra la metalografía de la sección transversal de una de las piezas unidas por plasma. La Figura 2.25a muestra varias zonas, (1) microestructura zona de fusión dendríticas, (2) crecimiento en conjunto de la superficie, (3) zona de enfriamiento en el sólido (4) zona de autenticación incompleta. En la Figura 2.25b se muestra un pase individual de plasma donde el punto (1) muestra la microestructura dendrítica de la zona de fusión, (2) área del crecimiento del grano.

En la figura 2.26 se muestra un barrido de durezas sobre las diversas zonas donde se puede apreciar un considerable aumento de la dureza Hv en la superficie de la zona tratada. Se muestran las durezas en 1) zona totalmente martensítica, 2) zona de austenización incompleta de plasma y 3) metal base.

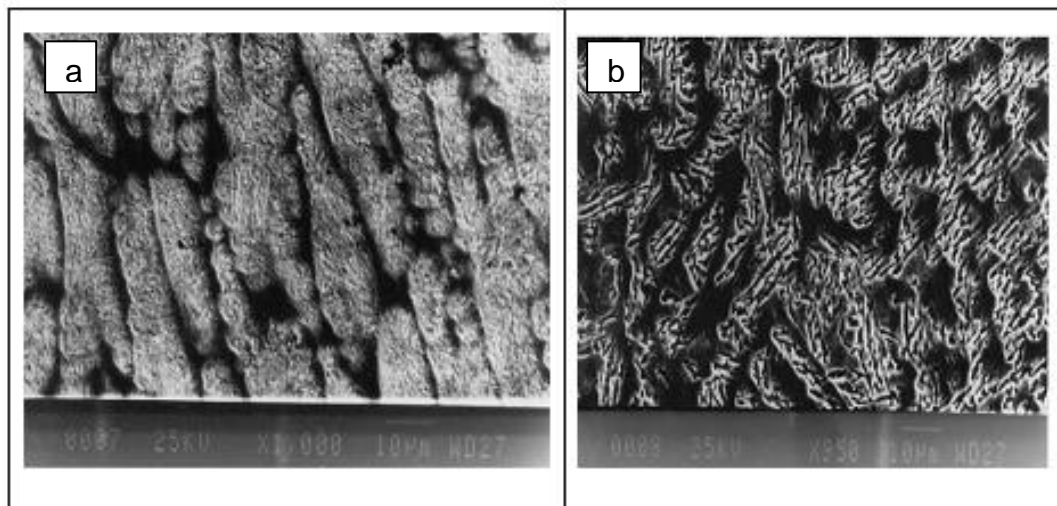


**Figura 2.26.** Perfil de microdureza a lo largo del cordón [21].

La figura 2.27 muestra una macrografía del recubrimiento. Corte de la sección transversal de la superficie tratada con PTA donde se utilizaron los siguientes parámetros: amperaje 70 A, velocidad  $2.7 \times 10^{-3}$  m/s, caudal de gas  $1.7 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s y se identifican 3 zonas. 1) zona martensítica completa, 2) zona fundida completamente austenizada y 3) metal base sin afectar.

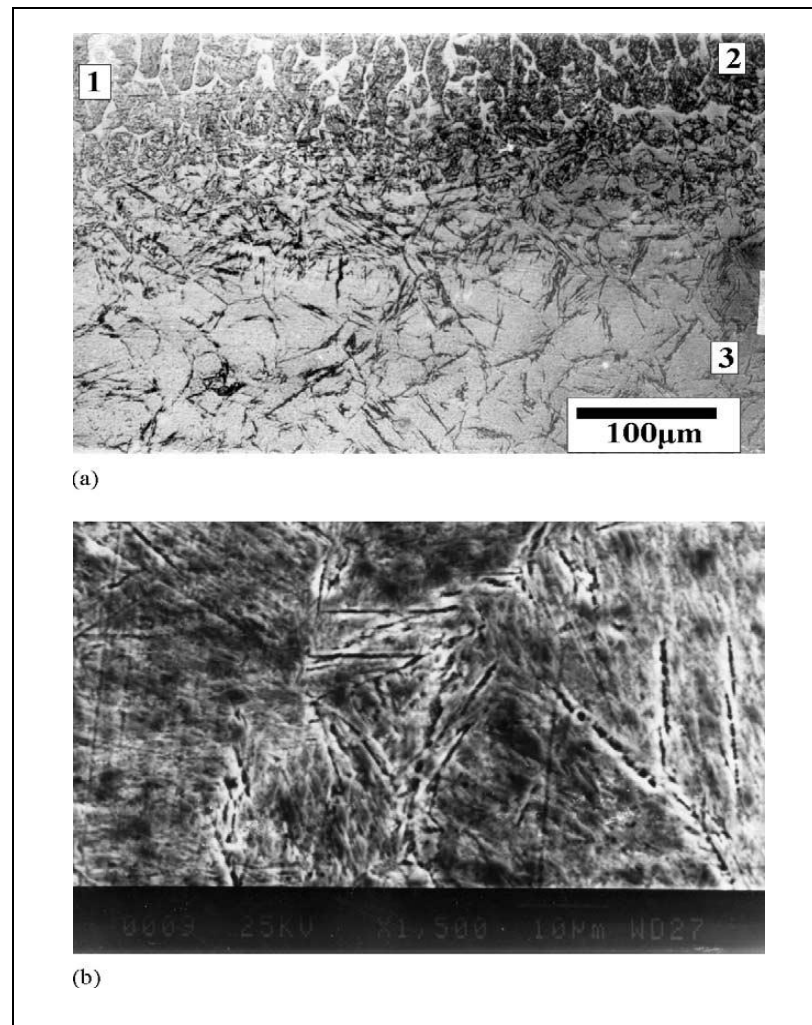


**Figura 2.27.** Macrografía del área tratada con una magnificación de 15X [19].



**Figura 2.28.** Superficie de estructura martensíticas analizada en la zona fundida donde a) tiene una magnificación de 1000 x, b) 950X [21].

En las siguientes imágenes se muestran la microestructura.



**Figura 2.29.** Corte en el eje x de la superficie fundida [21].

En la figura 2.29 (a) se muestran las siguientes zonas. (1) zona fundida con estructura martensítica, (2) zona con estructura de martensita revenida, (3) zona completa de austenita con martensita/vainita y en la figura 2.29 (b) muestra una zona austenizada completa con una microestructura martensita y bainita a 1500x.

En este trabajo se utilizó la evaluación de pin disk para evaluar la resistencia del material recargado.



Los resultados anteriores indican que el proceso de plasma transferido por arco como tratamiento térmico puede proporcionar una herramienta confiable para el tratamiento de superficie de acero Cr,Mo,V. Donde la aparición de microestructuras muy finas es debido al bajo aporte térmico, un incremento de los valores de dureza alcanzados y el excelente comportamiento tribológico.

Como era de esperarse en las zonas de fusión martensíticas, se producen durante la solidificación por las altas tasas de extracción de calor en el material, donde ofrece muy altos valores de dureza.

El enfriamiento en la condición de estado sólido en el área de austenita los valores de dureza más altos son consecuencia de un refinamiento de grano en estas áreas, también pueden ser atribuidas la caída de dureza a las pequeñas cantidades de austenita retenida, debido a su enfriamiento rápido la austenita no alcanza en transformar en ferrita o martensita.

Sobre la base de los resultados de esta investigación se pueden sacar las siguientes conclusiones. Con el proceso de plasma transferido por arco; que genera zonas endurecidas de tratamiento para superficies donde se puede lograr características geométricas con precisión determinada por la selección de los parámetros del proceso (PTA), no se observaron discontinuidades en la microdureza asociadas a la microestructura local.

El endurecimiento por PTA mejora la resistencia al desgaste para el acero de herramienta Cr, Mo,V. Un aumento de 340-440% en la resistencia al desgaste de las superficies tratadas de plasma con respecto a las superficies tratadas convencionalmente los procedimientos de ejecución comunes que producen una disminución local de la dureza y de los valores alcanzados por el efecto de templado producido por cada una de los pases de plasma, sin embargo, las superficies tratadas siempre presentan mejores características de dureza que

las obtenidas por el temple y revenido convencional no se detectando la aparición de grietas.

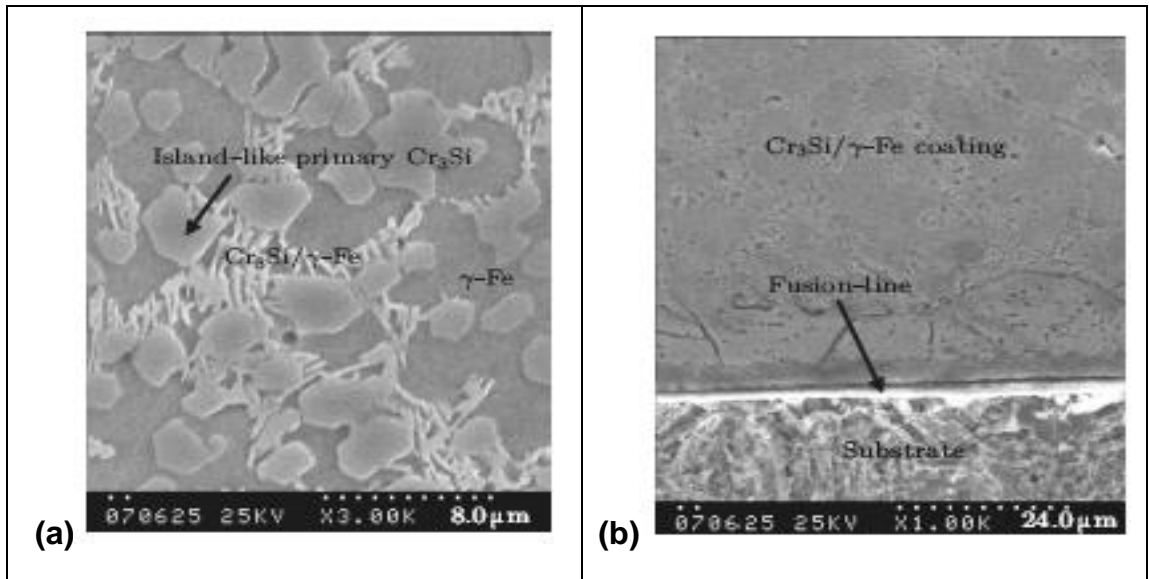
(LIU Yuan-Fu<sup>1,3</sup> et al. 2009) En este trabajo se realizo sobre un sustrato de acero 1045 con un aporte en polvo de  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$  aplicado con el equipo de plasma transferido por arco (PTA) utilizando los parámetros indicados en la tabla [23].

**Tabla 2.15.** Parámetros utilizados en la experimentación.

Parámetros	Valores
Corriente de trabajo	160 A
Voltaje de trabajo	40 V
Velocidad de la antorcha	600 (mm/min)
Flujo de gas de arrastre	(0.6 m <sup>3</sup> /h) argón
Flujo de gas de plasma	0.6 m <sup>3</sup> /h argón
Flujo de gas de protección	0.6 m <sup>3</sup> /h argón

Se llevaron acabo una serie de pruebas al recubrimiento en polvo  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$  comenzando por la evaluación metalografía y dureza Hv. Posteriormente se realizó una evaluación de resistencia a la corrosión comparando el recubrimiento utilizado en un sustrato 1045 y aporte  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$  con un acero inoxidable austenítico con la composición química del acero Cr18Ni9Ti [21].

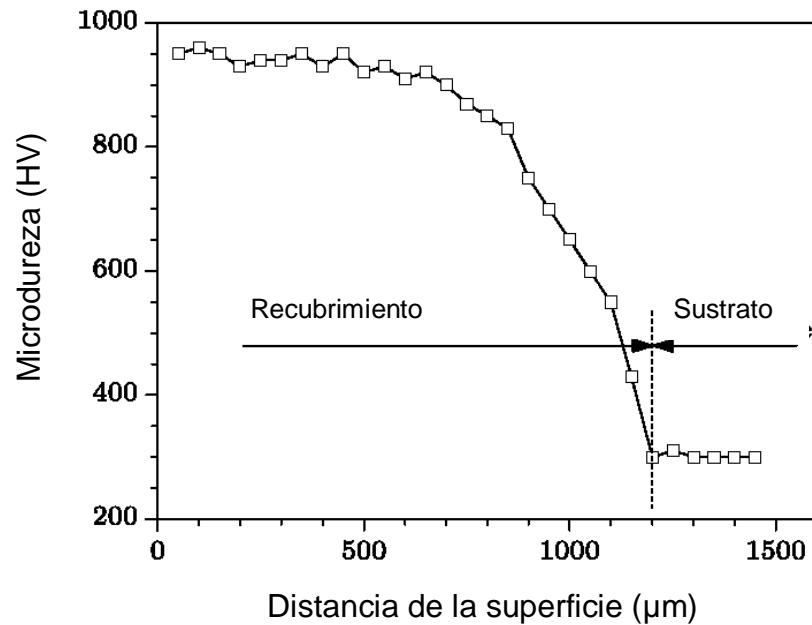
En la figura 2.31 se observa la microestructura del recubrimiento realizado con el equipo de PTA en un sustrato 1045 y un aporte  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$ .



**Figura 2.30.** a) Microestructura típica del proceso PTA con recubrimiento Cr<sub>3</sub>Si/γ-Fe, b) Línea de interface entre el Cr<sub>3</sub>Si y el normalizado 1045 [23].

La Figura 2.30 (a) Muestra las islas de Cr<sub>3</sub>Si las cuales se encuentran distribuidas entre las dendritas primarias y el resto de CrSi/Fe se encuentran entre los espacios interdendriticos de la matriz de Fe. (b) Se puede apreciar las características microestructurales de la zona de fusión. Pudiéndose observar en la zona estrecha de la capa Cr<sub>3</sub>Si/γ-Fe, donde el compuesto tiene una unión metalúrgica de alta calidad, debido a la solidificación dendrítica que existe en los límites de la línea de interface, con algunas micro porosidades [23].

En la Figura 2.31 se muestra el perfil de dureza y parte de la superficie del recubrimiento al interior de la muestra., de tal manera que el recubrimiento tiene una distribución de alta dureza uniforme excepto cerca de la línea de fusión donde la fracción de volumen de dendritas primarias Cr<sub>3</sub>Si es relativamente baja mostrada en la figura (Fig.2.31).



**Figura 2.31.** Perfil de dureza del recubrimiento [23].

En conclusión, la capa  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$  producidos en un sustrato de acero al carbono normalizados 0,45%; mediante la técnica de revestimiento de la PTA con polvo de Fe-50.5Cr-9.5Si (peso%), como los compuestos de esta aleación generan fases muy duras, resistentes al desgaste y la corrosión, donde las dendritas primarias  $\text{Cr}_3\text{Si}$  están uniformemente distribuidos en la solución sólida con una matriz sobresaturada  $\gamma\text{-Fe}$ , el recubrimiento  $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$  presentó una buena resistencia al desgaste en las evaluaciones realizadas [23].

# CAPÍTULO 3

## Discusión y análisis de bibliografía

El proceso de plasma transferido por arco es un proceso muy versátil por la facilidad de recargar el aporte en forma de polvo con muy bajo aporte térmico en el material por lo que se considera una herramienta para poder recuperar espesores o realizar recubrimientos de una amplia gama de aceros.

Dentro de la bibliografía analizada se encontró una investigación sobre la aplicación del proceso de (PTA) en un acero 1020 con una súper aleación base cobalto como aporte, En este estudio se modificaron las siguientes variables, ángulo del electrodo, tamaño de boquilla, gas de ionización y amperaje. Se estudió el impacto de éstas variables en el recubrimiento, para poder determinar cual de las variables antes mencionadas causan mayor impacto y el efecto que causa el metal de aporte base cobalto resistente a la abrasión, dando como resultado al término de la investigación, que la variable del ángulo del electrodo no es relevante, pero sin embargo el gas de ionización y el amperaje causan un mayor impacto en la calidad del cordón de soldadura y el aporte base cobalto presento una buena unión metalúrgica con el sustrato, logrando incrementar la dureza en el aporte para resistir el desgaste.

Otro de los trabajos presentados en esta revisión es de (Ricardo R, et al 2005). Realizada en un sustrato AISI 1020 y un aporte base cobalto resistente al desgaste abrasivo, modificando el aporte con carburo de tungsteno 5%, y 35% para estudiar el efecto causado por los parámetros en las modificaciones de la súper aleación, trabajando con los siguiente parámetros velocidad de avance de la antorcha, distancia de la antorcha a la pieza, voltaje, flujo

constante del polvo, flujo del gas de ionización, gas de arrastre y gas de protección. Se llegó a la conclusión que el incremento de temperatura causa un efecto directo en el espaciamiento interdendrítico y por lo tanto impacta a los valores de dureza.

Dentro de la bibliografía analizada se encontró una investigación de (E. Bourithis, et al 2002). Con un acero grado herramientas tratado superficialmente con el PTA, una de las principales aplicaciones del acero grado herramienta es la fabricación de moldes para inyección de plástico, obteniéndose el material con una dureza inicial de 220 Hv y al tratarlo superficialmente se alcanza a incrementar la dureza hasta 340-440%, El endurecimiento por PTA mejora la resistencia al desgaste para el acero de herramienta Cr, Mo, V. donde mostro un aumento considerable en la resistencia al desgaste de las superficies tratadas con el proceso de plasma transferido por arco con respecto a los tratados convencionalmente por tratamientos térmicos, presentándose los parámetros que tienen gran impacto sobre la soldadura que son el gas de ionización, velocidad de la antorcha y amperaje.

En el trabajo de ( LIU Yuan-Fu, et al 2009) se estudió un sustrato 1045 con un aporte en polvo de Cr<sub>3</sub>Si/γ-Fe donde se logro incrementar la resistencia a la abrasión en comparación con un acero inoxidable austenítico mostrando un incremento considerable en la dureza.

Cada uno de los trabajos realizados por los investigadores, hacen referencia a las variables del proceso que tienen mayor impacto, dando como resultado de la investigación del estado del arte, las variables que causan mayor impacto en el proceso son, el gas de ionización, amperaje y velocidad de avance de la antorcha, logrando detectar cuales son los parámetros y rangos en los que se maneja cada una de las pruebas, Por lo que dentro de la bibliografía encontrada se caracteriza por trabajar con diferentes sustratos, en donde los parámetros estudiados coinciden con los trabajos realizados por los investigadores antes mencionados. Por lo tanto la información más importante sobre los parámetros

fue recabada para poder establecer una referencia del funcionamiento y de rangos de operación, capacidades del los equipos y principales variables que causan mayor efecto en la soldadura del proceso de plasma transferido por arco (PTA).

# CAPÍTULO 4

## CASO DE ESTUDIO

### **4.1 Recuperación de componentes de acero grado herramienta D2 utilizando el proceso de (PTA)**

El proceso de plasma transferido por arco (PTA) ha recibido muy buena aceptación en aplicaciones donde se requiere una excelente resistencia al desgaste, corrosión y a altas temperaturas. Este proceso ofrece características metalúrgicas atractivas así como de una mínima distorsión, baja dilución y una microestructura homogénea en los revestimientos o cordones aplicados en comparación con otros procesos convencionales de soldadura, por ejemplo GTAW. El proceso PTA utiliza un material metálico en forma de polvo para unirse a un sustrato y producir un recubrimiento duro y resistente al desgaste el cual está metalúrgicamente unido al sustrato. En este trabajo se realizó un estudio del efecto del amperaje, voltaje y flujo de gas de plasma del proceso PTA, así como del precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la soldadura, y el tipo de metal de aporte en las características metalúrgicas y microestructurales de los revestimientos aplicados en el acero grado herramienta D2. La recuperación de los herramientas mediante el proceso PTA aporta un beneficio económico ya que el remplazo de estos representa un alto costo. Por lo tanto, es importante conocer el efecto de los parámetros del proceso PTA utilizado como método de recuperación de componentes metálicos de acero grado herramienta D2.



### **Procedimiento experimental.**

En este trabajo se empleo una fuente de poder Equipo eutronic gap 3000 ac/dc, rango de corriente del arco piloto de 5-100 A, rango de corriente del arco de soldadura: 5-300 A (AC) y 3-300 A (CC), corriente de soldadura con ciclo de trabajo al 100%:260 A y al 60% 300 A, con una tensión de circuito abierto 56v y tensión de la alimentación (50Hz) 3x380 V/415V.

Se utilizó una mesa de resistencias para precalentamiento y un horno para el tratamiento postsoldadura y el análisis de metalografía se utilizó Microscópio óptico reichert mef 4a nº 20150.

Para las pruebas de desgaste se utilizó el equipo de pin-on-disk de alta temperatura. Microtest MT2/60/SCM y el volumen desgastado se calculó mediante perfilometría de contacto [5].

### **Materiales**

El material base utilizado fue un acero grado herramienta AISI D2 (1.2379) tratado con una dureza de 60 HRc. Es un acero con alta resistencia al desgaste y a la abrasión con buena aplicación de corte, con alta templabilidad y tenacidad utilizado principalmente en la construcción de herramientas para trabajo en frío ya que por su alto contenido de carbono es difícil de soldar por que se presenta fácilmente agrietamiento. Donde el aporte utilizado se selección conforme AWS 5.1. En la tabla 4.1. Se muestra la composición química de los materiales utilizados en este estudio.

**Tabla 4.1.** Composición química del metal base.

Composición química (% e.p.)							
Elementos	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W
Metal base	1.55	0.35	0.35	11.5	0.8	0.8	
Metal de aporte M2	0.85	0.3	0.3	4.15	5	1.95	6.4
Metal de aporte D2	1.55	0.35	0.35	11.5	0.8	0.8	

**Desarrollo experimental.**

Se utilizaron probetas rectangulares de 10.5 x 5 x 3 cm, con filetes de 2 mm y un aporte en varilla D2. Realizando una evaluación metalografía, dureza y pin-on-disk.

Las primeras pruebas fueron realizadas con el aporte D2 en la recuperación de un filete de 2 mm, donde se añadió un solo cordón para recuperar el filete. En la prueba (A) con aporte D2 y M2 se realizó sin precalentamiento y sin tratamiento postsoldadura, las pruebas (B) se realizaron con aporte D2 y M2 donde se aplico en un filete de 2 mm sin precalentamiento pero con un tratamiento postsoldadura a 500°C durante 2 horas. Por último las pruebas (C) fueron realizadas con aporte D2 y M2 con precalentamiento a 230°C y enfriadas en las pruebas en arena, los parámetros que causan mayor impacto son el gas de ionización y el amperaje.

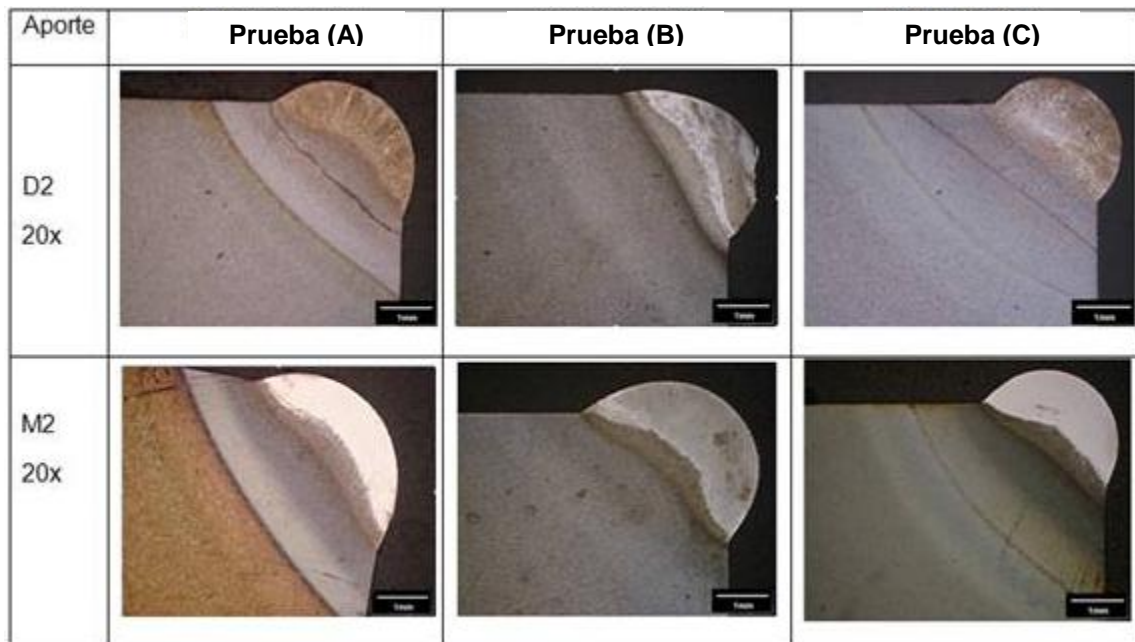
Los parámetros utilizados en la experimentación fueron constantes en las 6 pruebas, se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Parámetros utilizados para la experimentación.

PARAMETROS PTA									
Número de prueba	Amperaje	Voltaje	Corriente Pulsada piloto 5-140 A	Flujo de gas plasma .4-20 L/min	Flujo de gas de protección L/min	Corriente inicial 5 a 300A	Tiempo de corriente inicial 0-20seg	(bajada) 0-10	corriente externa limite 300A
1,2,3	53	28.5	5	1.2	10.5	5	0	2	80

### Discusión y análisis de resultados

En la figura 4.1 se observa los macroataques de la pruebas de filete con aporte D2 y M2 de 2mm, para las condiciones descritas previamente.



**Figura 4.1.** Macroataque 20x con nital 1% y vilella.

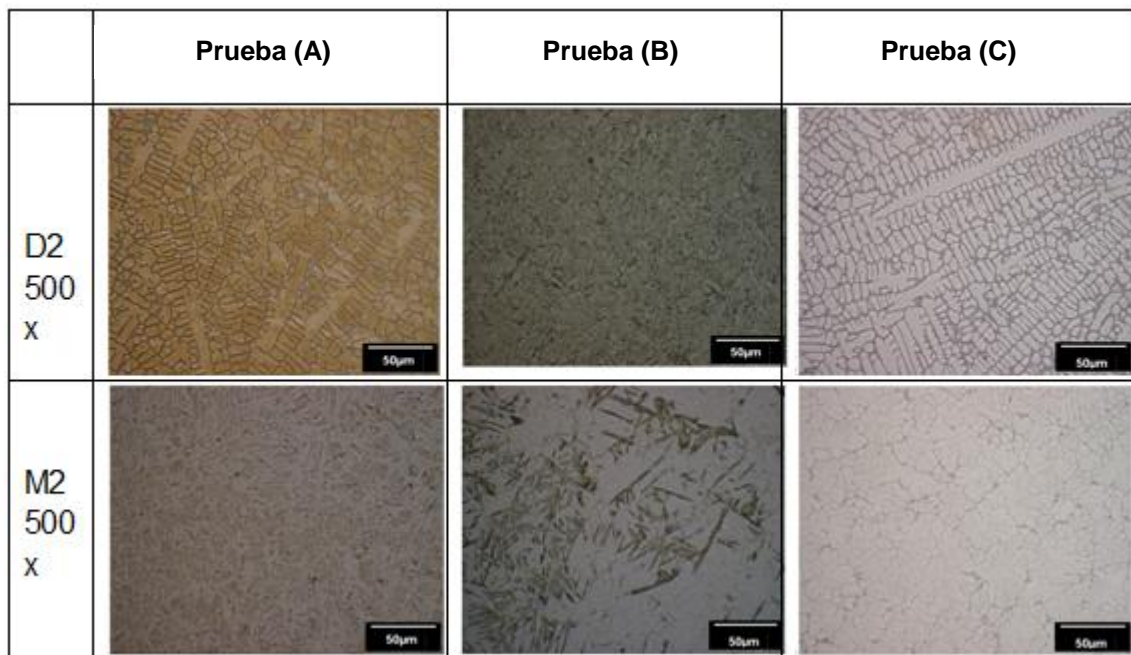
Se observa que la probeta (A) para el material de aporte D2 fracturó en la zona afectada por el calor debido al diferencial de temperatura y a la composición química del aporte M2 utilizado.

En la muestra (B) se observa la zona afectada por el calor donde se aplicó un tratamiento térmico postsoldadura a 500°C durante 2 horas.

Las probetas realizadas con un precalentamiento de 220°C disminuyen el diferencial de temperatura en consecuencia se tiene la disminución de fases duras debido a un enfriamiento rápido, el calor de entrada fue constante en las 6 probetas con un valor de 1.133158 k j/mm<sup>2</sup>.

### Análisis microestructural

Las siguientes microestructuras corresponden al baño de fusión, con el aporte D2 y M2 que se observan en la figura 4.2.



**Figura 4.2.** Metalografías del aporte a 500x.

En las metalografías de los materiales de aporte, se observa el impacto de las variables sin precalentamiento, con precalentamiento y tratamiento postsoldadura, donde la probeta (A) con aporte D2 se desarrolló un crecimiento dendrítico donde la muestra fracturó en la zona afectada por el calor por el

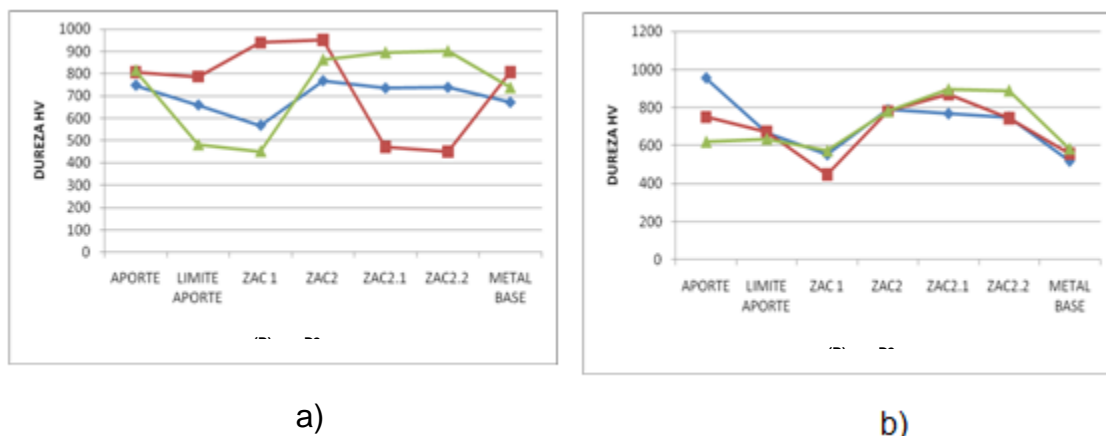
diferencial de temperatura, presentándose fases duras a tal grado que se fractura totalmente. Con el aporte M2 se observa una microestructura de martensita revenida con algo de austenita.

En las metalografías (B) con aporte D2, se presenta martensita revenida en su microestructura y con aporte M2 se presentan agujas de martensita con algo de austenita retenida.

La muestra (C) con aporte D2, se puede observar el crecimiento dendrítico con martensita y un poco de austenita retenida en los espacios interdendriticos, en la muestra con aporte M2 se pude observar un crecimiento dendrítico donde las dendritas son cortas y anchas esto se debe a la temperatura de precalentamiento [4].

### Perfiles de durezas

Se realizaron barridos de durezas HV 0,5 desde el la superficie del cordón hasta el material base, a una temperatura de 23 °C [7].



**Figura 4.3.** Pruebas de dureza realizadas con diferentes materiales de aporte a) D2, b) M2.

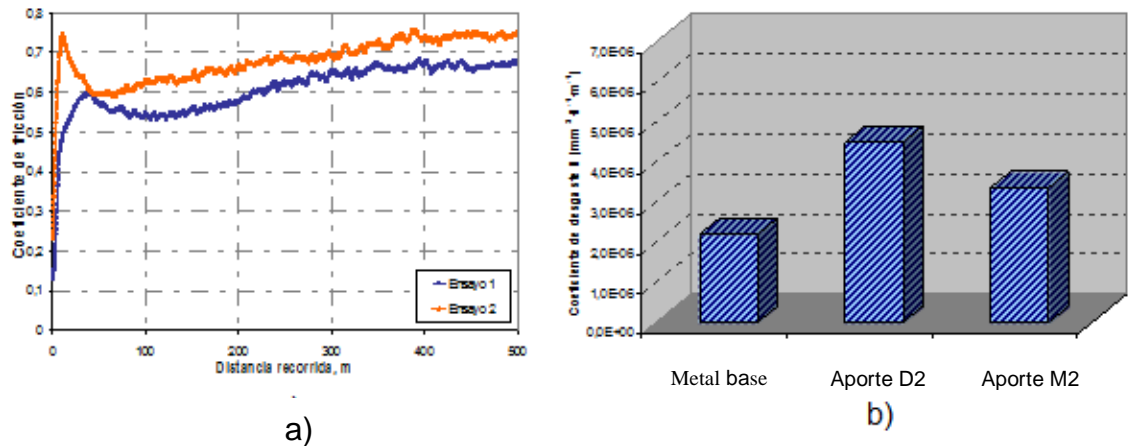
En un comparativo entre las durezas de las pruebas realizadas, la prueba (A) con aporte D2 presentó un considerable incremento en su dureza y agrietamiento por el enfriamiento rápido de la soldadura, a comparación con la prueba realizada en mismas condiciones pero con aporte M2, donde el perfil de durezas mostró que en la zona afectada la soldadura presento una menor dureza.

De la muestra (B) soldada en frío; pero con un tratamiento postsoldadura a 500°C durante 2 horas con aporte D2, mostró una dureza por encima del metal base y solo presentó un ablandamiento en la zona afectada por el calor 1, con aporte M2 presento un incremento considerable de dureza en el metal de aporte y un ablandamiento en la zona afectada 1 y posteriormente levantando la dureza por encima de metal base.

Con la muestra (C) soldada con un precalentamiento de 220°C con aporte D2, mostró un ablandamiento considerable en el límite del aporte y la zona afectada 1 posteriormente incrementando la dureza por encima del metal base y con aporte M2, presenta menor ablandamiento en la zona afectada 1 y un incremento considerable en la zonas afectadas por el calor [6]

### **Ensayo de Desgaste Pin-on-disk**

De acuerdo a los resultados obtenidos el volumen perdido del metal base es de  $1.32 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ , del aporte D2 fue  $2.25 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$  y el del aporte M2  $1.68 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$  donde el volumen perdido de los aportes más aproximado al del metal base es del M2, donde K es el coeficiente de desgaste como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4.** Resultados de las diferentes pruebas realizadas (a) comportamiento de las pruebas (b) resultados obtenidos de desgaste ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

### Conclusiones Parciales del caso de estudio.

#### Metalografía

Para las probetas (A) con aporte D2 presentó agrietamiento por el enfriamiento rápido y los esfuerzos acumulados, mostrando un crecimiento competitivo columnar en el aporte de la soldadura y en la línea de interface, en el aporte M2 no presento agrietamiento.

#### Respecto a las durezas

Los barridos de durezas realizados a las pruebas con aporte D2 y M2 mostraron que el aporte M2 tiene una dureza más uniforme, presentando un ablandamiento mínimo en las zonas afectadas por el calor 1 por lo que el aporte M2 es el que cumple con las características de microdureza.

Pin- on- disk de las pruebas realizadas se puede determinar la resistencia al desgaste mostrada con cada uno de los aportes D2, M2 en un sustrato D2 de tal manera que el aporte M2 presentó un coeficiente más cercano al del metal base

# CONCLUSIONES

La recopilación de información del estado del arte para el proceso de soldadura por plasma transferido por arco (PTA), servirá como base sólida para la correcta implementación del proceso en el sector automotriz en México ya que la información muestra buenas características para recuperación y revestimiento de diferentes materiales como acero para maquinaria, acero grado herramienta y aceros inoxidable.

Utilizando como aporte súper aleaciones base cobalto y base níquel. Dentro de la revisión bibliográfica realizada, donde se encontró diferentes trabajos con diversos investigadores de universidades coincidieron en las mismas variables que causan mayor impacto en el proceso (PTA) son el gas de ionización, la velocidad de avance y el amperaje.

Logrando identificar el efecto que causa el proceso PTA en los aceros grado herramienta; que es mantener las propiedades del aporte modificando lo menos posible su composición química, esto se logra manteniendo los niveles de dilución bajos entre el metal de aporte y el metal base logrando una buena unión metalúrgica.

De tal manera que el proceso de plasma transferido por arco se encuentra como una alternativa para la recuperación de componentes de acero grado herramienta por sus propiedades de bajo aporte térmico, baja distorsión y la ventaja de poder generar con precisión cordones de dimensiones muy pequeñas. Se detectó algunos de los países que están a la vanguardia con la investigación del proceso PTA son Brasil, India y China



# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Aceros grado herramienta para trabajo en caliente.	10
<b>Figura 2.2</b> Ejemplo de aceros para moldes de plástico.	10
<b>Figura 2.3.</b> Diferentes tipos de mecanismos de desgaste	14
<b>Figura 2.4.</b> Esquema de un mecanismo de desgaste por fricción.	15
<b>Figura 2.5.</b> Esquema representativo de abrasión por desgarramiento.	16
<b>Figura 2.6.</b> Esquema representativo de abrasión bajo esfuerzo.	17
<b>Figura 2.7.</b> Esquema ilustrativo de los componentes de la antorcha utilizada en el proceso de rociado térmico aplicando como material de aporte en polvo [6]	19
<b>Figura 2.8.</b> Esquema representativo del proceso de soldadura GTAW [2].	22
<b>Figura 2.9.</b> Esquema representativo del proceso de plasma por arco (PAW) [9]	23
<b>Figura 2.10.</b> Esquema de las modalidades del arco transferido y no transferido del arco de plasma	24
<b>Figura 2.11.</b> Esquema de boquilla aplicada en el proceso PTA [17].	30
<b>Figura 2.12.</b> (a) Boquilla del proceso PTA. (b) Aplicación del proceso PTA [11,19].	31

<b>Figura 2.13.</b> Esquema del equipo que conforma el proceso PTA [10].	32
<b>Figura 2.14.</b> Grafica comparativa de la difusión de Fe en los procesos PTA Y GTAW [17].	37
<b>Figura 2.15.</b> Esquema comparativo de las temperaturas de trabajo de los procesos PTA y TIG [4].	37
<b>Figura 2.16.</b> Imágenes del efecto de los parámetros utilizados en el proceso PTA en el acabado superficial.	44
<b>Figura 2.17.</b> Microestructuras de sección transversal que muestran el efecto de los parámetros del proceso PTA en la penetración.	45
<b>Figura 2.18.</b> Equipo PTA utilizado en la experimentación	49
<b>Figura 2.19.</b> Corte transversal como resultado 150 A; (b), 170 A; (c) 5% WCoC 150 A; (d) 5% WCoC 170 A; (e) 35% WCoC 150 A; (f) 35% WCoC 170.	51
<b>Figura 2.20.</b> Perfiles de dureza realizados en las muestras.	52
<b>Figura 2.21.</b> Metalografías realizada sobre las muestras de sustrato AISI 1020 realizadas a 150 A y 500x [1].	53
<b>Figura 2.22.</b> Metalografías realizada sobre las muestras de sustrato AISI 1020 realizadas a 170 A y 500x [1].	54
<b>Figura 2.23.</b> Grafica de valores de espaciamento dendrítico el cual se incrementan conforme al contenido de WCoC.	55
<b>Figura 2.24.</b> Macro ataque y corte transversal para ubicación de las zonas [19].	59

<b>Figura 2.25.</b> Metalografía (a) líneas de fusión 110x, (b) 230X [19].	61
<b>Figura 2.26.</b> Perfil de microdureza a lo largo del cordón [19].	62
<b>Figura. 2.27.</b> Macrografía del área tratada con una magnificación de 15X [19].	62
<b>Figura 2.28.</b> Se muestra la superficie de estructura martensítica analizada en la zona fundida donde a) tiene una magnificación de 1000x, b) 950X [19].	63
<b>Figura 2.29</b> se muestra un corte en el eje x de la superficie fundida [19].	64
<b>Figura 2.30.</b> a) Microestructura típica del proceso PTA con recubrimiento $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$ b) Línea de interface entre el $\text{Cr}_3\text{Si}$ y el normalizado 1045 [23].	66
<b>Figura 2.31.</b> Perfil de dureza del recubrimiento [21].	68
<b>Figura 4.1.</b> Macro ataque 20x con nital 1% y vilella.	75
<b>Figura 4.2.</b> Metalografías del aporte a 500x.	76
<b>Figura 4.3.</b> Dureza realizada con diferentes materiales de aporte a) D2, b) M2.	77
<b>Figura 4.4.</b> Resultados de las diferentes pruebas realizadas (a) comportamiento de las pruebas (b) resultados obtenidos de desgaste en $\text{k (mm}^3/\text{N.m)}$ .	79

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Características de los aceros grado herramienta	12
<b>Tabla 2.2</b> Composición química de algunos aceros grado herramienta y grado maquinaria.	13
<b>Tabla 2.3.</b> Parámetros del proceso plasma transferido por arco (PTA).	35
<b>Tabla 2.4</b> Comparativo del proceso PTA con otros procesos de soldadura [14].	36
<b>Tabla 2.5</b> Aplicaciones de diferentes aleaciones usadas en el proceso PTA [19].	38
<b>Tabla 2.6.</b> Composición química (% e.p.) del metal base y el aporte [1].	41
<b>Tabla 2.7.</b> Parámetros de estudio utilizados para la evaluación del proceso PTA [1].	42
<b>Tabla 2.8.</b> Parámetros utilizados en este estudio [1].	43
<b>Tabla 2.9.</b> Parámetros utilizados en este trabajo de investigación [4].	47
<b>Tabla 2.10.</b> Composición química (% e.p.) del metal base y metal de aporte [4].	48
<b>Tabla 2.11.</b> Parámetros que se mantuvieron fijos durante la deposición de los cordones.	49
<b>Tabla 2.12</b> Características de penetración el macro ataque con los dos aportes.	51
<b>Tabla 2.13.</b> Composición química % e.p. del sustrato	57
<b>Tabla 2.14.</b> Variables del proceso	59

<b>Tabla 2.15.</b> Parámetros utilizados en la experimentación	66
<b>Tabla 4.1.</b> Composición química de metal base.	74
<b>Tabla 4.2.</b> Parámetros utilizados para la experimentación	75

# BIBLIOGRAFÍA

**[1]** Hiromassa T. E. (2008). Evaluación de los parámetros del procesamiento sobre recargue PTA de la Universidad Federal de Paraná, la División de Tecnología, Departamento de Ingeniería Mecánica, Curitiba, Paraná, Brasil.

**[2]** Imágenes [internet] [actualizado enero 2009] [revisado abril 2010] disponible en [Centraltrust.net/.../productopdf/ACEROSSESPECIALES-WEB.pdf](http://Centraltrust.net/.../productopdf/ACEROSSESPECIALES-WEB.pdf) .

**[3]** Steven Thompson. (1999), Handbook of Mold, tool and dies. Woodhead. 211p.

**[4]** ASM Handbook, Volume 1(1993), Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section pp 1166-1171.

**[5]** H. Berns (1992) "New Materials Processes Experiences for Tooling" International European Conference on Tooling Materials Interlaken pp. 113-117.

**[6]** Díaz Cedré, Eduardo; Ortiz Méndez, Tamara Ma. (2003), Curso de Recuperación de Piezas. Universidad del Valle del Cauca. Cali. Colombia, pp. 18-26.

**[7]** Philip D. Harvey Engineering Properties of steel (1982) pp 432-453

**[8]** ASM Handbook (Revised vol. 4) Metals Handbook. (1998), Title proper has changed with v.4: ASM Handbook/Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee. Includes bibliographies and indexes. Contents: v. 4. Heat Treating. pp 413-428.

**[9]** Roberto Escalona Garcia M.C en la UNAM.Revicion Técnica Juan Antonio Torre Universidad Anáhuac, (1996) MANUAL DE SOLDADURA.Tomo 1, octava edición /American Welding society.R:L:O' brin editor.

**[10].** J.R.Condra, E.I Dupont de Nemours (1997) Welding handbook American welding society cap 10.

**[11]** Imágenes [internet] [actualizado enero 2008] [consultado marzo 2010] disponible,en.[http://www.sulzermetco.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/3534\\_read-5399/](http://www.sulzermetco.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1947/3534_read-5399/)

**[12]** Rizzo T.R (2005) Caracterización de metales de aporte base cobalto modificadas por la adición de carburo de tungsteno. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ Curitiba.

**[13].** Su, C.Y; Chou, C.P; Wu, B.C; Lih, W.C (1997). Plasma Transferred Arc Repair Welding of the Nickel-Base Superalloy IN-738-LC. Journal of Materials Engineering and Performance. Taiwan, pp 619–627.

**[14].** Shu-Yi, Tu; Ming-Der, Jean; Jen-Ting, Wang; Chun-Sen, Wu (2006). A robust design in hardfacing using a Plasma Transfer Arc. Int. J. Adv Manuf Technol. Taiwan, pp 889-896

**[15].** ISOTEC Bewegungstechnik GmbH A-3430 Tulln-Staasdorf, Wiesenweg 4 (internet) <http://www.isotec.at> All rights reserved © 09/2001 (consultado el 5 de junio del 2010)

**[16].** Wilden J; Bergmann, J.P; Frank, H (2006). Plasma Transferred Arc Welding-Modeling and Experimental Optimization. Journal of Thermal Spray Technology. Germany, pp 779-784.

**[17].** Lakshminarayanan, A.K; Balasubramanian, V; Varahamoorthy, R; Babu, S. (2008). Predicting the Dilution of Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stellite on Carbon Steel Using Response Surface Methodology. METALS AND MATERIALS International. India, pp 779-789

**[18].** Kou, Sindo (2003). Welding Metallurgy, Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. NJ, USA. pp 13-19.

**[19].** Imágenes [internet] [actualizado abril 2010] BR-17608 (SR0608). Deloro Stellite Brochure (2007). USA.

**[20]** K. Siva a,\* , N. Murugan b, V.P. Raghupathy 174 Modelling, (2008) analysis and optimization of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing © Copyright by International OCSCO World Press. All rights reserved. 2009 received in a revised form 28.02.2008.

**[21]** E. Bourithis, A. Tazedakis, G. Papadimitriou (2002) A study on the surface treatment of “Calmax” tool steel by a plasma transferred arc (PTA) process. Laboratory of Physical Metallurgy, National Technical University of Athens, 9 Heron Polytechniou Street, 15780 Athens.

**[22]** Steve Thompson (1999) Handbook of mould, tool and die repair welding, woodhead publishing ltd.



[23] LIU Yuan-Fu<sup>1,3\*\*</sup>, CHEN De-Qian<sup>1</sup>, HAN Jian-Min<sup>1</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, XU Xiang-Yang<sup>1</sup>, YANG Si-Ze<sup>3</sup>.(2009) Microstructure and Properties of Cr<sub>3</sub>Si/ $\gamma$ -Fe Composite Coating Prepared by Plasma Transferred Arc Cladding Technique<sup>1</sup>Institute of Materials Science and Engineering, Beijing Jiao tong University, Beijing 100044.

