

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN  
MATERIALES  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología**

**Optimización de los parámetros del proceso de plasma  
trasferido por arco (PTA) utilizado en la recuperación de  
componentes de acero grado herramienta D2**

**POR**

**ÁLVARO AGUIRRE SÁNCHEZ**

**TESIS**

**Maestría en Ciencia y Tecnología con  
Especialidad en Sistemas de Manufactura  
Avanzada**

**SALTILLO COAHUILA MEX.**

**20 DE DICIEMBRE DEL 2012**

**Optimización de los parámetros del proceso de plasma  
trasferido por arco PTA utilizado en la recuperación de  
componentes de acero grado herramienta D2**

Por

**Álvaro Aguirre Sánchez**

Tesis

Presentada al Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología

Sede

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de  
C.V.**

Como requisito parcial para obtener el grado académico de

**Maestro en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Sistemas  
de Manufactura Avanzada**

**Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología /Comimsa**

Saltillo Coahuila, 20 de Diciembre del 2012.

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno, **ÁLVARO AGUIRRE SÁNCHEZ** una vez leída y revisada la tesis titulada **Optimización de los parámetros del proceso de plasma trasferido por arco PTA utilizado en la recuperación de componentes de acero grado herramienta D2**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Sistemas de Manufactura Avanzada durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 20 días del mes de diciembre del año 2012.

Dr. Gregorio Salazar Herrera.  
Presidente

Dr. Luciano Eliezer Ramírez Vidaurri.  
Secretario

Dr. Héctor Manuel Hernández García  
Vocal

Dr. Marco Aurelio Jiménez Gómez  
Vocal

Dr. Felipe de Jesús García Vazquez  
Vocal

## **DEDICATORIA**

A DIOS Y A MI MAMÁ

Juana María Sánchez López

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme terminar esta etapa de mi vida y permitirme lograr mis objetivos de desarrollo académico.

A mi familia por su apoyo incondicional.

**A mi tutor**, Dr. Felipe de Jesús García Vazquez por brindarme su apoyo, amistad y su tiempo.

**A la codirectora de tesis la Doctora.** Ana Arizmendi Morquecho por el apoyo brindo para el manejo de los equipos en CIMAV Centro de Investigación de Materiales Avanzados.

También agradezco a todas las personas que me ayudaron directa e indirectamente para el desarrollo del proyecto

.

Quiero agradecer a las personas que me ayudaron de alguna forma a culminar este trabajo:

A mis Amigos: Alfonso, Fidencio, Juan; Omar, Xavier, Viridiana y Karla. Gracias a cada uno(a) por brindarme sus consejos y su valiosa amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

## ÍNDICE

|  |          |
|--|----------|
| SINTESIS .....   | 1        |
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....  | <b>2</b> |
| 1.1. Principales aplicaciones. ....  | 4        |
| <b>CAPITULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....                                       | <b>5</b> |
| 2.1. Descripción del problema.....   | 5        |
| 2.2. Preguntas de investigación .....  | 6        |
| 2.3. Hipótesis .....   | 6        |
| 2.4. Objetivos general y específicos .....   | 7        |
| 2.4.1. Objetivo general.....   | 7        |
| 2.4.2. Objetivos específicos.....  | 7        |
| 2.5. Justificación del proyecto .....  | 8        |
| 2.6. Delimitaciones.....   | 8        |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....  | <b>9</b> |
| <b>MARCO TEÓRICO</b> .....   | <b>9</b> |
| 3.1. Descripción del proceso de soldadura por plasma transferido<br>por arco (PTA) ..... | 9        |
| 3.2. Equipo utilizado en el proceso de PTA .....   | 11       |
| 3.3. Aplicaciones del proceso PTA .....  | 13       |
| 3.4. Recubrimientos por plasma transferido por arco .....                                | 14       |
| 3.5. Análisis de los parámetros de soldadura en el proceso PTA .....                     | 15       |
| 3.6. Aceros grado herramienta.....   | 18       |
| 3.6.1. Aceros grado herramienta para trabajo en frío .....                               | 18       |
| 3.6.2. Aceros grado herramienta para trabajo en caliente .....                           | 19       |
| 3.6.3. Aceros para moldes de plástico .....  | 19       |

|   |    |
|---|----|
| 3.7. Características de los aceros para herramienta.....  | 20 |
| 3.7.1. Desgaste por fricción .....  | 24 |
| 3.7.2. Impacto .....  | 24 |
| 3.7.3. Abrasión por desgarramiento.....   | 25 |
| 3.7.4. Abrasión bajo esfuerzo .....   | 26 |
| 3.7.5. Ensayo de desgaste pin-on-disk .....   | 27 |
| 3.8. Evaluación del efecto de los parámetros del proceso PTA<br>sobre recargue.....   | 29 |
| 3.9. Caracterización de metales de aporte base cobalto modificadas<br>por la adición de carburo de tungsteno aplicado en el proceso PTA .....                                     | 29 |
| 3.10. Análisis y optimización de los parámetros de soldadura para la<br>aplicación de recubrimientos base níquel depositados por arco de plasma<br>transferido .....              | 30 |
| 3.11. Endurecimiento superficial de un acero grado herramienta<br>(Cr-Mo-V) por plasma transferido por arco (PTA).....  | 30 |
| 3.12. Microestructura y propiedades de revestimiento compuesto por<br>$Cr_3Si/\gamma$ -Fe por plasma transferido arco.....  | 31 |
| 3.13. Proceso de soldadura de recargue en aceros al carbono sobre la<br>bases cuantitativa y cualitativa.....   | 31 |
| 3.14. Homogeneidad de compuesto de una matriz metálica depositada<br>por plasma transferido por arco .....  | 32 |
| 3.16 Aplicación de la metodología de la superficie de respuesta<br>aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA en un acero<br>al carbóno con un acero inoxidable ..... | 33 |
| 3.17 Protección de componentes altamente desgastados aplicando las<br>ventajas del proceso de plasma trasferido por arco PTA como una<br>tecnología para el recargue .....        | 33 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.18 Influencia de los parámetros del proceso de plasma trasferido por arco PTA en la microestructura y en sus propiedades mecánicas de resistencia al desgaste ..... | 34        |
| 3.19. Diseño de experimentos .....  | 34        |
| 3.20. Optimización de parámetros .....  | 35        |
| 3.21. Diseño de experimentos 3 <sup>3</sup> .....   | 35        |
| 3.22. Modelos de regresión lineal .....   | 37        |
| 3.23. Superficie de respuesta .....   | 38        |
| <b>CAPÍTULO4 METODOLOGÍA.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>CAPÍTULO 5 EXPERIMENTACIÓN.....</b>  | <b>41</b> |
| 5.1. Descripción del equipo utilizado.....  | 41        |
| 5.1.1. Fuente de po.....  | 41        |
| 5.1.2 Antorcha del proceso.....   | 43        |
| 5.1.3. Materiales para experimentación.....   | 44        |
| 5.2. Parámetros constantes del proceso .....  | 46        |
| 5.3. Parámetros de estudio del proceso .....  | 46        |
| 5.4. Avance de resultados .....   | 52        |
| 5.5. Metalografía del recubrimiento base Ni y W.....  | 56        |
| 5.6. Planteamiento de la superficie de respuesta.....   | 61        |
| 5.7. Caracterización microestructural .....   | 74        |
| 5.8. Caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).....  | 78        |
| 5.8.1. Identificación de carburos.....  | 79        |
| 5.8.2. Identificación de línea de interfase .....   | 82        |
| 5.8.3. Zona afectada por el calor .....   | 85        |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 5.9. Pruebas mecánicas .....    | 86 |
| 5.9.1. Pruebas de dureza .....  | 86 |
| 5.9.2. Pruebas de desgaste..... | 90 |
| 5.9.3. Resultados.....          | 92 |
| 6. CONCLUSIONES.....            | 96 |
| 6.1 BIBLIOGRAFÍA.....           | 97 |

## ÍNDICE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3. 1. Parámetros del proceso de plasma transferido por arco (PTA). ....                                 | 17 |
| Tabla 3. 2. Características de los aceros grado herramienta [18]......  | 21 |
| Tabla 3.3. Composición química (% e.p.) de algunos aceros grado<br>herramienta y grado maquinaria [18]. ..... | 22 |
| Tabla 5. 1. Características de la fuente de poder .....   | 42 |
| Tabla 5. 2. Parámetros de la tolva del proceso de PTA.....  | 43 |
| Tabla 5. 3. Tabla de composición química metal base y aporte .....  | 44 |
| Tabla 5. 4. Parámetros constantes utilizados en la experimentación. ....                                      | 46 |
| Tabla 5. 5. Variables de estudio del proceso. ....  | 46 |
| Tabla 5. 6. Combinaciones de los parámetros del proceso .....   | 48 |
| Tabla 5. 7. Evaluación visual de los recubrimientos. ....   | 49 |
| Tabla 5. 8. Valores de dilución medidos. ....   | 51 |
| Tabla 5. 9. Resultados de las características del cordón de soldaduras. ....                                  | 52 |
| Tabla 5. 10. Características del cordón de soldadura: ancho y alto.....                                       | 53 |
| Tabla 5. 11. Cordones de soldadura que no mostraron fracturas.....  | 55 |
| Tabla 5. 14. Microestructura del aporte base níquel y tungsteno. ....   | 57 |
| Tabla 5. 15. Microestructura del aporte y línea de interface. ....  | 58 |
| Tabla 5. 16. Microestructura de la línea de interfase y metal base.....                                       | 59 |
| Tabla 5. 17. Parámetros del proceso (PTA) de mayor impacto. ....  | 61 |
| Tabla 5. 18. Características del diseño central compuesto.....  | 61 |
| Tabla 5. 19. Superficie de respuesta .....  | 62 |
| Tabla 5. 20. Macrografías del efecto de los parámetros de estudio<br>de la (MRS).....                         | 64 |
| Tabla 5. 21. Evaluación de la sección transversal de los cordones.....  | 65 |
| Tabla 5. 22. Superficie de respuesta con valores de dilución para el análisis ..                              | 66 |
| Tabla 5. 23. Coeficientes de regresión estimados para dilución .....  | 67 |
| Tabla 5. 24. Análisis de varianza de la dilución del cordón de soldadura. ....                                | 68 |
| Tabla 5.25. Ajustes y residuos del análisis de dilución .....   | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 5. 26. Parámetros planteados para la optimización de dilución .....  | 72 |
| Tabla 5. 27. Análisis EDS de las zonas marcadas en la figura 5.21 .....  | 84 |
| Tabla 5. 28. Valores de % en peso del análisis realizado a los carburos .....  | 85 |
| Tabla 5. 29. Resultados de las pruebas de dureza realizadas en la sección<br>trasversal de los cordones de soldadura ..... | 87 |
| Tabla 5. 30. Parámetros utilizados en la prueba de tribología. ....  | 91 |

## ÍNDICE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 1. Esquema del interior de la boquilla aplicada en el proceso PTA [8].  | 10 |
| Figura 3. 2. Principio de aplicación del proceso PTA [8], [11].   | 12 |
| Figura 3.12. Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado $n$ como una función de la temperatura ( $x_1$ ) y la presión ( $x_2$ ) [22]. | 39 |
| Figura 3.13. Gráfica de contornos de una superficie de respuesta [22].  | 39 |
| Figura 5. 1. Fuente de poder PTA.   | 41 |
| Figura 5. 2. Tolva para polvo del proceso de PTA.   | 42 |
| Figura 5. 3. Antorcha vertical PTA.   | 44 |
| Figura 5. 4. Probetas del sustrato de acero D2.   | 45 |
| Figura 5.5. Cordones de soldadura con el equipo PTA.  | 45 |
| Figura 5. 6. Características del cordón medidas.  | 50 |
| Figura 5.7. Microestructura que ilustra la manera en que se realiza la medición de las áreas de refuerzo y penetración.   | 54 |
| Figura 5. 8. Muestra 2 en donde se mide el ancho y alto del cordón de soldadura.  | 54 |
| Figura 5. 9. Microestructura del aporte base níquel y cobalto.  | 56 |
| Figura 5. 10. Cordones de soldadura realizados con aporte base Fe en el sustrato de acero D2.   | 62 |
| Figura 5. 11. Área de refuerzo y de penetración medida para la experimentación.   | 63 |
| Figura 5. 12. Gráfica residuos para la dilución.  | 69 |
| Figura 5.13. Gráfica de contornos donde se describe la velocidad en función del amperaje.   | 70 |
| Figura 5. 14. Gráfica de la superficie de dilución respecto a la velocidad y el amperaje.   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5. 15. Gráfica del simulador de los resultados de los parámetros óptimos. ....   | 73 |
| Figura 5.16. a) Microestructura del aporte a 500X, b) Microestructura a 1000X. ....   | 74 |
| Figura 5.17. a) Microestructura del aporte a 200X, b) Microestructura a 500X. ....  | 75 |
| Figura 5. 18. Microestructura de la línea de interface a 1000X. ....  | 75 |
| Figura 5.19. Micro estructura de la zona afectada por el calor. ....  | 76 |
| Figura 5.20. a) Carburos primarios presentes en la microestructura del aporte a 500X, b) Carburos secundarios microestructura a 1000X. .... | 77 |
| Figura 5. 21. Cordón de soldadura número 4 sin fractura.....  | 78 |
| Figura 5. 22. Cordón de soldadura número 8 sin fractura.....  | 78 |
| Figura 5. 23. Metalografía tomada a 1100X.....  | 79 |
| Figura 5. 24. Gráfica Análisis puntual de EDS correspondiente a la matriz del aporte base Fe.....   | 79 |
| Figura 5. 25. Microanálisis de las partículas de Nb las cuales presentan una distribución uniformen en la matriz base Fe. ....              | 80 |
| Figura 5. 26. Análisis EDS correspondiente a las partículas de Nb distribuidas uniformemente.....   | 80 |
| Figura 5. 27. Medición de las partículas de Nb.....   | 81 |
| Figura 5. 28. Microestructura de la muestra 4 analizada en el MEB de la línea de interfase .....  | 82 |
| Figura 5. 29. Gráfica del análisis EDX de la zona FA1 de la línea de interfase. ....  | 83 |
| Figura 5. 30. Gráfica del análisis EDX de la zona FA2 de la línea de interface. ....  | 83 |
| Figura 5. 31. Gráfica del análisis EDX de la zona FA2 de la línea de interfase. ....  | 84 |
| Figura 5. 32. Microestructura tomada con el MEB de la zona afectada por el calor .....  | 85 |
| Figura 5. 33. Gráfica del análisis EDS de los carburos primarios en la zona afectada por el calor .....                                     | 85 |
| Figura 5.34. Mapeo de las pruebas de dureza realizada a los cordones de soldadura. ....   | 86 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.35. Gráfica del comportamiento de las pruebas de durezas realizadas a los recubrimientos..... | 88 |
| Figura 5. 36. Gráfica de la línea media del aporte 1, aporte 2, aporte 3. ....                         | 88 |
| Figura 5.37. Gráfica de la línea de medias (aporte1, aporte2, aporte3).....                            | 89 |
| Figura 5. 38. Fotografía del Tribómetro CSM Instruments .....  | 90 |
| Figura 5. 39. Recubrimientos realizados para evaluar con las pruebas de desgaste. ....                 | 92 |
| Figura 5. 40. Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción de los recubrimientos .....       | 93 |
| Figura 5. 41. Gráfica del volumen perdido de los coeficientes de fricción de los recubrimientos.....   | 94 |
| Figura 5. 42. Gráfica de rapidez del desgaste. ....  | 95 |

## Síntesis

En este trabajo se presenta una investigación en el estudio de la viabilidad recuperación de componentes de acero grado herramienta D2 aplicando el proceso de Plasma Trasferido por Arco (PTA). En la actualidad la recuperación de componentes sometidos al desgaste presenta una creciente demanda del sector industrial automotriz de estampado donde la mayoría de los troqueles están fabricados con acero grado herramienta. La mayoría de los componentes son maquinados y enviados desde el extranjero. Lo cual genera la necesidad de promover y generar alternativas de recuperación de componentes para poder satisfacer este requerimiento industrial de empresas nacionales e internacionales. Por lo tanto, el proceso de plasma transferido por arco es una opción para hacer una recuperación de buena calidad, ya que los niveles de dilución son bajos en comparación con otros procesos de soldadura por fusión utilizados para la recuperación de componentes tales como GTAW, SAW, SMAW por mencionar algunos.

En esta investigación se describe el funcionamiento del proceso, variables de mayor impacto y la interacción de esas variables que causan mayor efecto en el proceso de recuperación de componentes aplicando un aporte en polvo base Fe con adiciones de Nb. En este trabajo se realizó una optimización de los parámetros en función del porcentaje de dilución, obteniendo como resultado un modelo con una predicción aceptable con respecto a los valores reales medidos durante la experimentación.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la creciente demanda de componentes de acero grado herramienta para la industria de estampado, embutido, extrusión, corte etc. demanda de nuevas alternativas de reparación para sus componentes. Estos componentes están fabricados de acero grado herramienta en específico AISI D2 estos componentes tienen gran aplicación debido a sus propiedades mecánicas y su alta resistencia al desgaste, sin embargo los procesos de recuperación utilizados en la actualidad como SMAW, GTAW por citar algunos ejemplos, muestran bajos valores de la relación mencionada. El método que se propone como alternativa de recuperación de componentes es el proceso de plasma transferido por arco (PTA) [1]. Los componentes de acero D2 presentan buenas características para construcción de componentes sujetos a la abrasión y a esfuerzos de impacto. Sin embargo, son difíciles de soldar debido a su alto contenido de carbono y alta dureza, ya que la soldadura se enfría rápidamente provocando que las zonas afectadas por el calor presente un considerable endurecimiento, además de presentar discontinuidades en la unión [2].

El resultado son tensiones térmicas que pueden generar agrietamiento, por lo que el proceso de PTA produce zonas afectadas térmicamente mucho menores que los procesos típicos, debido a que el calor de entrada obtenido en el sustrato es menor ya que este proceso realiza aporte de material mediante polvo y varilla. En este proceso se obtiene un valor de dilución con un rango

del 5 al 20% tomando en cuenta la fiabilidad en el control de los parámetros y la flexibilidad en la elección del material a depositar y la pieza a recuperar donde la dilución es el área de penetración entre el área de penetración mas el área de refuerzo por cien [2].

## 1.1. Principales aplicaciones.

En general el uso del proceso de PTA presenta grandes ventajas para la recuperación de componentes que están sometidos a condiciones de desgaste severos en la industria automotriz como rodillos, componentes de herramientas de estampado grado herramienta y componentes expuestos a corrosión [3], donde las ventajas del proceso se presentan en la siguiente lista.

Ventajas

- Alta repetitividad, un grado elevado de automatización del proceso de soldadura.
- Una acumulación de soldadura uniforme, este proceso PTA ofrece bajos grados de dilución.
- Combinaciones de materiales críticos los cuales pueden ser utilizados para el proceso de plasma de superficies.
- Los recubrimientos son completamente densos y también muy resistentes a la corrosión.
- Las imperfecciones en la superficie pueden ser llenadas y maquinadas
- Las superficies recuperadas son terminales o sub-terminales y de aplicaciones rápidas.
- Este proceso produce diluciones bajas del 5 al 20% en función de la aplicación del proceso.
- Es posible mantener las propiedades del depósito incluso en un solo paso del recubrimiento [4] [5].

# CAPÍTULO 2

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se describen los puntos importantes para el desarrollo de este trabajo, se inicia con el planteamiento del problema, objetivos general y específico, hipótesis, preguntas de investigación, justificaciones y delimitaciones consideradas para la solución del problema.

### **2.1. Descripción del problema**

El problema planteado en esta investigación es que no existe la definición de los parámetros óptimos para la recuperación de los aceros grado herramienta en específico D2 aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA ya que en comparación con otros procesos convencionales aplicados para la recuperación de componentes como SMAW, GTAW, SAW y PAW, el proceso (PTA) presenta niveles de dilución bajos a comparación de otros procesos [6].

## **2.2. Preguntas de investigación**

- ¿Cuál es la principal problemática que se presenta al recuperar componentes de acero grado herramienta D2 con el proceso PTA?
- ¿Cuáles son los parámetros más significativos del proceso PTA aplicados en la recuperación de componentes de acero grado herramienta D2?.
- ¿Se pueden optimizar los parámetros del proceso PTA aplicado en la recuperación de un acero grado herramienta D2?
- ¿Qué tanto se puede disminuir la dilución conservando buenas propiedades metalúrgicas de la unión?
- ¿Cuál es el impacto que tienen los parámetros del proceso PTA en las propiedades metalúrgicas del cordón de soldadura?

## **2.3. Hipótesis**

Mediante el proceso de plasma transferido por arco PTA se puede disminuir la dilución en sustratos de acero D2 sin perder las propiedades mecánicas optimizando los parámetros de velocidad de avance, amperaje y temperatura

Se pueden obtener porcentajes de dilución adecuados que cumplan las características microestructurales, de desgaste y mecánicas requeridas.

## **2.4. Objetivos general y específicos**

### **2.4.1. Objetivo general**

Realizar la optimización de los parámetros del proceso de plasma transferido por arco (PTA) con aplicación de dos aportes en forma de polvo para obtener propiedades metalúrgicas y microestructurales adecuadas en la superficie de los componentes de acero grado herramienta D2.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte en la aplicación del proceso de plasma transferido por arco en recuperación de componentes de acero grado herramienta en específico D2.
- Identificar los parámetros más significativos del proceso PTA aplicados en la recuperación de componentes de acero grado herramienta D2.
- Establecer un diseño de experimentos con aplicación de los parámetros que presentan un mayor efecto en las características de la soldadura.
- Realizar una optimización de los parámetros del proceso PTA, para obtener los mejores resultados de este proceso aplicado en la superficie de los componentes de acero grado herramienta.
- Analizar el impacto que tienen los parámetros del proceso PTA en las propiedades metalúrgicas del cordón de soldadura.
- Realizar ensayos de microdureza y pruebas de desgaste en los componentes de acero grado herramienta D2.

## **2.5. Justificación del proyecto**

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 [3]. Por tal motivo, se propone realizar la recuperación de componentes mecánicos para evitar esa importante salida de capital en el país. Esto con aplicación del proceso de plasma transferido por arco (PTA). El conocimiento generado aportará grandes beneficios tales como prolongar la vida útil de componentes sujetos a desgaste severo, así como también reducir costos de mantenimiento en la recuperación de piezas y el estudio de la aplicación del proceso en componentes de acero grado herramienta ya que es poco estudiado la aplicación del proceso (PTA) [4].

## **2.6. Delimitaciones**

Encontrar los parámetros óptimos para la recuperación de componentes de acero grado herramienta en específico del acero D2 aplicando el proceso de plasma transferido por arco (PTA) e implementando una metodología de investigación con herramientas tecnológicas y estadísticas, mediante la aplicación de software. Para implementar el proceso en el sector industrial satisfaciendo la demanda del sector productivo.

# CAPÍTULO 3

## MARCO TEÓRICO

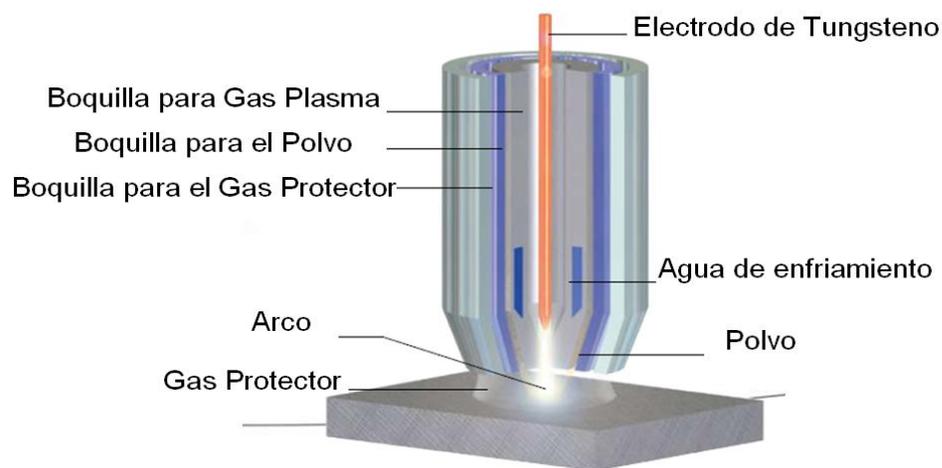
### 3.1. Descripción del proceso de soldadura por plasma transferido por arco (PTA)

El proceso Plasma Transferido por Arco PTA utiliza un metal de aporte 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 pueden ser resistentes a la corrosión y ser completamente densos para estar en ambientes extremos como fricción, abrasión etc. sometidos a desgaste [3]. En este proceso un arco piloto es generado entre un electrodo y un ánodo (boquilla). El gas utilizado generalmente es argón o una mezcla argón-helio, este gas es ionizado al estado de plasma logrando que sea eléctricamente conductor [6]. Esto genera un arco transferido entre el electrodo y la pieza, creando un charco de fusión en la superficie de la pieza de trabajo. El material del recubrimiento se proyecta hacia el haz de plasma, depositándolo sobre el objeto.

El proceso PTA se aplica por medio de una boquilla cuya estructura interna se muestra en la figura 3.1. 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 y aumente 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 gases. 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 [7]. 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 buena unión metalúrgica entre el metal base y el aporte presentando menos tendencia a la distorsión.

El proceso PTA tiene las siguientes características: los depósitos presentan dimensiones aproximadamente de 0.01" de espesor por 3/16" de ancho y máximo 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. El proceso es favorable para la automatización, lo cual genera una buena precisión de la soldadura.

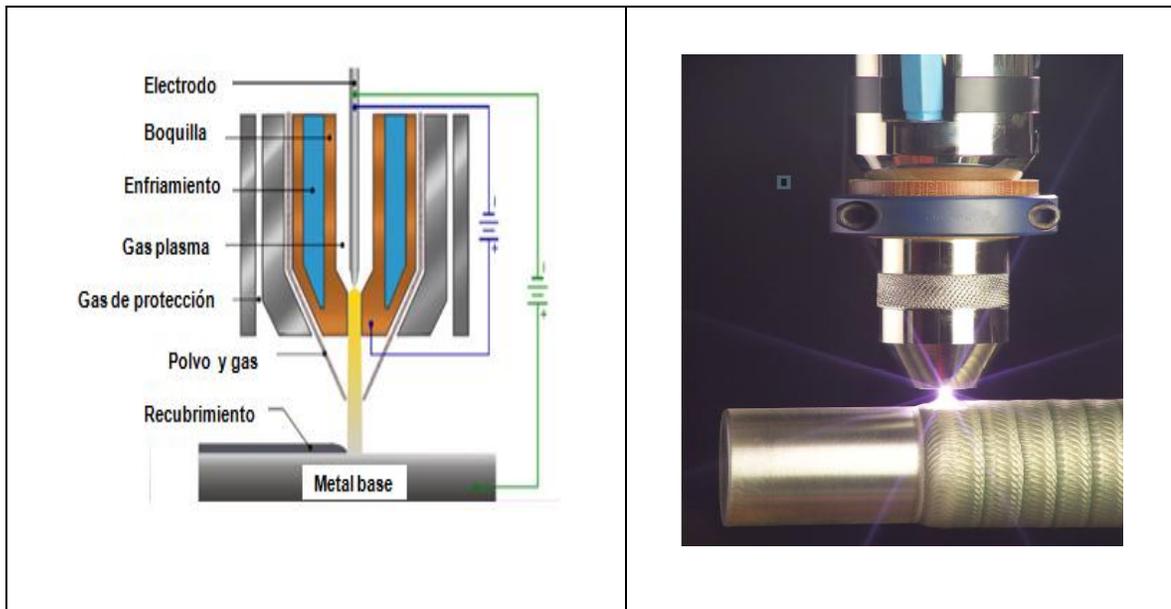


**Figura 3. 1.** Esquema del interior de la boquilla aplicada en el proceso PTA [8].

### **3.2. Equipo utilizado en el proceso de PTA**

Este metal de aporte se hace fluir por medio de un gas de arrastre con velocidad variable. El proceso 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 [10].

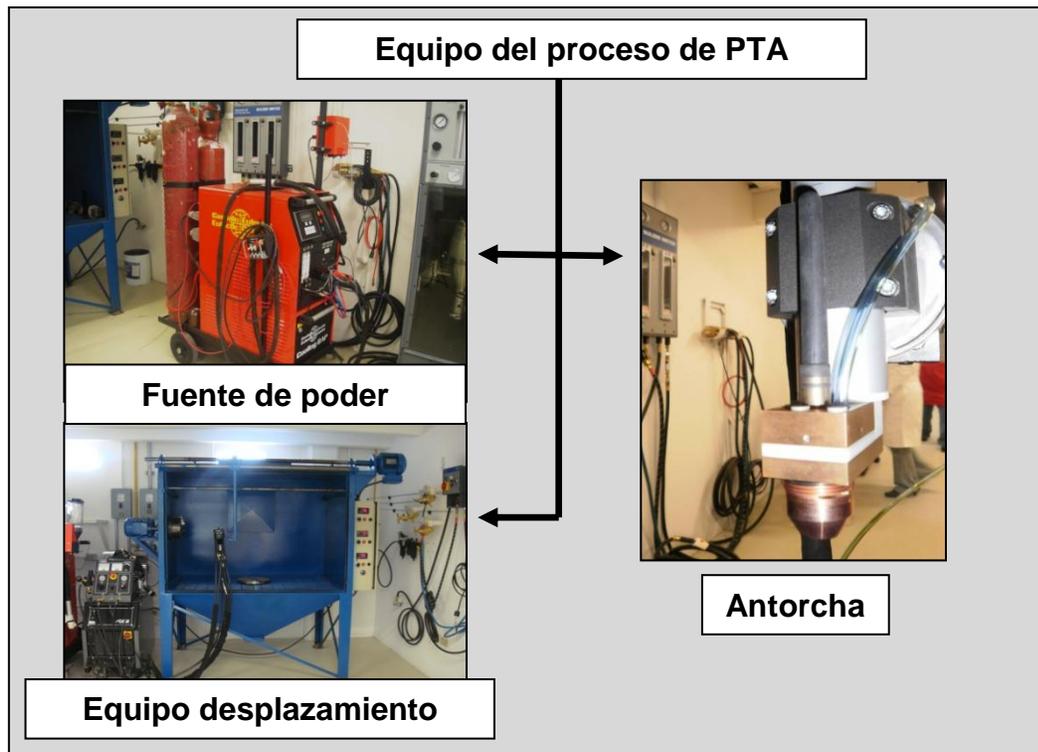
Este arco de transferencia es el que funde los polvos del metal de aporte, también funde una pequeña capa de la pieza de trabajo. Los metales base y de aporte solidifican de manera que se unen en una capa de espesor muy pequeño, produciéndose de esta forma la unión entre los metales. Se hace fluir una cantidad adicional de argón que sirve como protector en la zona de fusión, como se observa en la figura 3.2 muestra otra perspectiva del proceso de soldadura por PTA.



**Figura 3. 2.** Principio de aplicación del proceso PTA [8], [11].

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 mantienen una altas resistencias al desgaste que caracteriza al metal de aporte.

En la figura 3.3 se observa un esquema de los componentes del proceso PTA. Este consta de una fuente de poder 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 el cual es de una aleación de tungsteno, esta consta de canales para el paso de gas y de agua para enfriamiento, además incluye una guarda para cubrir el orificio constrictivo por donde fluye el gas de protección [12]. El proceso cuenta con una cabina de extracción de gases, humos y polvos en la cual además se encuentra instalado un dispositivo donde se coloca la antorcha pudiéndose controlar la velocidad de desplazamiento.



**Figura 3.3.** Esquema del equipo que conforma el proceso PTA.

### 3.3. 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 que además de proteger contra el desgaste, protegen contra ambientes corrosivos o para aplicaciones de 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 [5], [12].

Las aplicaciones típicas del proceso (PTA) son en 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, en la recuperación de componentes grado herramienta utilizados en los procesos de estampado [7].

### **3.4. Recubrimientos por plasma transferido por arco**

Los recubrimientos realizados con el proceso de plasma transferido por arco (PTA) son recubrimientos muy versátiles esto debido a que el aporte se realiza en forma de polvo, lo cual genera una amplia gama de recuperaciones de componentes por medio de recubrimientos los cuales se caracteriza por tener porcentajes de dilución relativamente bajos.

Entre las aplicaciones del PTA encontradas están los recubrimientos encontrados en la búsqueda bibliográfica, los cuales fueron aplicando aportes de aceros inoxidable, reforzados con carburo de tungsteno en metales base de bajo contenido de carbono [5].

Como se había mencionado anteriormente el recubrimiento por plasma transferido por arco consiste en un arco protegido con gas creado entre un electrodo no consumible de carburo de tungsteno y la pieza de trabajo como fuente de calor primaria. El plasma se forma ionizando el gas el cual fluye en un inyector alrededor del electrodo. El electrodo generalmente es hueco al interior del inyector, y el gas del plasma generalmente emerge de un arreglo del orificio estrecho. El proceso puede utilizar una barra o alambre descubierto como materiales consumibles [13], pero el aporte en polvo se utiliza más a menudo cuando éste es usado, el proceso se refiere más como plasma por arco transferido. El polvo se dirige de la antorcha al centro del arco, donde se funde y suelda ó recubre la pieza de trabajo [14].

Una fuente de alimentación continua conectada entre el electrodo del tungsteno y el objeto proporciona la energía para el arco transferido. El gas de

protección se pasa a través de un difusor y forma una capa alrededor de la zona del arco. Las recuperaciones con aporte en polvo se logran hasta con un 95% de efectividad, con velocidades de deposición de hasta .70 m/min, esta velocidad es posible por medio del tamaño y de la forma de la pieza, que se está tratando.

### **3.5. Análisis de los parámetros de soldadura en el proceso PTA**

Los principales parámetros que afectan la calidad de soldaduras en el proceso PTA son los siguientes:

- Material de aporte.
- La corriente del arco de transferencia.
- La cantidad y velocidad de alimentación del polvo.
- El precalentamiento y post-calentamiento a la pieza de trabajo.
  
- 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, el cual genera que se reduzca la temperatura del arco [5].
  
- Ocurre una mayor velocidad de transferencia de calor, cuando existe unos altos flujos de gas hacia el metal base, debido al alto gradiente de temperatura entre el sustrato y la boquilla [10].

En el proceso PTA se requieren altos niveles de energías de entrada (kw) para poder fundir el metal base, de lo contrario, solamente se produce el arco piloto y no el de transferencia.

Las partículas de polvo del metal de aporte se depositan más rápido cuando hay un alto flujo de gas de arrastre e ionización, debido a esto, es menor el tiempo en que interactúan con el arco de transferencia. Por tal motivo la temperatura al momento de depositarse provoca enfriamientos rápidos [12].

Los tipos de boquillas y el diámetro del electrodo son importante en 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.

Es muy importante obtener soldaduras en las que ocurra el menor porcentaje posible de disolución del metal de aporte con el metal base, ya que de esta manera se conservan altas las propiedades de resistencia al desgaste. A continuación en la tabla 3.1 se enlistan a manera de resumen, las características de los parámetros del PTA [15].

**Tabla 3. 1.** Parámetros del proceso de plasma transferido por arco (PTA).

| <b>PARAMETROS DEL PROCESO (PTA)</b>                 | <b>DESCRIPCIÓN</b>  |
|---|---|
| <b>Amperaje máx. 300 A</b>                          | Esta variable aumenta la penetración y el calor de entrada.                                 |
| <b>Voltaje</b>                                      | Es importante para el calor de entrada de la pieza.   |
| <b>Corriente pulsada piloto 5-140 A</b>             | Utilizada para iniciar el arco piloto   |
| <b>Flujo de gas plasma 0.4-20 L/min</b>             | Es el que se encarga de generar el plasma.  |
| <b>Flujo de gas de protección L/min</b>             | Se encarga de hacer una atmosfera protegida del contacto con el medio ambiente.             |
| <b>Corriente inicial 5 a 300A</b>                   | Es la utilizada para iniciar el arco  |
| <b>Tiempo de corriente inicial 0-20seg</b>          | Es el tiempo que tarda en llegar la corriente inicial.                                      |
| <b>Pendiente 0-10 A</b>                             | Se utiliza al momento de cortar la corriente, no corta de un solo golpe si no gradualmente. |
| <b>Corriente externa límite 300A</b>                | Corriente límite a la que puede trabajar la fuente de poder.                                |
| <b>Velocidad de avance de la antorcha m/min</b>     | Es un parámetro que afecta al calor de entrada.   |
| <b>Velocidad del polvo (% motor)</b>                | Es importante por la cantidad de polvo a depositar en la soldadura.                         |
| <b>Pre flujo de gas 3-10seg</b>                     | Sirve para evitar la oxidación al inicio del cordón.  |
| <b>Tiempo de pos gas de flujo 5-30 s.</b>           | Sirve para evitar la oxidación cuando termina el cordón de soldadura.                       |
| <b>Flujo del rango de gas (piloto) 0.2-10 L/min</b> | Flujo del gas piloto para mantener en piloto encendido.                                     |
| <b>Corriente piloto strik 5-140 A</b>               | Para iniciar el arco.   |
| <b>Punto de ajuste de corriente 5-100 A</b>         | Para el final de la soldadura y corte gradualmente el arco no de golpe.                     |
| <b>Control de agua 1.8 L/min operación 5 h</b>      | Enfriamiento de la antorcha.  |

### **3.6. 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 [16].

#### **3.6.1. 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 depende de la composición química del material y de la aplicación es un factor que determina el nivel de dureza que debe tener el acero.

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 durezas de 64 HRC [16].

### 3.6.2. Aceros grado herramienta para trabajo en caliente

Son aceros que normalmente trabajan a altas temperaturas ideales para la construcción de moldes de inyección y trabajo en caliente, forja, extrusión, etc. Un ejemplo de estos aceros es AISI H13, una de las principales características de estos aceros es su coeficiente de dilatación térmica lo cual permite trabajar a ciertas temperaturas. En la figura 3.4 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 [16].

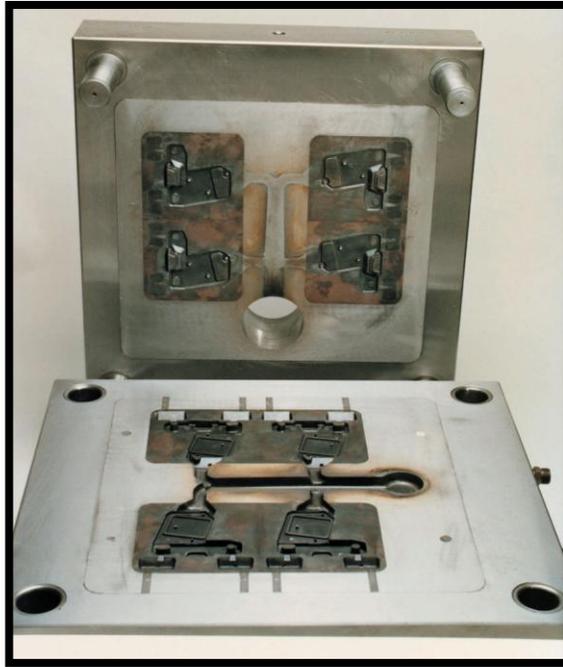


**Figura 3. 4.** Acero grado herramienta para trabajo en caliente [17].

### 3.6.3. Aceros para moldes de plástico

Estos tipos de aceros tienen la propiedad de poder trabajar con cambios bruscos de temperatura y son utilizados para la construcción de moldes para procesos de extrusión, inyección y sopleo. 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 3.5 un molde fabricado con acero H13 utilizado para la fabricación de recipientes cilíndricos de plástico.



**Figura 3. 5.** Ejemplo de aceros para moldes de plástico [17].

### **3.7. Características de los aceros para herramienta**

Los aceros para herramientas y matrices están clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) por sus siglas en inglés y la sociedad de ingenieros automotrices (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 [16].

En la tabla 3.2 se muestran los aceros más comunes aplicados para la elaboración de dados de estampado y componentes mecánicos, así como sus principales aplicaciones [18].

**Tabla 3. 2.** Características de los aceros grado herramienta [18].

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

En la tabla 3.3 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.

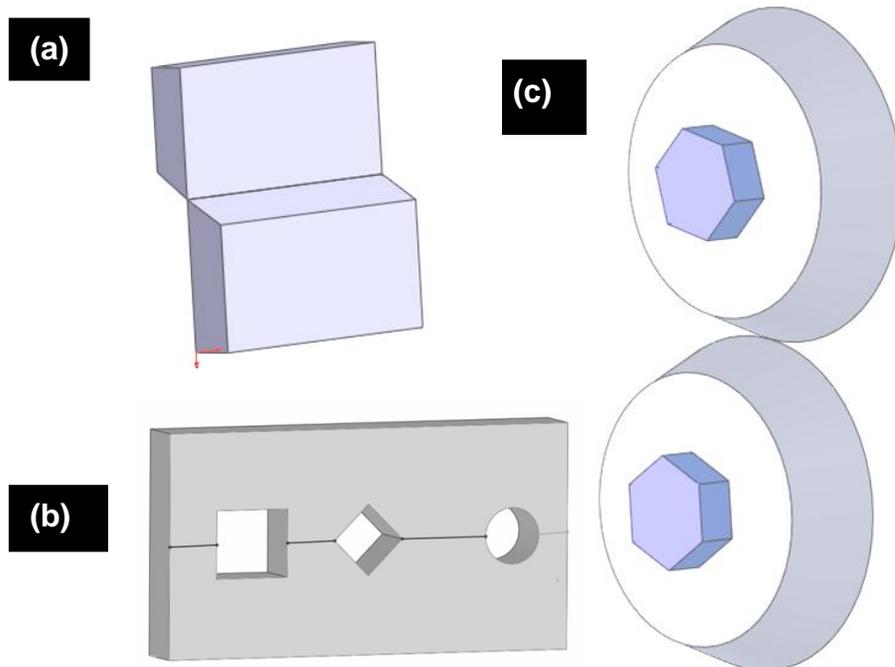
**Tabla 3.3.** Composición química (% e.p.) de algunos aceros grado herramienta y grado maquinaria [18].

| <b>Composición Química Elemental % (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> |
| <b>Cr-Mo-V</b>                                | 0.6       | 0.8       | 0.35      | 4.5         | -----     | 0.5       | -----     | 0.2       | -----    | -----    |
| <b>D2</b>                                     | 1.60-1.40 | 0.60 max  | 0.60 max  | 11.00-13.00 | -----     | 0.70-1.20 | -----     | 1.10 max  | -----    | -----    |
| <b>S1</b>                                     | 0.40-0.55 | 0.10-0.0  | 0.15-1.20 | 1.00-1.80   | 0.30 max  | 0.50 max  | 1.50-3.00 | 0.15-0.30 | -----    | -----    |
| <b>S2</b>                                     | 0.40-0.55 | 0.30-0.0  | 0.90-1.20 | -----       | 0.30 max  | 0.30-0.60 | -----     | 0.50 max  | -----    | -----    |
| <b>H13</b>                                    | 0.32-0.45 | 0.20-0.0  | 0.80-1.20 | 4.75-5.5    | 0.30 max  | 1.10-1.75 | -----     | 0.80-1.20 | -----    | -----    |
| <b>L6</b>                                     | 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 | -----    | -----    |
| <b>M2</b>                                     | 0.78-0.15 | 0.15-0.0  | 0.20-0.45 | 3.75-4.50   | 0.30 max  | 4.50-5.5  | 5.50-6.75 | 1.75-2.20 | -----    | -----    |
| <b>T1</b>                                     | 0.65-0.80 | 0.10-0.0  | 0.20-0.40 | 3.75-4.5    | 0.30 max  | -----     | 17.2-18.7 | 0.90-1.30 | -----    | -----    |
| <b>P4</b>                                     | 0.12 max  | 0.20-0.0  | 0.10-0.40 | 4.00-5.25   | -----     | 0.40-1.0  | -----     | -----     | -----    | -----    |
| <b>1045</b>                                   | 0.43-0.50 | 0.60-0.90 | -----     | -----       | -----     | -----     | -----     | -----     | 0.04     | 0.05     |
| <b>1020</b>                                   | 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.

## Mecanismos de desgaste

En la actualidad en el sector industrial automotriz se presentan problemas por desgaste mecánico de sus componentes cuando 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 a mecanismos de desgaste, los cuales se describen en la figura 3.6, en la cual se ilustran de forma esquemática los modos de los mecanismos 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 [16].

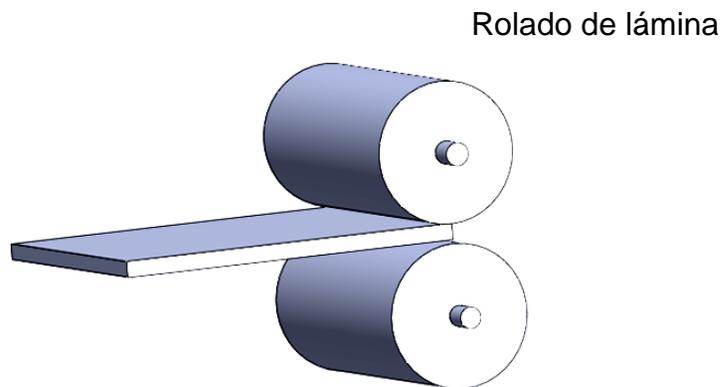


**Figura 3.6.** Diferentes tipos de mecanismos de desgaste.

### 3.7.1. Desgaste por fricción

Genera pérdida de material por rozamiento continuo de una superficie metálica en contacto con otra, ésta se hace presente en los herramientas utilizados en los procesos de estampado y constituye uno de los problemas más severos de desgaste de partes y piezas. Esto se debe al acabado superficial de las piezas y en específico de las microsecciones 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]. Un esquema del desgaste por fricción el cual se ilustra en la figura 3.7.



**Figura 3.7.** Esquema de desgaste por fricción.

### 3.7.2. Impacto

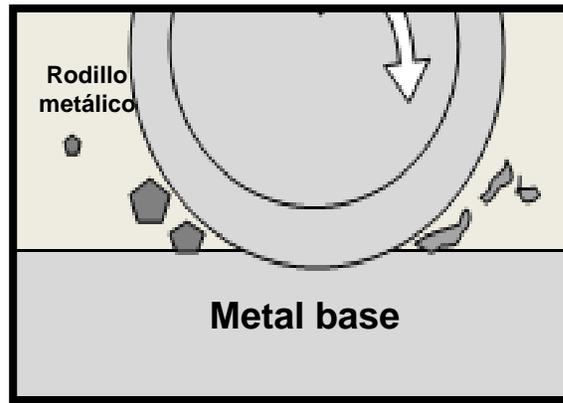
La resistencia al impacto es la capacidad del material de absorber energía. Para este caso, la energía acumulada se convierte, al impacto en trabajo de deformación plástica o elástica, dependiendo de la característica de la superficie y su habilidad de poder absorber dicha energía. La habilidad de

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.

### **3.7.3. Abrasión por desgarramiento**

El desgaste de las piezas mecánicas se define como una pérdida del metal en función del tiempo, mediante algún mecanismo que actúa sobre las superficies de los componentes. Cuando una pieza o una parte de la misma presenta 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 comprender 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.

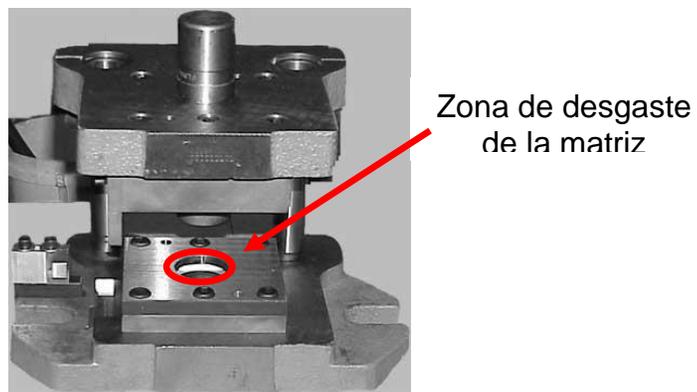
Uno de los ejemplos donde se puede observar este tipo de desgaste en rodillos de laminación y dados de extrusión para reducción de diámetros en caliente de tal manera que al estar sujetos a fricción y presión el material se desgasta gradualmente, lo cual se ilustra de forma esquemática en la figura 3.8 [13].



**Figura 3.8.** Esquema representativo del mecanismo de abrasión por desgarramiento.

#### **3.7.4. 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 3.9 [13].



**Figura 3. 9.** Troquel donde se presenta abrasión bajo esfuerzo [17].

### 3.7.5. Ensayo de desgaste pin-on-disk

Se trata de evaluar el desgaste entre dos materiales que mantienen un movimiento relativo entre los dos metales, utilizando un disco giratorio sobre el que se coloca el material objeto de estudio, que a su vez está en contacto con un material de referencia (pin) de acero, alúmina, zafiro con un valor de carga determinada.

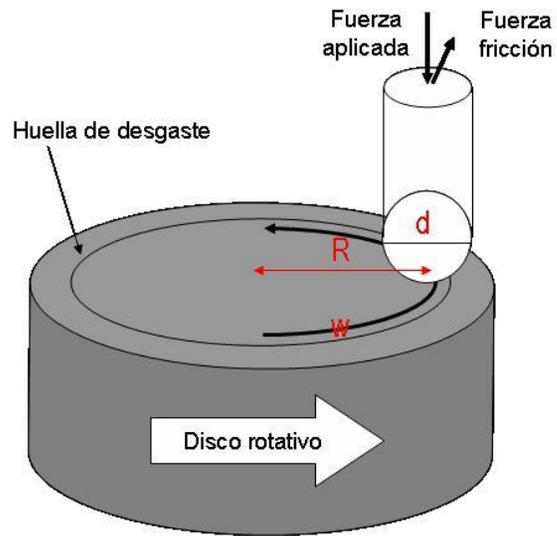
El sistema se hace girar de tal forma que se genera sobre la superficie del material a ensayar un surco/ huella. El volumen de dicho surco se corresponde con el material perdido durante el ensayo y permite determinar el coeficiente de desgaste. Es un ensayo comparativo entre distintos materiales ensayados en las mismas condiciones, de tal forma que permite establecer una clasificación de materiales desde el punto de vista de resistencia al desgaste, pero no son valores absolutos.

La carga normal que podemos aplicar puede variar entre 1 y 60N. lo más habitual es hacer ensayos a 10 ó 20 N durante 500 m, aunque en materiales de elevada dureza se suelen recorrer 1500 m [13].

Los valores del volumen perdido se indican ( $\text{mm}^3$ ) y de la relación específica del desgaste,  $k$  ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ), obtenidos en los ensayos de desgaste. El desgaste se ha calculado utilizando la siguiente expresión (Ecuación de Archard):

$$k = \Delta V / F_N L \quad (3.1)$$

Donde  $k$  el ratio específico de desgaste ( $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ),  $\Delta V$  la pérdida de volumen de la probeta ( $\text{mm}^3$ ),  $F_N$  la fuerza normal aplicada en el contacto (N) y  $L$  la distancia de deslizamiento durante el ensayo (m).



**Figura 3.10.** Esquema representativo de la prueba de desgaste pin-on-disk.

En la figura 3.11 se muestra la marca realizada al aplicar la prueba de desgaste en aceros de alta dureza. Con una distancia de recorrido de 1,500m.



**Figura 3.11.** Esquema representativo del desgaste realizado con la prueba de pin-on-disk.

### **3.8. Evaluación del efecto de los parámetros del proceso PTA sobre recargue**

En el siguiente trabajo se estudió el impacto que tienen los parámetros del proceso de PTA en la condición superficial del metal base. Los cuales 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 100x100x12.5 mm [5].

### **3.9. Caracterización de metales de aporte base cobalto modificadas por la adición de carburo de tungsteno aplicado en el proceso PTA**

En el estudio revisado se muestra el efecto que produce la adición de WC al metal de aporte base cobalto utilizado como metal de aporte en 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.

Las muestras de este estudio fueron preparadas utilizando como sustrato un acero AISI 1020 en forma de placas 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. Los datos que se analizaron mediante una matriz de experimentos con los porcentajes y la variación del amperaje posteriormente se agregan a la composición original 5 y 35% de WC respectivamente en cada uno de los casos variando el amperaje para poder evaluar cuál es la combinación que produce las mejores propiedades [19].

### **3.10. Análisis y optimización de los parámetros de soldadura para la aplicación de recubrimientos base níquel depositados por arco de plasma transferido**

El objetivo de este trabajo fue recubrir un acero inoxidable austenítico con una aleación base níquel para mejorar la resistencia a la corrosión utilizando herramientas estadísticas, donde se utilizó el programa de excel solver para optimización de los parámetros y obtener los resultados deseados en la soldadura.

La aportación de este trabajo de investigación fue encontrar los parámetros óptimos por medio de un programa estadístico para poder hacer un recubrimiento con las características necesarias en la soldadura [1].

### **3.11. Endurecimiento superficial de un acero grado herramienta (Cr-Mo-V) por plasma transferido por arco (PTA)**

El objetivo de este estudio fue conocer el comportamiento de un acero grado herramienta al aplicarle un recubrimiento como tratamiento superficial comparándolo con otros tratamientos superficiales y evaluando su

comportamiento con respecto al tratado con el proceso (PTA) y comparando las durezas obtenidas con un tratamiento térmico convencional [2].

### **3.12. Microestructura y propiedades de revestimiento compuesto por $\text{Cr}_3\text{Si}/\gamma\text{-Fe}$ por plasma transferido arco**

El objetivo de este trabajo es depositar un cordón de soldadura en un sustrato de acero 1045 con un recubrimiento en polvo aplicado por el proceso de plasma transferido por arco PTA donde se busca evaluar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión comparado con un acero inoxidable austenítico.

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 (% e.p) como los compuestos de esta aleación generan fases muy duras, resistente al desgaste y la corrosión, donde las dendritas primarias  $\text{Cr}_3\text{Si}$  están uniformemente distribuidos en a 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 [4].

### **3.13. Proceso de soldadura de recargue en aceros al carbono sobre la bases cuantitativa y cualitativa**

Este trabajo consistió en el comparativo de procesos de soldadura para seleccionar cual de ellos tiene mejores atributos para la aplicación de recubrimientos donde los procesos evaluados fueron PTA, GMAW, GTAW , SAW, SMAW. Donde se realizaron diferentes probetas las cuales se caracterizaron para medir el porcentaje de dilución y en base a los resultados, se seleccionó el proceso que tiene menor porcentaje de dilucion acomodando

por orden gerárquico sus atributos de cada uno de los procesos, basado en los valores cualitativos y cuantitativos que caracterizan los procesos dando como resultado que el proceso de plasma trasferido por arco fue el que mostró mejores propiedades de mínima dilución [6].

### **3.14. Homogeneidad de compuesto de una matriz metálica depositada por plasma transferido por arco**

En este trabajo se estudió la homogenización y la distribución de carburos al realizar recubrimientos con el proceso (PTA), mediante el control de la temperatura y el tamaño del material de aporte NiCrBSi añadiéndole WC, mediante la medición de temperatura por medio de la termografía infrarroja la cual fue utilizada para medir la temperatura de la superficie del depósito durante el proceso de soldadura. La emisividad del depósito se midió utilizando reflectometría láser. En este trabajo se aplicó un algoritmo de corrección para calcular la temperatura real de la superficie del depósito, la temperatura se puede corregir al incrementar la entrada de calor en la soldadura, también se aplicó un modelo matemático tridimensional de perfil de solución, la solidificación del recubrimiento se desarrollo considerando la entrada de calor como conducción y convección. Los resultados proporcionaron un modelo fundamental que es capaz de predecir con precisión a la partícula donde los parámetros operacionales que mejoran la distribución uniforme de carburos son: la reducción de la corriente / tensión, aumento de las tasas de protección de flujo de gas, el aumento de las tasas de flujo de gas de plasma y el aumento de velocidad de traslación [7].

### **3.16 Aplicación de la metodología de la superficie de respuesta aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA en un acero al carbóno con un acero inoxidable**

En esta experimentación se trabajó con el proceso de plasma trasferido por arco PTA aplicado sustrato de acero 1040 con un aporte de acero inoxidable 316L, mediante una evaluación de los parámetros de determinó hacer un diseño de experimento de cinco factores y 5 niveles fraccionándolo como un  $2^{5-1}$  dando un total de 32 corridas con 2 réplicas, las variables de estudio fueron amperaje, velocidad, flujo de polvo, frecuencia de oscilación de la antorcha y distancia de la antorcha, realizados a los cordones de soldadura se hizo una medición del porcentaje de dilución, aplicando el programa Design Expert 7. 1 statistical software. Donde presentó como resultado un polinomio de segundo orden con una  $R^2=0.996$ , donde el resultado fue el porcentaje de dilución más bajo con los parámetros optimizados [20].

### **3.17 Protección de componentes altamente desgastados aplicando las ventajas del proceso de plasma trasferido por arco PTA como una tecnología para el recargue**

En este trabajo se realizó un estudio del proceso de plasma trasferido por arco PTA en la aplicación de 2 sustratos el 1.0037 y 1.4301 con un aporte base níquel reforzado con 40% y 60 % de  $WC/W_2C$ , aplicando corriente pulsada en el proceso de 4-8 A, realizando pruebas de abrasión y dando como resultado, que al reducir la energía de entrada disminuye la dilución y la precipitación en la matriz de níquel, el contenido de los  $WC/W_2C$  debe de encontrarse por debajo del 40% para poder tener tasas bajas del nivel de desgaste, donde la dureza no genera un cambio importante en la variación de las pruebas de estudio, la

dilución presentada en las pruebas realizadas son recomendadas para realizar los recubrimientos con los aportes modificados [15].

### **3.18 Influencia de los parámetros del proceso de plasma trasferido por arco PTA en la microestructura y en sus propiedades mecánicas de resistencia al desgaste**

En esta investigación se trabajó con el proceso de plasma trasferido por arco PTA con un aporte NiCrBSi modificado con (WC) trabajando con las variables de amperaje, gas de plasma y gas de protección la estructura presentada en las pruebas fue evaluada por el microscopio electrónico de barrido (MEB), en la prueba modificada con el 30% de WC, se presentaron carburos de tungsteno fundidos y no fundidos en el cordón de soldadura aplicando difracción para su comprobación por medio del análisis EDX. De acuerdo a los datos presentados de la pruebas de resistencia a la abrasión las pruebas que presentaron menos volumen perdido de material fueron la realizada con 70A y 80A, esto es debido a la presencia de elevadas temperaturas en el cordón de soldadura lo cual eleva la disolución de los carburos en consecuencia cae la dureza esto como resultado de la modificación del flujo del de plasma [21].

### **3.19. Diseño de experimentos**

Para la introducción en los diseños de experimentos es importante definir el concepto de diseño, el cual es una prueba o serie de pruebas en la que se hacen cambios deliberados en las variables del proceso para poder monitorear y detectar cuales son las variables del proceso que tienen mayor influencia en las variables de salida y poder optimizarlas [22]. La aplicación de los diseños de experimentos en estudios de soldadura es de vital importancia ya que

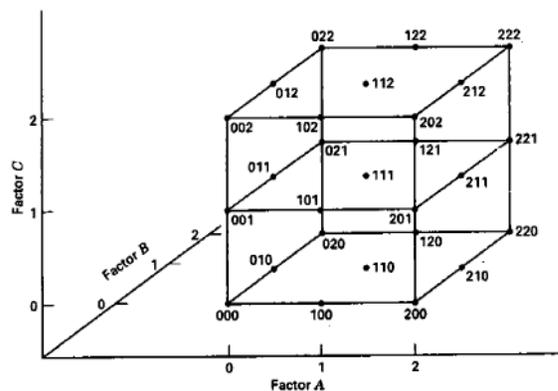
permite evaluar y modelar el comportamiento de las variables de un proceso. Para poder lograr el planteamiento correcto de un diseño de experimentos se debe de conocer el proceso a optimizar y las variables con los rangos de trabajo. Mediante la implementación de los diseños de experimentos permiten la reducción de costos en la optimización de procesos de soldadura, lo cual es muy importante desde el punto de vista industrial.

### 3.20. Optimización de parámetros

Para la optimización de parámetros existen varias técnicas en función del comportamiento de los datos de salida, los cuales se analizan y si tiene un comportamiento lineal se realiza una regresión, en caso de lo contrario se busca un método de optimización no lineal [9].

### 3.21. Diseño de experimentos $3^3$

Los diseños de experimentos comprende 3 de 3 supuestos factores (A, B, C) en un caso de estudio y que cada factor tiene 3 niveles dispuestos en un experimento factorial, la disposición experimental y las notaciones de las combinaciones de los tratamientos se muestran en la figura 3.12.



**Figura 3.12.** Disposición experimental y notaciones de las combinaciones de los experimentos [22].

Las 27 combinaciones de tratamientos tienen 26 grados de libertad, cada efecto principal tiene 2 grados de libertad, cada interacción de 2 factores tiene 4 grados de libertad y la interacción de 3 factores tiene 8 grados de libertad. Si se hacen “ $n$ ” replicas hay  $n3^3-1$  grados de libertad totales entonces  $3^3(n-1)$  grados de libertad del error.

La suma de los cuadrados puede calcularse utilizando los métodos estándar de los diseños factoriales, además si los factores son cuantitativos es posible hacer la partición de los efectos principales en un componente lineal y uno cuadrático cada uno con un solo grado de libertad [22].

### 3.22. Modelos de regresión lineal

Los modelos de regresión lineal se pueden ajustar cuando tienen un número de variables que se quieren relacionar entre sí, por ejemplo si se analiza el calor de entrada con respecto a la velocidad y el amperaje, el modelo que puede ajustar es el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Donde Y representa el calor de entrada,  $X_1$  la velocidad y  $X_2$  el amperaje. Se trata de un modelo con regresión lineal múltiple con dos variables independientes, donde es común llamar a las variables independientes variables predictoras o regresoras (variables de la regresión) se utiliza el término no lineal porque la ecuación 3.2 es una función lineal de los parámetros desconocidos de las  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ . [23] El modelo describe un plano en el espacio bidimensional  $X_1$  y  $X_2$ . El parámetro  $\beta_0$  describe la intersección del plano con el eje de las ordenadas, donde en ocasiones a  $\beta_1, \beta_2$  se le nombra coeficientes de la regresión parcial porque  $\beta_1$  mide el cambio esperado en Y para cada cambio unitario de  $x_1$  cuando  $x_2$  se mantiene constante y  $\beta_2$  mide el cambio esperado en y para cada cambio unitario  $x_2$  cuando  $x_1$  se mantiene constante. En general la variable de respuesta Y puede relacionarse con k regresores al modelo.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3.3)$$

Se le llama modelo de regresión lineal múltiple [24].

### 3.23. Superficie de respuesta

La superficie de respuesta también conocida como MSR es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en donde una respuesta de interés recibe la influencia de 2 o más variables, donde el objetivo es optimizar las variables por ejemplo un ingeniero químico busca el rango de temperatura ( $x_1$ ) y presión ( $x_2$ ) que maximicen el rendimiento ( $y$ ) de un proceso, en este caso el rendimiento del proceso es un función de la temperatura y de la presión la cual se representa con la ecuación (3,3).

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (3.3)$$

donde  $\varepsilon$  representa el ruido o el error observado y, si la respuesta esperada se denota por  $Ey = f(x_1, x_2) + \varepsilon = \eta$  entonces la superficie representada por

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3.3)$$

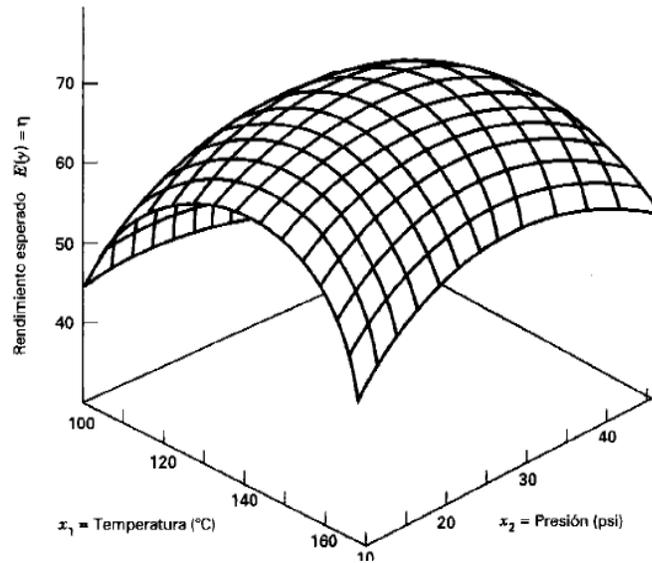
Se llama superficie de respuesta.

La superficie de respuesta es representada gráficamente donde  $n$  se grafica con respecto  $x_1$  y  $x_2$ , para la visualización de la superficie de respuesta se grafican los contornos de la superficie de respuesta como se observa en la figura 3.13. En la gráfica de contornos se traza la línea de respuestas constante en el plano  $X_1, X_2$ , donde cada contorno corresponde a la altura particular de la superficie de respuesta [24].

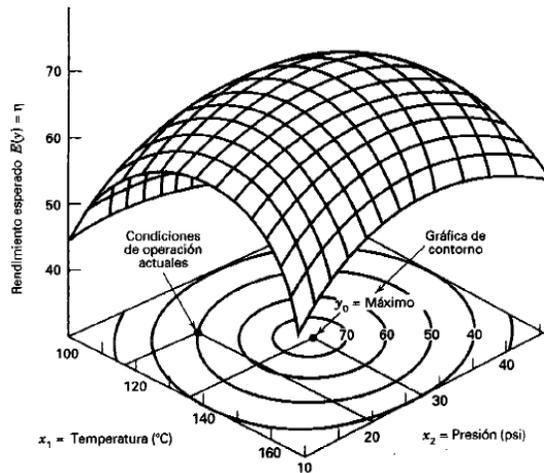
En la mayoría de las aplicaciones de MRS el objetivo principal es encontrar una relación adecuada entre ( $y$ ) y las variables independientes, generalmente se aplica un polinomio de orden inferior en alguna de la región de las variables independientes si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, si la respuesta planteada está bien modelada por la

función lineal aplicada, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_K X_K + \varepsilon \quad (3.3)$$



**Figura 3.3.** Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado  $\eta$  como una función de la temperatura ( $x_1$ ) y la presión ( $x_2$ ) [22].

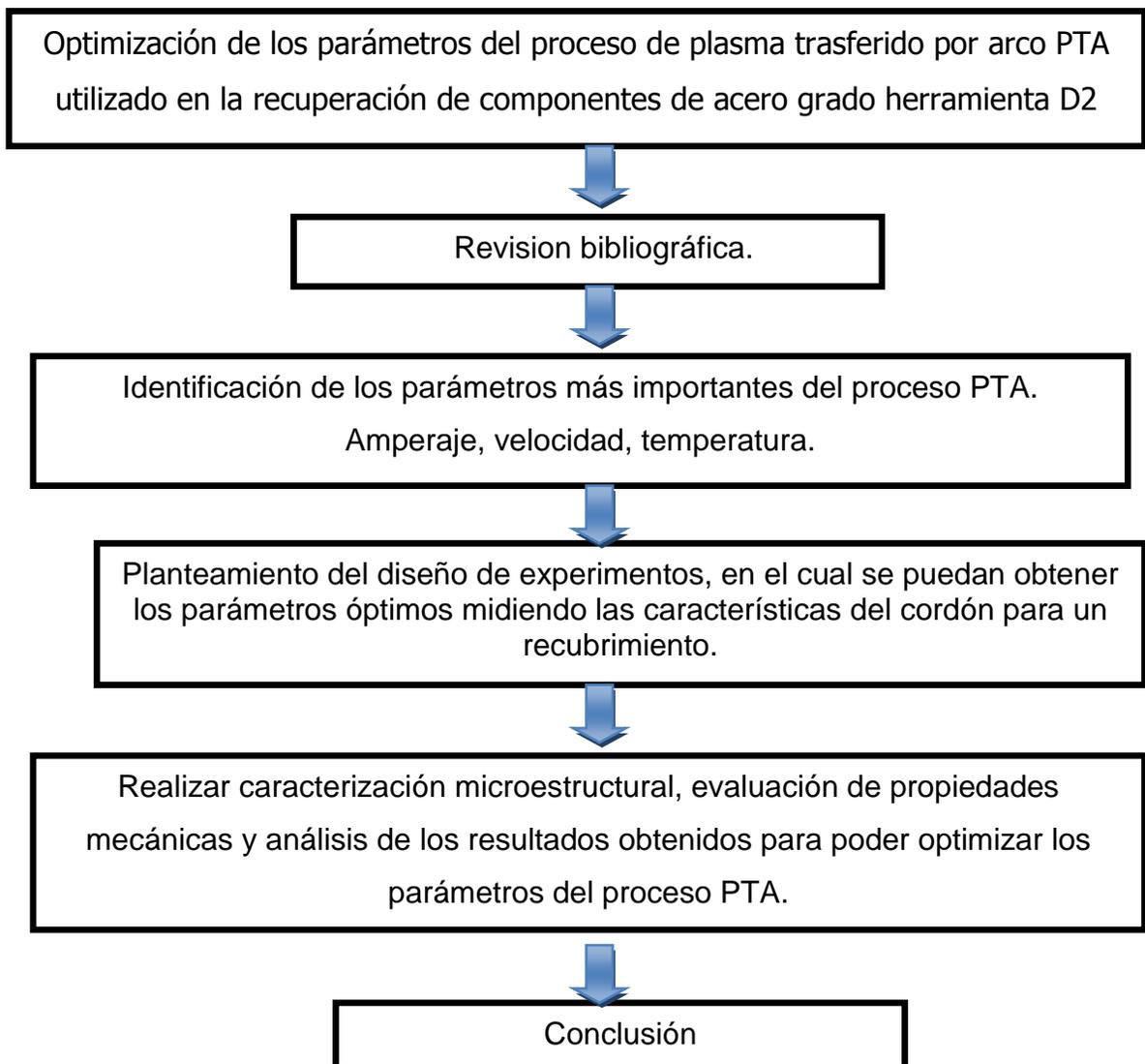


**Figura 3.4.** Gráfica de contornos de una superficie de respuesta [22].

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA

La metodología aplicada en la experimentación tuvo como objetivo identificar los parámetros principales del proceso y el efecto metalúrgico que tiene el proceso de plasma transferido por arco en el acero grado herramienta D2. En el digrama de flujo se muestra la metodología de investigación.



# CAPÍTULO 5

## EXPERIMENTACIÓN

La experimentación consistió en la aplicación del proceso de soldadura PTA en la recuperación de componentes de acero grado herramienta D2 optimizando los parámetros del proceso con las variables que causan mayor efecto en las características del cordón.

### 5.1. Descripción del equipo utilizado

#### 5.1.1. Fuente de poder

Para realizar los recubrimientos se utilizó una fuente de poder Castoling Eutectic gap 3001 DC, la cual se muestra en la figura 5.1.



**Figura 5. 1.** Fuente de poder PTA.

En la tabla 5.1 se muestran las características de la fuente de poder utilizada en los recubrimientos.

**Tabla 5. 1.** Características de la fuente de poder

| <b>Características del equipo EuTronic © GAP 3001 DC: ESC 260065</b> |  |
|--|--|
| Corriente de arco piloto:  | 3 – 60 A Max (30 A ciclo de trabajo a 100% corriente de soldadura: 6 - 350 A |
| Corriente máx. de arco de soldadura:                                 | 250 A ciclo de trabajo al 100%   |
| 320 A ciclo de trabajo al 60%  |  |
| 350 A ciclo de trabajo al 50%  |  |
| Tensión de circuito abierto (V), Inversor principal-piloto:          | 80V - 110V   |
| Tensión de alimentación:   | 3x400V + N ±10%  |
| Frecuencia de alimentación:  | 50/60 Hz   |
| Fusible de alimentación:   | 32 A   |
| Grado de protección:   | IP 23  |
| Ajuste gas plasmágeno:   | Válvula electrónica, 0.1-5.0 lt/min,   |
| Ajuste gas protector:  | Flujómetro manual, 2-20 lt/min   |
| Ajuste gas de transporte:  | Flujómetro manual, 0.5-4.2 lt/min  |
| Presión de entrada de gas recomendada:                               | (Max.) 2.5 bar (2.5 bar)   |
| Dimensiones (L x W x H):   | 815 x 445 x 635 mm   |
| Peso: 77 kg  | 77 kg  |

El proceso de plasma trasferido por arco PTA realiza el depósito del aporte en forma de polvo lo cual hace relevante y característico la tolva contenedora del polvo que se muestra en la figura 5.2



**Figura5. 2.** Tolva para polvo del proceso de PTA.

En la tabla 5.2 se aprecian los datos técnicos de la tolva del polvo utilizada para la experimentación, el rango de las dimensiones del polvo es de 60 -170  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 5. 2.** Parámetros de la tolva del proceso de PTA

| <b>Alimentador de polvo EP2: ESC 260229</b> |                       |
|---|-----------------------|
| Gas de transporte:                          | Ar, Ar-H <sub>2</sub> |
| Caudal de gas de transporte:                | 0 - 4 lt/min          |
| Depósito de polvo:                          | 2 kg                  |
| Grado de protección:                        | IP 23                 |
| Peso (sin polvo):                           | 7.5 kg                |
| Dimensiones (L x W x H):                    | 200 x 170 x 470 mm    |

La velocidad de alimentación continua de la tolva es controlada mediante la rueda de alimentación directamente desde el autómatas del inversor. Velocidad de alimentación de polvo: 3-120 g/min, la configuración de la rueda de alimentación, del soplete, del ánodo y de la densidad del polvo.

### 5.1.2 Antorcha del proceso

La antorcha vertical utilizada para el proceso PTA la cual utiliza una corriente máxima de trabajo de 100 a 200 A, los rangos de alimentación de polvo son 3 -80 g/ min, la antorcha es refrigerada y es para una aplicación automática en la figura 5.3 se observa la antorcha utilizada.



**Figura 5. 3.** Antorcha vertical PTA.

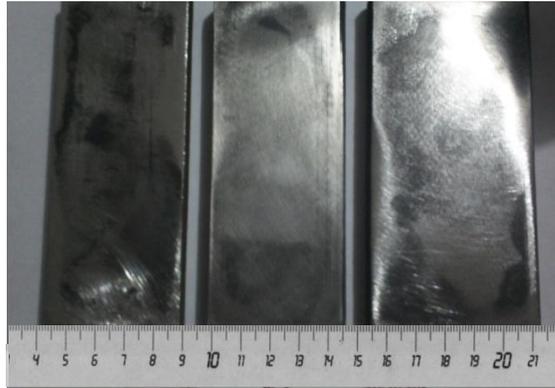
### 5.1.3. Materiales para experimentación.

Para la experimentación se utilizó el acero grado herramienta AISI D2 como sustrato y como aporte en polvo una superaleación base níquel y tungsteno. Para realizar la superficie de respuesta se utilizó un aporte base Fe la composición química de los polvos de aporte se muestra en la tabla 5.3.

**Tabla 5. 3.** Tabla de composición química metal base y aporte

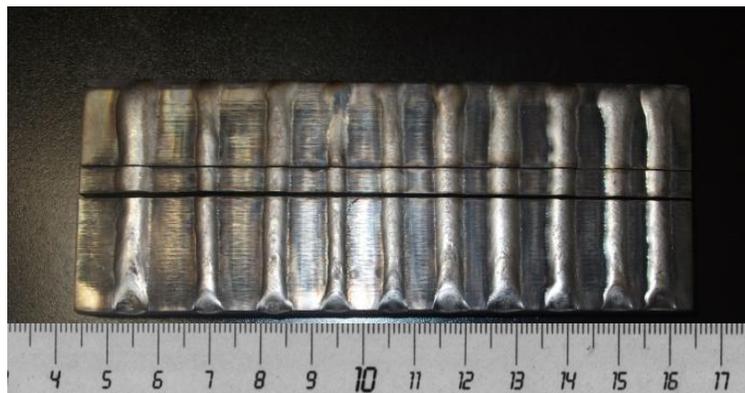
| <b>Composición química (% e.p.)</b>                   |         |      |      |              |                |     |     |     |      |     |
|---|---------|------|------|--------------|----------------|-----|-----|-----|------|-----|
| C   | B       | W    | Mn   | Si           | Cr             | Ni  | Mo  | Nb  | Fe   | V   |
| <b>Metal base</b>                                     |         |      |      |              |                |     |     |     |      |     |
| 1.55  | –       | –    | 0.35 | 0.35         | 11.5           | –   | 0.8 | –   | –    | 0.8 |
| <b>Aporte Woka (Matriz 40% níquel y 60% carburos)</b> |         |      |      |              |                |     |     |     |      |     |
| 0.6 – 0.8   | 3 – 3.4 | –    | –    | 3.9 –<br>4.9 | 14.0 –<br>16.0 | Bal | –   | –   | –    | –   |
| <b>Carburos 60%</b>                                   |         |      |      |              |                |     |     |     |      |     |
| 6.0 – 6.2   | –       | Bal. | –    | –            | –              | –   | –   | –   | –    | –   |
| <b>Aporte Nano</b>                                    |         |      |      |              |                |     |     |     |      |     |
| –   | –       | –    | –    | –            | 10.4           | –   | –   | 4.8 | Bal. | –   |

Los recubrimientos fueron aplicados en las probetas de acero D2 con dimensiones de 120 x 50 x 12mm, las cuales fueron tratadas con un temple y revenido para obtener la dureza de 58 R<sub>C</sub> mostradas en la figura 5.4.



**Figura 5. 4.** Probetas del sustrato de acero D2

En la figura 5.5 se puede observar la probeta con los recubrimientos aplicados sobre la superficie, la cual se cortó mediante un mecanizado y posteriormente se montaron en baquelita y se prepararon por las técnicas convencionales de metalografía para su análisis microestructural.



**Figura 5.5.** Cordones de soldadura con el equipo PTA.

## 5.2. Parámetros constantes del proceso

Los parámetros constantes utilizados en el proceso fueron determinados por medio de una revisión bibliográfica y con un estudio previo donde se determinaron los parámetros del proceso los cuales se muestran en la tabla 5.4

**Tabla 5. 4.** Parámetros constantes utilizados en la experimentación.

| <b>Variables</b>            | <b>Valores</b> |
|-----------------------------|----------------|
| Flujo de polvo %            | 40             |
| Gas de plasma lpm           | 13             |
| Gas de arrastre lpm         | 3.0            |
| Gas de Protección lpm       | 3.0            |
| Corriente máx. A            | 200            |
| Tiempo de soldadura         | 90m            |
| pendiente P1                | 2.5 seg.       |
| Pre calentamiento           | 350 grados     |
| Diámetro del electrodo mm   | 3.2            |
| Distancia de la antorcha mm | 5              |

## 5.3. Parámetros de estudio del proceso

Por medio de una revisión bibliográfica y un estudio preliminar sobre la importancia y efecto de las variables del proceso, se determinaron las variables propuestas para el estudio [25], las cuales se muestran en la tabla 5.5

**Tabla 5. 5.** Variables de estudio del proceso.

| <b>Variables</b>       | <b>nivel bajo</b> | <b>nivel medio</b> | <b>nivel alto</b> |
|------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| <b>Velocidad m/min</b> | 0.6               | 1                  | 1.5               |
| <b>Amperaje A</b>      | 75                | 85                 | 95                |
| <b>Tem. °C</b>         | 24                | 210                | 350               |

Utilizando las variable de mayor efecto se planteó un diseño de experimentos con 3 variables y 3 niveles sin replica para poder determinar

dentro del rango de parámetros los que ofrecen mejores características mecánicas y metalúrgicas donde las variables de salida son la dilución del cordón de soldadura. Se utilizó el programa minitab® aplicando un diseño factorial  $3^3$ . En la tabla 5.6 se muestran las 27 combinaciones resultantes de las 3 variables y los 3 niveles de cada variable tomados de la tabla 5.5.

**Tabla 5. 6.** Combinaciones de los parámetros del proceso

| <b>Orden std.</b> | <b>Orden de corrida</b> | <b>Tipo pt</b> | <b>Bloques</b> | <b>Velocidad m/min</b> | <b>Amperaje A</b> | <b>Tem. °C</b> |
|-------------------|-------------------------|----------------|----------------|------------------------|-------------------|----------------|
| 2                 | 1                       | 1              | 1              | 0,6                    | 75                | 210            |
| 25                | 2                       | 1              | 1              | 1                      | 95                | 24             |
| 1                 | 3                       | 1              | 1              | 0,6                    | 75                | 24             |
| 4                 | 4                       | 1              | 1              | 0,6                    | 85                | 24             |
| 27                | 5                       | 1              | 1              | 1                      | 95                | 350            |
| 16                | 6                       | 1              | 1              | 0,8                    | 95                | 24             |
| 5                 | 7                       | 1              | 1              | 0,6                    | 85                | 210            |
| 11                | 8                       | 1              | 1              | 0,6                    | 75                | 210            |
| 23                | 9                       | 1              | 1              | 1                      | 85                | 210            |
| 21                | 10                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 350            |
| 26                | 11                      | 1              | 1              | 1                      | 95                | 210            |
| 15                | 12                      | 1              | 1              | 0,8                    | 85                | 350            |
| 22                | 13                      | 1              | 1              | 1                      | 85                | 24             |
| 8                 | 14                      | 1              | 1              | 0,6                    | 95                | 210            |
| 19                | 15                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 24             |
| 12                | 16                      | 1              | 1              | 0,6                    | 75                | 350            |
| 17                | 17                      | 1              | 1              | 0,8                    | 95                | 210            |
| 6                 | 18                      | 1              | 1              | 0,6                    | 85                | 350            |
| 20                | 19                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 210            |
| 14                | 20                      | 1              | 1              | 0,8                    | 85                | 210            |
| 24                | 21                      | 1              | 1              | 1                      | 85                | 350            |
| 9                 | 22                      | 1              | 1              | 0,6                    | 95                | 350            |
| 13                | 23                      | 1              | 1              | 0,8                    | 85                | 24             |
| 3                 | 24                      | 1              | 1              | 0,6                    | 75                | 350            |
| 18                | 25                      | 1              | 1              | 0,8                    | 95                | 350            |
| 10                | 26                      | 1              | 1              | 0,8                    | 75                | 24             |
| 7                 | 27                      | 1              | 1              | 0,6                    | 95                | 24             |

Antes de realizar el análisis de macrografías se realizó una inspección visual en la cual se observaron las características del cordón que se muestran en la tabla 5.7 donde se aprecia que los cordones 6, 12, 17, 18, 23, 26, 27 no mostraron fractura en la zona afectada por el calor.

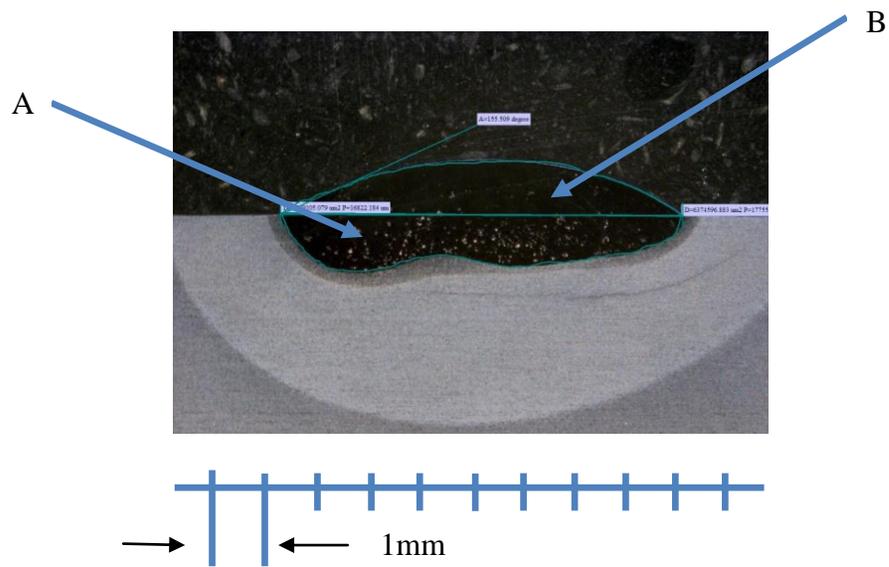
**Tabla 5. 7.** Evaluación visual de los recubrimientos.

| <b>Cordón</b> | <b>Comentario de las características del cordón</b>       |
|---------------|---|
| 1             | Presenta fractura en los extremos del cordón de soldadura |
| 2             | Presenta fracturas en la línea de interfase               |
| 3             | Presenta fractura en los laterales del cordón             |
| 4             | Presenta fractura al centro del cordón                    |
| 5             | Presenta fracturas transversales en el centro del cordón  |
| 6             | No presenta fractura ni porosidad                         |
| 7             | Presenta fracturas en todo el aporte                      |
| 8             | Presenta fracturas en la zona afectada por el calor       |
| 9             | Presenta fractura en la zona afectada por el calor        |
| 10            | Presenta fracturas en los extremos del aporte             |
| 11            | Fractura en el extremo derecho del aporte                 |
| 12            | No presenta fractura                                      |
| 13            | Presenta fracturas en los extremos del aporte             |
| 14            | Presenta fractura en la línea de interfase                |
| 15            | Presenta fractura en la zona afectada por el calor        |
| 16            | Presenta fracturas en los extremos y al centro del aporte |
| 17            | No presenta fractura                                      |
| 18            | No presenta fractura                                      |
| 19            | Presenta fracturas en los extremos y al centro del aporte |
| 20            | No presenta fractura pero presenta porosidades            |
| 21            | Presento fractura en los extremos del aporte              |
| 22            | Presenta fracturas en el centro del aporte                |
| 23            | No presenta fractura                                      |
| 24            | Presenta fractura en el centro del aporte                 |
| 25            | Presenta fracturas en el centro del aporte                |
| 26            | No presenta fractura                                      |
| 27            | No presenta fractura                                      |

El diseño de experimentos de la tabla anterior 5.6 se tomó como variable de salida la dilución, la cual se mide el área de refuerzo y el área de penetración para poder determinarla por medio de la formula 5.1:

$$\text{Dilución} = \frac{A}{B+A} \times 100 \quad 5.1$$

En la figura 5.6 se puede observar donde A es el área de penetración del cordón de soldadura y B es el refuerzo del cordón.



**Figura 5. 6.** Características del cordón medidas.

Estas características fueron medidas a las 27 pruebas realizadas aplicando el equipo de soldadura PTA y la formula de dilución, en la tabla 5.8 se puede observar los valores de dilución, los cuales presentaron valores altos, medios y bajos.

**Tabla 5. 8.** Valores de dilución medidos.

| <b>Orden std.</b> | <b>Orden de corrida</b> | <b>Tipo pt</b> | <b>Bloques</b> | <b>Velocidad m/min</b> | <b>Amperaje A</b> | <b>T °C</b> | <b>Dilución</b> |
|-------------------|-------------------------|----------------|----------------|------------------------|-------------------|-------------|-----------------|
| <b>2</b>          | 1                       | 1              | 1              | 0.6                    | 75                | 210         | <b>49.00</b>    |
| <b>25</b>         | 2                       | 1              | 1              | 1                      | 95                | 24          | <b>57.77</b>    |
| <b>1</b>          | 3                       | 1              | 1              | 0.6                    | 75                | 24          | <b>45.81</b>    |
| <b>4</b>          | 4                       | 1              | 1              | 0.6                    | 85                | 24          | <b>50.55</b>    |
| <b>27</b>         | 5                       | 1              | 1              | 1                      | 95                | 350         | <b>55.52</b>    |
| <b>16</b>         | 6                       | 1              | 1              | 0.8                    | 95                | 24          | <b>57.40</b>    |
| <b>5</b>          | 7                       | 1              | 1              | 0.6                    | 85                | 210         | <b>50.27</b>    |
| <b>11</b>         | 8                       | 1              | 1              | 0.6                    | 75                | 210         | <b>45.35</b>    |
| <b>23</b>         | 9                       | 1              | 1              | 1                      | 85                | 210         | <b>57.72</b>    |
| <b>21</b>         | 10                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 350         | <b>56.68</b>    |
| <b>26</b>         | 11                      | 1              | 1              | 1                      | 95                | 210         | <b>62.88</b>    |
| <b>15</b>         | 12                      | 1              | 1              | 0.8                    | 85                | 350         | <b>58.07</b>    |
| <b>22</b>         | 13                      | 1              | 1              | 1                      | 85                | 24          | <b>55.74</b>    |
| <b>8</b>          | 14                      | 1              | 1              | 0.6                    | 95                | 210         | <b>52.83</b>    |
| <b>19</b>         | 15                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 24          | <b>52.06</b>    |
| <b>12</b>         | 16                      | 1              | 1              | 0.6                    | 75                | 350         | <b>48.34</b>    |
| <b>17</b>         | 17                      | 1              | 1              | 0.8                    | 95                | 210         | <b>64.00</b>    |
| <b>6</b>          | 18                      | 1              | 1              | 0.6                    | 85                | 350         | <b>53.78</b>    |
| <b>20</b>         | 19                      | 1              | 1              | 1                      | 75                | 210         | <b>42.01</b>    |
| <b>14</b>         | 20                      | 1              | 1              | 0.8                    | 85                | 210         | <b>62.40</b>    |
| <b>24</b>         | 21                      | 1              | 1              | 1                      | 85                | 350         | <b>72.85</b>    |
| <b>9</b>          | 22                      | 1              | 1              | 0.6                    | 95                | 350         | <b>56.86</b>    |
| <b>13</b>         | 23                      | 1              | 1              | 0.8                    | 85                | 24          | <b>54.63</b>    |
| <b>3</b>          | 24                      | 1              | 1              | 0.6                    | 75                | 350         | <b>50.65</b>    |
| <b>18</b>         | 25                      | 1              | 1              | 0.8                    | 95                | 350         | <b>62.21</b>    |
| <b>10</b>         | 26                      | 1              | 1              | 0.8                    | 75                | 24          | <b>51.56</b>    |
| <b>7</b>          | 27                      | 1              | 1              | 0.6                    | 95                | 24          | <b>59.26</b>    |

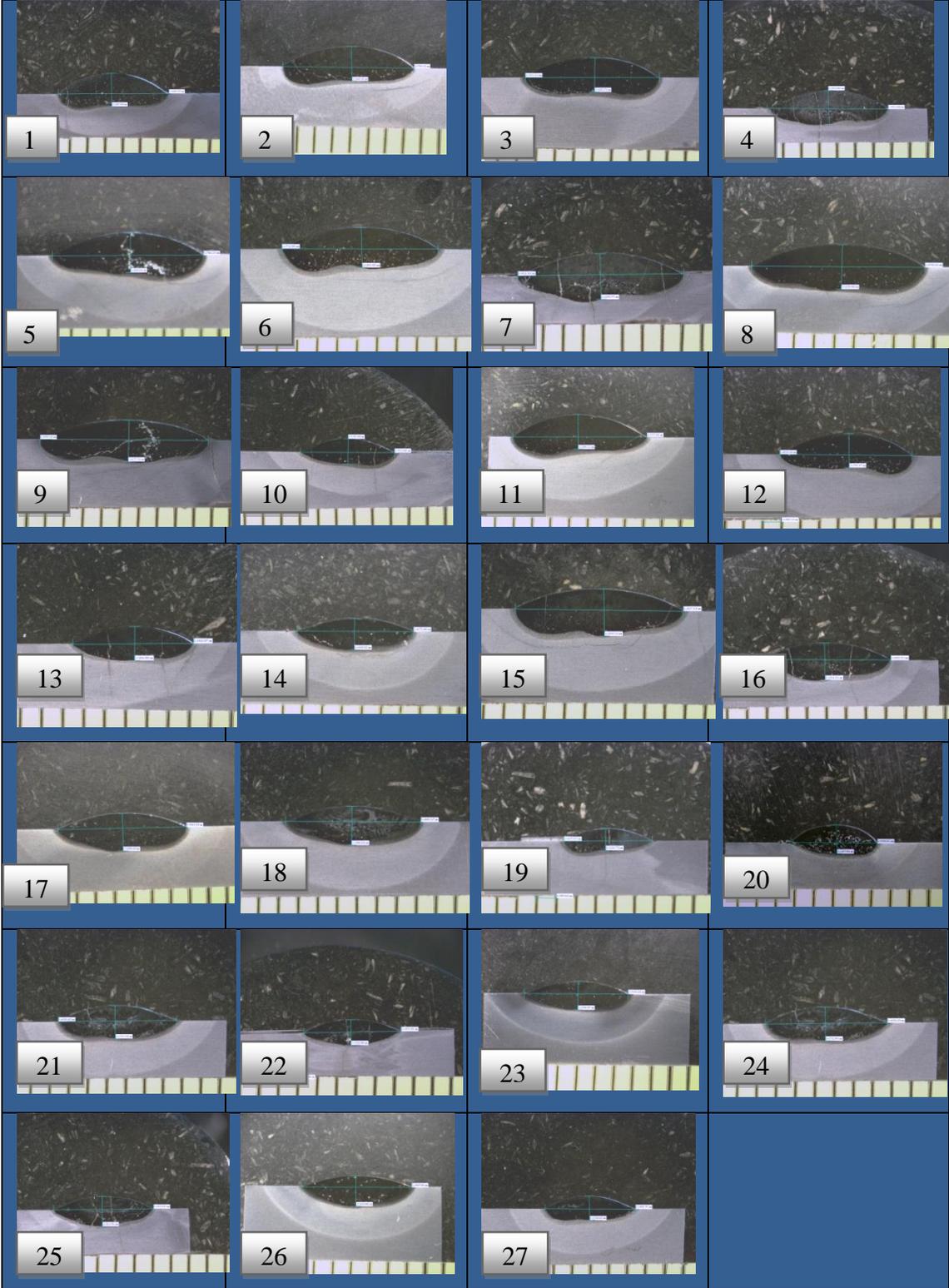
En la tabla 5.9 se muestran los resultados del análisis de las macrografías de las 27 pruebas donde se evalúa si presentaron fractura con las diferentes temperaturas de precalentamiento, en la tabla 5.10 se muestran las pruebas donde se realizaron las mediciones del cordón de soldadura.

### 5.4. Avance de resultados

Tabla 5. 9. Resultados de las características del cordón de soldaduras.

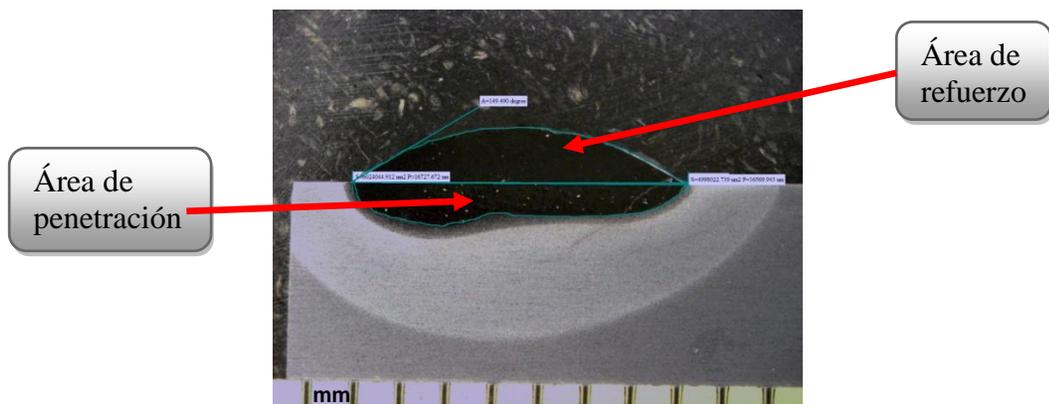


**Tabla 5. 10.** Características del cordón de soldadura: ancho y alto

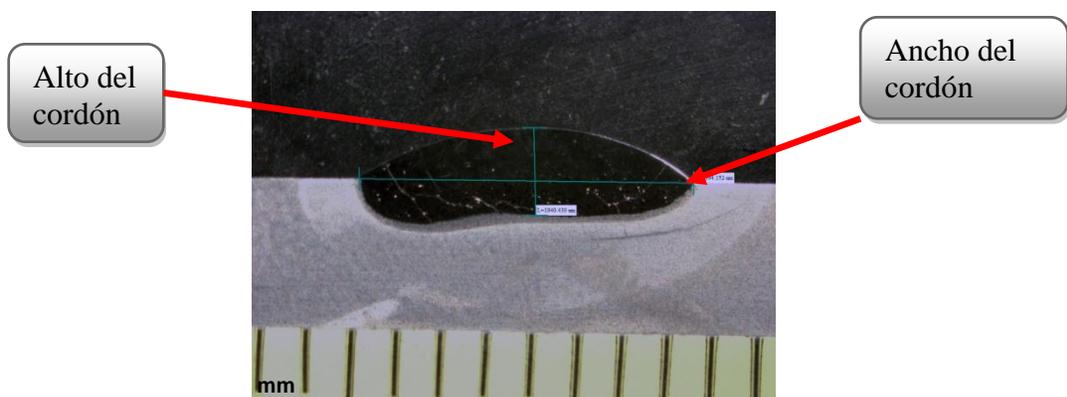


Por medio de la evaluación de las macrografías se determina cuales son los cordones de soldadura que tiene las mejores características de dilución y microestructurales, para poder recomendar los parámetros para realizar recuperación de componentes con sustrato D2 y aporte base níquel tungsteno.

Las características medidas del cordón de soldadura son el área de refuerzo, área de penetración, ancho y alto para poder determinar el porcentaje de dilución, lo cual se puede apreciar en la figura 5.7 y 5.8.



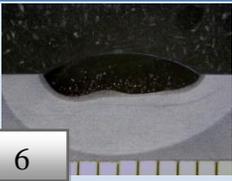
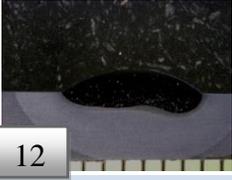
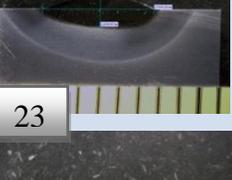
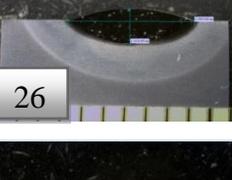
**Figura 5.7.** Microestructura que ilustra la manera en que se realiza la medición de las áreas de refuerzo y penetración.



**Figura 5. 8.** Muestra 2 en donde se mide el ancho y alto del cordón de soldadura.

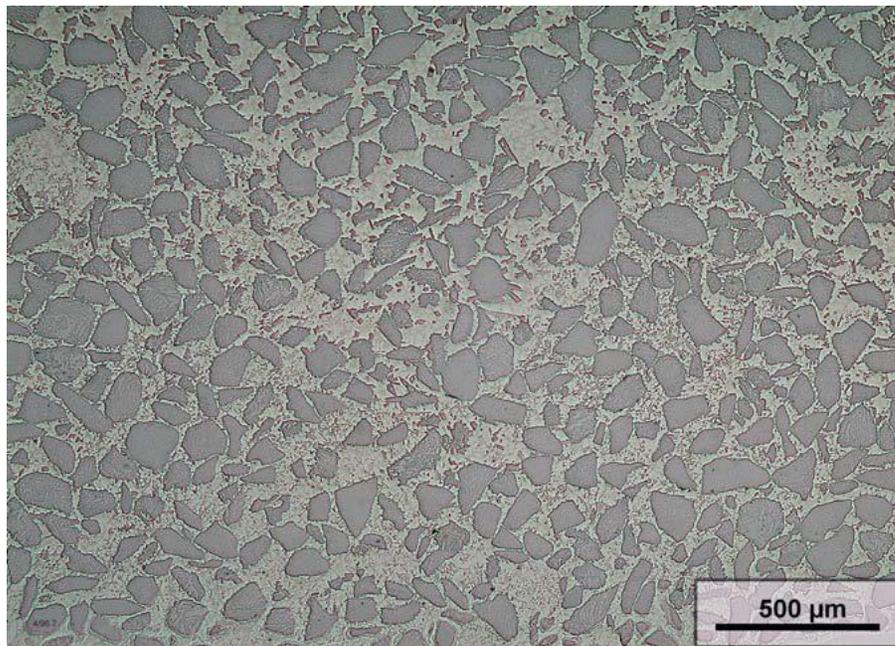
En la tabla 5.11 se observan los cordones y parámetros de soldadura que no presentaron fractura en la evaluación, lo cual nos indica que la temperatura de precalentamiento es de 350° C presenta los valores más bajos de dilución.

**Tabla 5. 11.** Cordones de soldadura que no mostraron fracturas.

| Imagen  | Parámetros  |         |        |
|---|-------------|---------|--------|
|   | Vel (m/min) | Amp (A) | Tem °C |
|    | 0.6         | 85      | 350    |
|    | 0.6         | 75      | 350    |
|   | 0.8         | 95      | 210    |
|  | 0.8         | 95      | 350    |
|  | 1           | 85      | 210    |
|  | 1           | 95      | 210    |
|  | 1           | 95      | 350    |

### 5.5. Metalografía del recubrimiento base Ni y W.

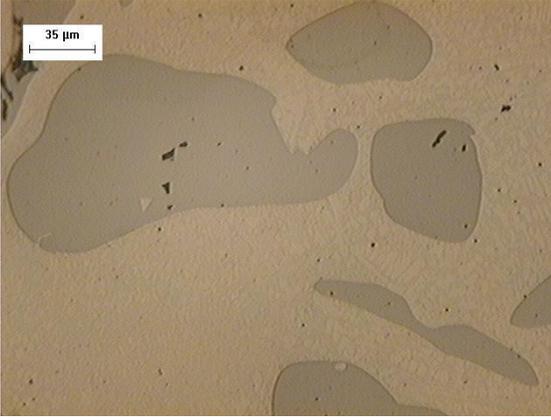
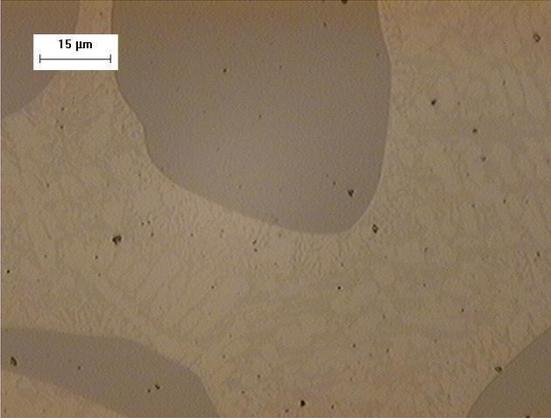
El aporte utilizado fue una superaleación base níquel y tungsteno utilizada para incrementar las propiedades superficiales del sustrato, la caracterización del aporte en polvo se muestra en la figura 5.9. Se observa una microestructura sin grietas y homogénea, la composición presenta una distribución uniforme de carburo de tungsteno fundido dentro de la matriz con carburos de tungsteno que no están en solución [26].



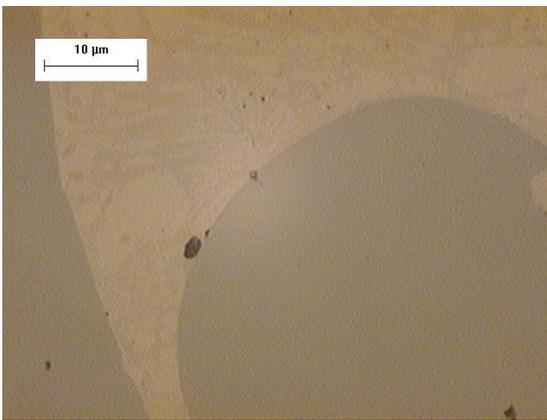
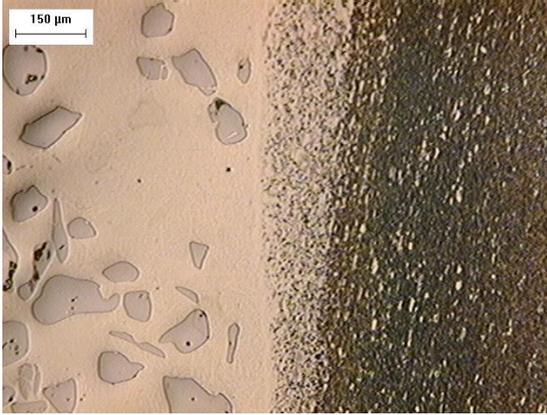
**Figura 5. 9.** Microestructura del aporte base níquel y cobalto.

Realizado el macroataque a las muestras con vilellas y nital al 2% se rebeló las siguientes microestructuras en la tabla 5.14 se aprecia la zona del aporte, en la tabla 5.15 se muestra la microestructura en la línea de interfase y en la tabla 5.16.línea de interface y zona afectada por el calor.

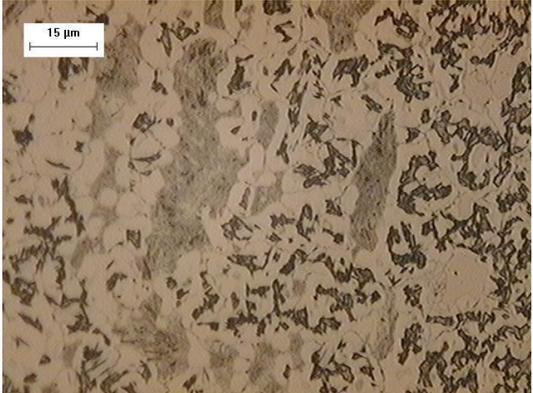
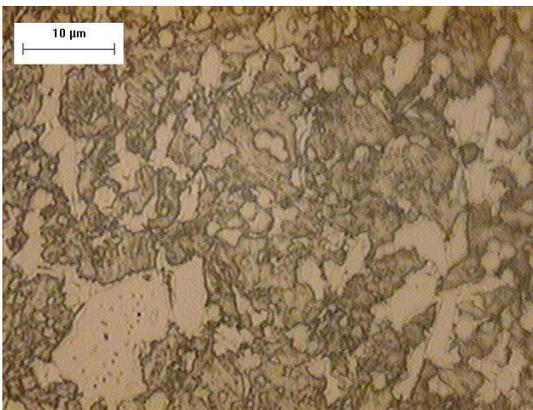
**Tabla 5. 12.** Microestructura del aporte base níquel y tungsteno.

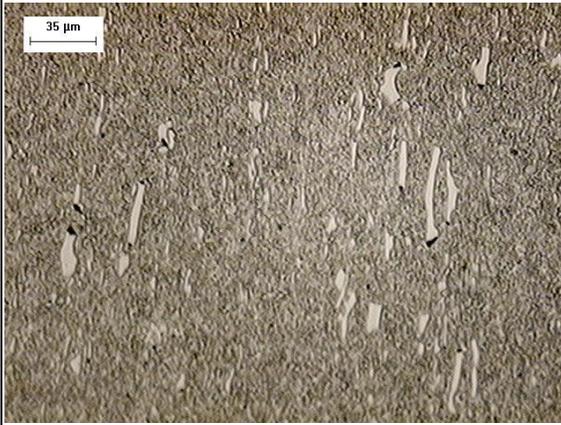
|   |  |
|---|--|
|    | <p>Metalografía del aporte en la cual se puede observar una distribución uniforme de carburo de tungsteno fundido dentro de la matriz con carburos de tungsteno que no están en solución</p> |
|   | <p>Metalografía de la distribución uniforme de carburo de tungsteno fundido dentro de la matriz con carburos de tungsteno que no están en solución</p>                                       |
|  | <p>Metalografía en la cual se observa una distribución uniforme de carburo de tungsteno fundido dentro de la matriz con carburos de tungsteno que no están en solución</p>                   |

**Tabla 5. 13.** Microestructura del aporte y línea de interface.

|   |  |
|---|--|
|    | <p>Metalografía se puede observar una distribución uniforme de carburo de tungsteno fundido dentro de la matriz con carburos de tungsteno que no están en solución</p> |
|   | <p>Microestructura de la zona de interfase donde se observa el aporte y su distribución con el metal base en la línea de interfase</p>                                 |
|  | <p>Microestructura de la zona de interfase donde se observa el aporte y su distribución con el metal base en la línea de interfase</p>                                 |

**Tabla 5. 14.** Microestructura de la línea de interfase y metal base.

|  |  |
|--|--|
|  <p>35 μm</p>   | <p>Micro estructura de la línea de fusión, se observa el aporte y su distribución con el metal base en la línea de interfase y la aparición de martensita y algo de austenita retenida.</p>  |
|  <p>15 μm</p>  | <p>Microestructura de la línea de fusión donde se observa el aporte y su distribución con el metal base y la aparición de martensita y algo de austenita retenida.</p>   |
|  <p>10 μm</p> | <p>Microestructura de la línea de fusión donde se observa el aporte y su distribución con el metal base en la línea de interface y la aparición de martensita y algo de austenita retenida en la matriz de carburo de tungsteno.</p> |



200x

Microestructura del metal base donde se observa la aparición de martensita y algo de austenita retenida

## 5.6. Planteamiento de la superficie de respuesta.

Debido al análisis realizado de (ANOVA) se determino que sí existe diferencia entre las variables ya que el valor de **p** es mayor a 0.05 de tal manera que las pruebas realizadas con precalentamiento de 350°C fueron las que presentaron menos fracturas en la zona afectada por el calor por lo que el siguiente diseño de experimentos se puede aplicar como constante el precalentamiento de 350°C.

Analizando los resultados se planteó una superficie de respuesta con los valores de los parámetros que causan mayor efecto y que tienen mejores condiciones de soldabilidad, las cuales se muestran en la tabla 5.17.

**Tabla 5. 15.** Parámetros del proceso (PTA) de mayor impacto.

| <b>Mejores condiciones sin fractura</b> |        |    |
|---|--------|----|
| Variables                               | Rangos |    |
| Amperaje (A)                            | 75     | 95 |
| Velocidad (m/min)                       | 0.6    | 1  |

Aplicando el diseño central compuesto de 2 factores 2 réplicas realizado con el programa Minitab®, las características se muestran en la tabla 5.18.

**Tabla 5. 16.** Características del diseño central compuesto

| <b>Diseño central compuesto</b> |    |
|---------------------------------|----|
| <b>Factores:</b>                | 2  |
| <b>Replicas</b>                 | 1  |
| <b>Corridas base:</b>           | 11 |
| <b>Total de corridas:</b>       | 11 |

Utilizando el programa Minitab® y los parámetros mencionados en la tabla 5.17 se determinó la superficie de respuesta con puntos centrales, estrella y extremos la cual se presenta en la tabla 5.19.

**Tabla 5. 17.** Superficie de respuesta

| Orden std. | Orden de corrida | Tipo pt | Bloques | Amperaje (A) | Velocidad (m/min) |
|------------|------------------|---------|---------|--------------|-------------------|
| 1          | 1                | -1      | -1      | 75           | 0.600             |
| 4          | 2                | 1       | -1      | 95           | 0.600             |
| 3          | 3                | -1      | 1       | 75           | 1.000             |
| 8          | 4                | 1       | 1       | 95           | 1.000             |
| 6          | 5                | -Pe     | 0       | 70,8578      | 0.800             |
| 2          | 6                | Pe      | 0       | 99,1421      | 0.800             |
| 9          | 7                | 0       | Pe      | 85           | 0.5171            |
| 5          | 8                | 1       | Pe      | 85           | 1.0828            |
| 11         | 9                | 0       | 0       | 85           | 0.800             |
| 7          | 10               | 0       | 0       | 85           | 0.800             |
| 10         | 11               | 0       | 0       | 85           | 0.800             |

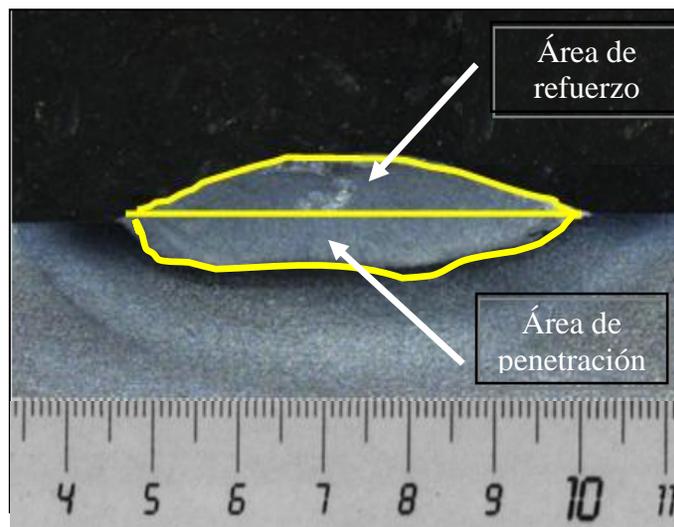
En la figura 5.10. Se presenta una fotografía de la vista superior de los cordones de soldadura realizados con los parámetros de las 11 combinaciones utilizando el aporte base Fe.



**Figura 5. 10.** Cordones de soldadura realizados con aporte base Fe en el substrato de acero D2.

Después del corte las muestras fueron montadas en baquelita y preparadas por las técnicas convencionales de metalografía. Después de la preparación metalográfica las muestras fueron atacadas con el reactivo de Vilellas para su análisis donde fueron medidas las características del cordón de soldadura, área de refuerzo, área de penetración, ancho y alto del cordón, como se aprecia en la figura 5.11.

Para poder medir las características del cordón de soldadura, área de refuerzo como se muestra en la figura 5.11, se utilizó el estereoscopio marca Olympus SZX10 equipado con una cámara Olympus LG-PS2-5 (Yahata) y un software Infinity 2.

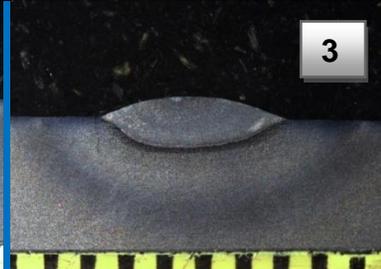
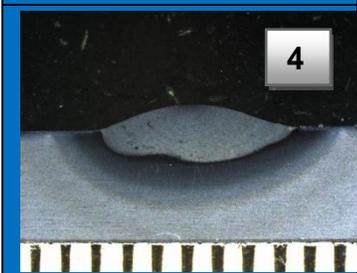
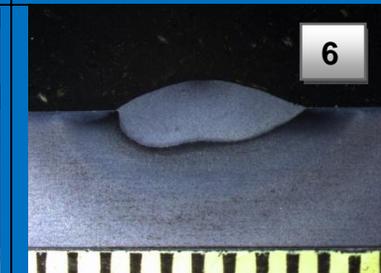
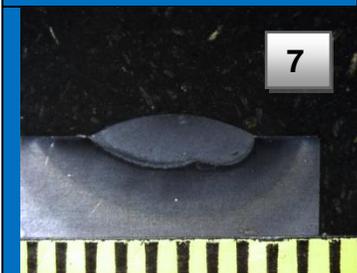
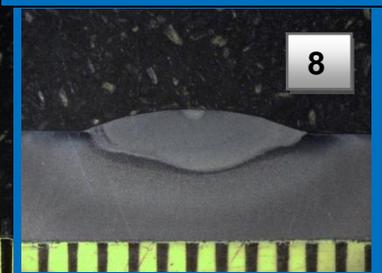
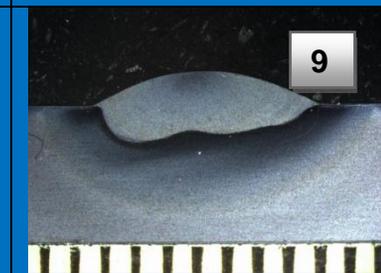
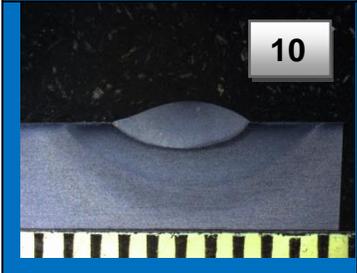
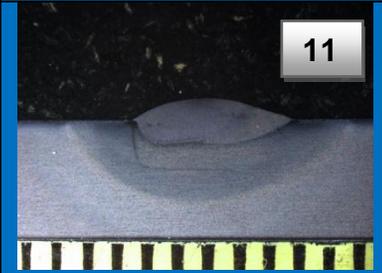


**Figura 5. 11.** Área de refuerzo y de penetración medida para la experimentación.

Para el análisis de las pruebas, las cuales se evaluó el área de refuerzo y el área de penetración del cordón para, poder medir la dilución donde las pruebas 4, 8, 10, no presentaron microfracturas, La evaluación de estos parámetros es esencial para el desempeño que pueda tener el recubrimiento el cual es de

vital importancia para los recubrimientos, En la tabla 5.20 se muestran las macrografías de la superficie de respuesta con aporte base Fe.

**Tabla 5. 18.** Macrografías del efecto de los parámetros de estudio de la (MRS)

|   |  |   |
|---|--|---|
|    |    |    |
| 75 (A) 0.6 (m/min)  | 95 (A) 0.6 (m/min)   | 75 (A) 1.0 (m/min)  |
|   |   |   |
| 95 (A) 1.0 (m/min)  | 70,85 (A) 0.8 (m/min)  | 99,14 (A) 0.8 (m/min)   |
|  |  |  |
| 85 (A) 0.51 (m/min)   | 85 (A) (1.08 m/min)  | 85 (A) 0,8 (m/min)  |
|  |  |   |
| 85 (A) 0,8 (m/min)  | 85 (A) 0,8 (m/min)   |   |

Como se puede apreciar en las fotomicrografías, los parámetros utilizados en la experimentación impacta en la variación de las características del cordón de soldadura como ancho, alto, área de refuerzo y área de penetración, observándose en las imágenes de la tabla 5.20 el impacto del amperaje respecto a la zona afectada por el calor, donde se incrementa el valor del amperaje, el área de penetración aumenta considerablemente y en consecuencia la zona afectada por el calor como se puede apreciar en la imagen numero 6 de la tabla 5.20, en la tabla 5.21 se muestra la evaluación visual realizada a las macrografías respecto a la observación de grietas y fracturas .

**Tabla 5. 19.** Evaluación de la sección transversal de los cordones.

| <b>Evaluación de fractura</b> |    |   |
|-------------------------------|----|---|
| <b>1</b>                      | 1  | Si presenta fractura                    |
| <b>2</b>                      | 2  | Si presenta fractura                    |
| <b>3</b>                      | 3  | Microfractura lado izquierdo del cordón |
| <b>4</b>                      | 4  | No presenta fractura                    |
| <b>5</b>                      | 8  | Si presenta fractura                    |
| <b>6</b>                      | 13 | Si presenta fractura                    |
| <b>7</b>                      | 21 | Si presenta fractura                    |
| <b>8</b>                      | 23 | No presenta fractura                    |
| <b>9</b>                      | 24 | Si presenta fractura                    |
| <b>10</b>                     | 25 | No presenta fractura                    |
| <b>11</b>                     | 28 | Si presenta fractura                    |

En la tabla 5.22 se observan los valores de dilución medidos donde las pruebas realizadas arrojaron el valor máximo obtenido en dilución que es igual a 62,38 % y el valor mínimo obtenido de 48,49% de los cuales se seleccionaron los valores de dilución de las muestra analizadas microestructuralmente, las evaluaciones realizadas fueron metalografía, dureza y que estuvieran las muestras libres de fracturas y microgrietas [18].

De la misma manera para el desarrollo estadístico se utilizó el programa Minitab® para realizar la evaluación de la superficie de respuesta que es un diseño central compuesto.

Tabla 5. 20. Superficie de respuesta con valores de dilución para el análisis

| <b>Orden std.</b> | <b>Orden de corrida</b> | <b>Tipo pt</b> | <b>Bloques</b> | <b>Amperaje</b> | <b>velocidad</b> | <b>Dilución %</b> |
|-------------------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <b>1</b>          | <b>1</b>                | <b>-1</b>      | <b>-1</b>      | <b>75</b>       | <b>0.6000</b>    | <b>48,49</b>      |
| <b>4</b>          | <b>2</b>                | <b>1</b>       | <b>-1</b>      | <b>95</b>       | <b>0.6000</b>    | <b>58,96</b>      |
| <b>3</b>          | <b>3</b>                | <b>-1</b>      | <b>1</b>       | <b>75</b>       | <b>1.0000</b>    | <b>56,37</b>      |
| <b>8</b>          | <b>4</b>                | <b>1</b>       | <b>1</b>       | <b>95</b>       | <b>1.0000</b>    | <b>62,38</b>      |
| <b>6</b>          | <b>5</b>                | <b>-Pe</b>     | <b>0</b>       | <b>70,8578</b>  | <b>0.800</b>     | <b>50,16</b>      |
| <b>2</b>          | <b>6</b>                | <b>Pe</b>      | <b>0</b>       | <b>99,1421</b>  | <b>0.800</b>     | <b>62,02</b>      |
| <b>9</b>          | <b>7</b>                | <b>0</b>       | <b>Pe</b>      | <b>85</b>       | <b>0.5171</b>    | <b>50,97</b>      |
| <b>5</b>          | <b>8</b>                | <b>1</b>       | <b>Pe</b>      | <b>85</b>       | <b>1.0828</b>    | <b>59,86</b>      |
| <b>11</b>         | <b>9</b>                | <b>0</b>       | <b>0</b>       | <b>85</b>       | <b>0.800</b>     | <b>59,14</b>      |
| <b>7</b>          | <b>10</b>               | <b>0</b>       | <b>0</b>       | <b>85</b>       | <b>0.800</b>     | <b>58,75</b>      |
| <b>10</b>         | <b>11</b>               | <b>0</b>       | <b>0</b>       | <b>85</b>       | <b>0.800</b>     | <b>59,84</b>      |

**Tabla 5. 21.** Coeficientes de regresión estimados para dilución

| <b>Término</b>             | <b>coeficientes</b> | <b>Coeficientes del error</b> | <b>T</b> | <b>P</b> |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------|----------|----------|
| <b>Constante</b>           | -152.823            | 23.8935                       | -6.396   | 0.001    |
| <b>Amperaje</b>            | 3.201               | 0.4816                        | 6.647    | 0.001    |
| <b>Velocidad</b>           | 130.941             | 17.5938                       | 7.442    | 0.001    |
| <b>Amperaje*Amperaje</b>   | -0.014              | 0.0027                        | -5.050   | 0.004    |
| <b>Velocidad*Velocidad</b> | -42.897             | 6.8132                        | -6.296   | 0.001    |
| <b>Amperaje*Velocidad</b>  | -0.557              | 0.1619                        | -3.443   | 0.018    |

De estos resultados se puede decir que estadísticamente las variables que causa mayor efecto en el proceso son las que presentan valores de P menores a 0.05, por lo que todas las variables son significativas, la ecuación 5.1 representa el modelo de las variables de estudio el cual presenta una variación con la realidad de 3.2035 %.

Modelo de dilución

Donde A= Área y V= Velocidad

$$\text{Dilución} = -152.823 + 3.201 A + 130.941V - 0.014A^2 - 42.897V^2 - 0.557A*V \quad (5.1)$$

**Comprobación.**

$$D = -152.823 + 3.201 (99.1421) + 130.941(0.8) - 0.014 (99.1421)^2 - 42.897 (0.8)^2 - 0.557(99.1421) *(0.8)$$

**D modelo = 60.03463 %**

**D real = 62,0215 %**

El modelo del área de refuerzo presentó una  $R^2$  ajustada de 98,24% % lo que representa su similitud con la realidad o con sus valores reales arrojados en cada experimentación.

Por otra parte en la tabla 5.24 se muestra el análisis de varianza de la dilución presentando que los valores de P no exceden el valor de 0.05 lo cual hace que el modelo sea aceptable, la falta de ajuste es por encima de 0.05 por

lo tanto el modelo se considera estadísticamente aceptable para predecir y optimizar.

**Tabla 5. 22.** Análisis de varianza de la dilución del cordón de soldadura.

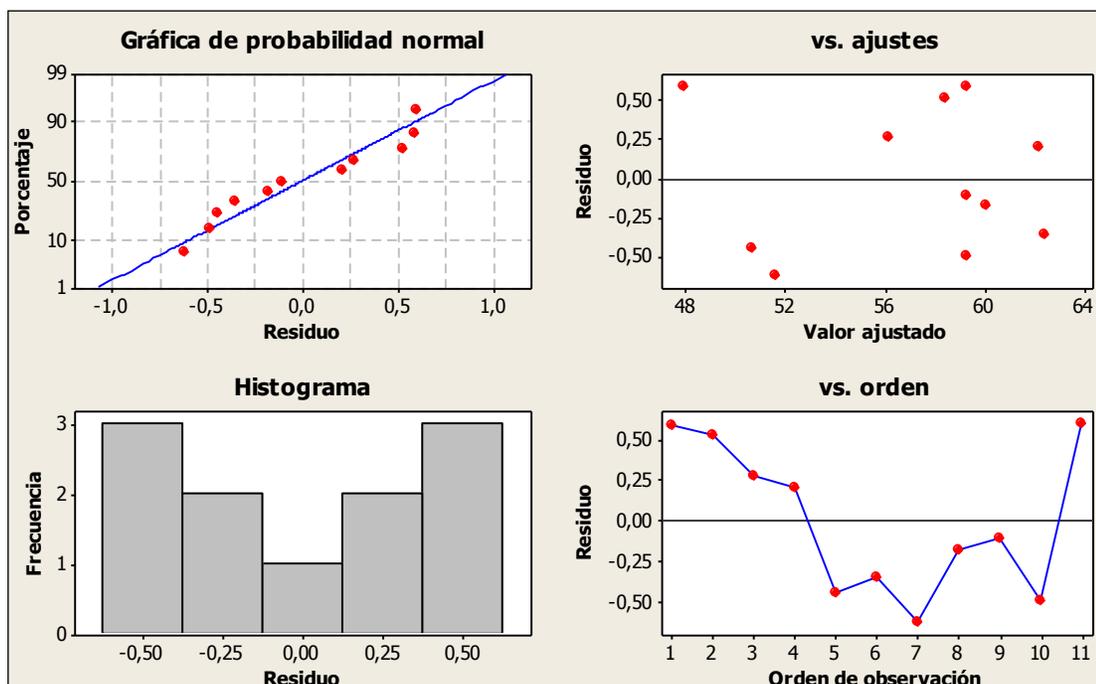
| Fuente                 | GL | SC Sec. | MC Ajustada | F      | P     |
|------------------------|----|---------|-------------|--------|-------|
| <b>Regresión</b>       | 5  | 235.76  | 47.15       | 112.42 | 0.009 |
| <b>Lineal</b>          | 2  | 209.47  | 104.75      | 249.74 | 0.000 |
| <b>Cuadrado</b>        | 2  | 21.32   | 10.66       | 25.42  | 0.002 |
| <b>Interacción</b>     | 1  | 4,97    | 4.97        | 11.86  | 0.018 |
| <b>Error Residual</b>  | 5  | 2.09    | 0.41        |        |       |
| <b>Falta de Ajuste</b> | 3  | 1.48    | 0.49        | 1.63   | 0.403 |
| <b>Error puro</b>      | 2  | 0.61    | 0.30        |        |       |
| <b>Totales</b>         | 10 | 237.86  |             |        |       |

En la tabla 5.25 se observan los valores reales de dilución medidos durante la experimentación y el ajuste realizado durante el análisis del modelo, en la columna de ajuste SE, se aprecia la diferencia entre el valor real medido durante la experimentación y el ajuste realizado por el programa Minitab® durante el análisis de la superficie de respuesta.

**Tabla 5.23.** Ajustes y residuos del análisis de dilución

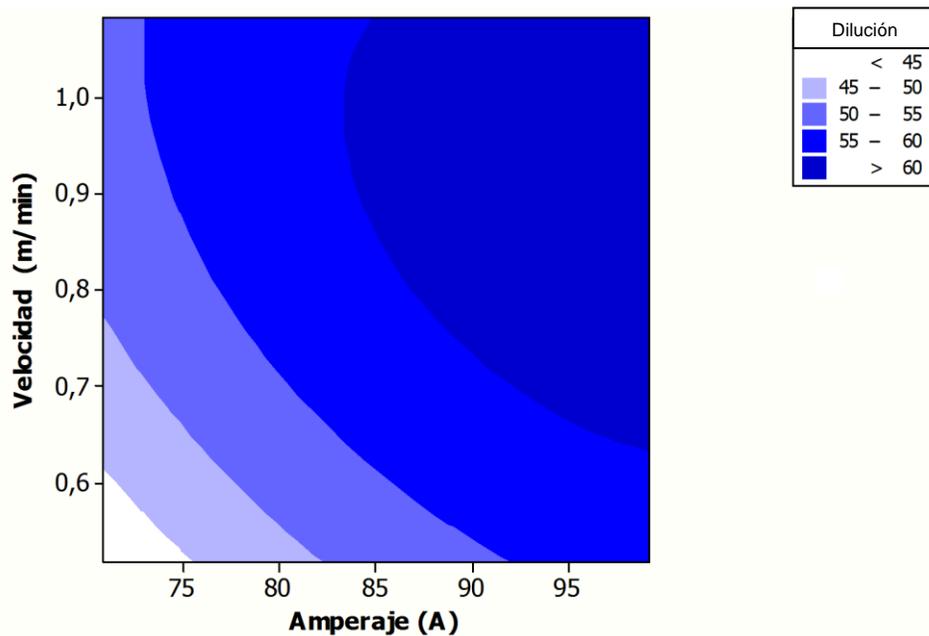
| Obs. | Orden Esat | Dilución | Ajuste     | Ajuste SE | Residuo | Residuo Estándar |
|------|------------|----------|------------|-----------|---------|------------------|
| 1    | 1          | 48.49    | 47.9003008 | 0.512     | 0.592   | 1.49             |
| 2    | 2          | 58.96    | 58.443359  | 0.512     | 0.525   | 1.32             |
| 3    | 3          | 56.37    | 56.0980314 | 0.512     | 0.275   | 0,69             |
| 4    | 4          | 62.38    | 62.181163  | 0.512     | 0.207   | 0.52             |
| 5    | 5          | 50.16    | 50.6169232 | 0.512     | -0.447  | -1.13            |
| 6    | 6          | 62.02    | 62.3734656 | 0.512     | -0.352  | -0.89            |
| 7    | 7          | 50.97    | 51.5941126 | 0.512     | -0.624  | -1.57            |
| 8    | 8          | 59.86    | 60.0364541 | 0.512     | -0.175  | -0.44            |
| 9    | 9          | 59.14    | 59.2479363 | 0.374     | -0.107  | -0.2             |
| 10   | 10         | 58.75    | 59.2479363 | 0.374     | -0.491  | -0.93            |
| 11   | 11         | 59.84    | 59.2479363 | 0.374     | 0.598   | 1.13             |

En la Figura 5.12 se observa la gráfica de probabilidad normal la cual muestra un comportamiento lineal del residuo con respecto al porcentaje, nos sirve para asegurarnos de que no hay alteraciones fuertes a los supuestos de la regresión, indicando normalidad, en la gráfica de residuos para el ajuste lineal de los datos muestran una distribución uniforme distribuida entre la parte positiva y negativa.



**Figura 5. 12.** Gráfica residuos para la dilución

En la figura 5.13. Se muestra la gráfica de contornos la cual se traza por medio de las curvas de los niveles de las respuestas constantes del plano X1, X2. Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta [24].

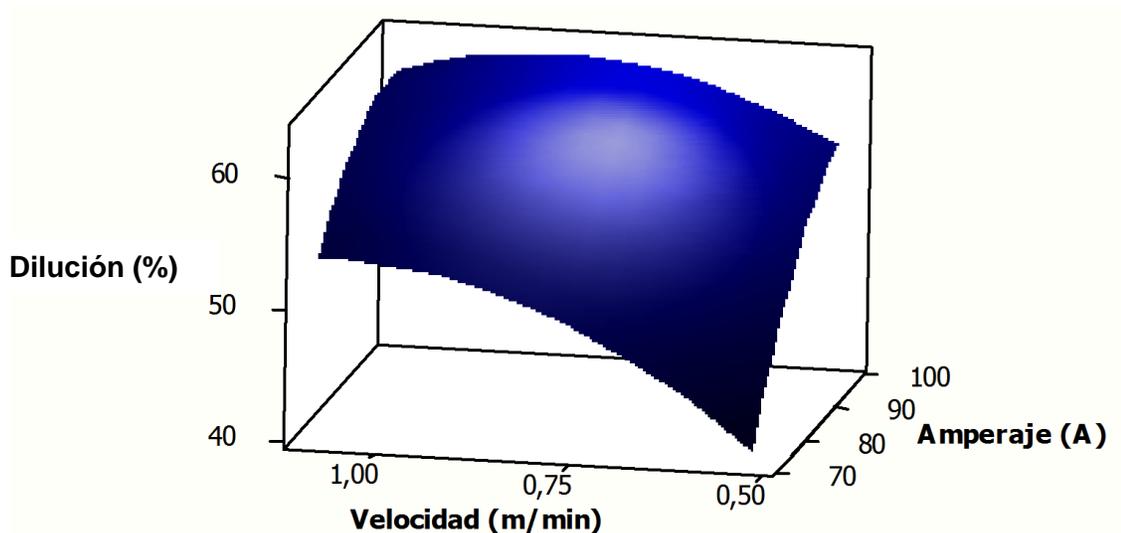


**Figura 5.13.** Gráfica de contornos donde se describe la velocidad en función del amperaje

En la gráfica de la figura 5.13 se presenta el impacto que tiene el amperaje y velocidad en la dilución, lo cual representa el área de refuerzo y el área de penetración del cordón de soldadura que tenga las mejores características microestructurales y mecánicas, mostrando como resultado del análisis del modelo una  $S=0,647648$  lo cual nos indica la capacidad de predicción del modelo y se utiliza para calcular  $R^2$ , un PRESS = 11.9498 y con una  $R^2 = 99.12\%$  la cual se obtiene de (ssr) suma de cuadrados del regresión entre (sst) suma de cuadrados totales y una  $R^2$  ajustada de 98.24% [32].

Conforme a la gráfica de contornos mostrada en la grafica 5.14 donde se muestra que a una velocidad de 0,6 el valor del amperaje no influye para poder encontrar valores de dilución arriba del 60%, pero basado en la caracterización de las muestras se encontró que las características de las muestras 4, 8, 10 presentan mejores características mecánicas y microestructurales.

Por lo que los valores objetivo y los rangos mayor y menor se encuentran en la parte superior de la superficie donde se pueden encontrar el % de dilución en un rango de 59-63% como se muestra en la figura 5.14.



**Figura 5. 14.** Gráfica de la superficie de dilución respecto a la velocidad y el amperaje.

Para realizar la optimización aplicando la técnica de la función de deseabilidad la cual se enfoca en una respuesta objetivo captada durante la experimentación donde el valor objetivo de 62,02 % fue sacado de la muestra que no presentó fractura y que sus características mecánicas y metalúrgicas fueron las mejores en el rango de parámetros evaluados, el valor inferior de 59,86 % se tomó como límite inferior de las muestras aceptables, el valor superior de 62,39 % el cual se obtuvo del límite superior de las muestras que no fracturaron, en la tabla 5. 26 se observan los valores de dilución planteados para realizar la optimización.

**Tabla 5. 24.** Parámetros planteados para la optimización de dilución

| Meta     | Inferior | Objetivo | Superior | Ponderación | Importar |
|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|
| Dilución | 59,86    | 62,02    | 62,39    | 1           | 1        |

La técnica de deseabilidad está sujeta a la siguiente condición [24].

$$d_i = ((\hat{y}_i - L_i)/(T_i - L_i))^{r_i} \quad L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \quad (5.2)$$

$$d_i = (H_i - \hat{y}_i)/(H_i - T_i)^{r_i} \quad T_i \leq \hat{y}_i \leq H_i \quad (5.3)$$

$$d_i=0 \quad \hat{y}_i < L_i \quad (5.4)$$

$$d_i=0 \quad \hat{y}_i > H_i \quad (5.5)$$

Donde la ecuación 5.2 cumple con la condición  $59,86 \leq 62,0139 \leq 62,02$

Donde:

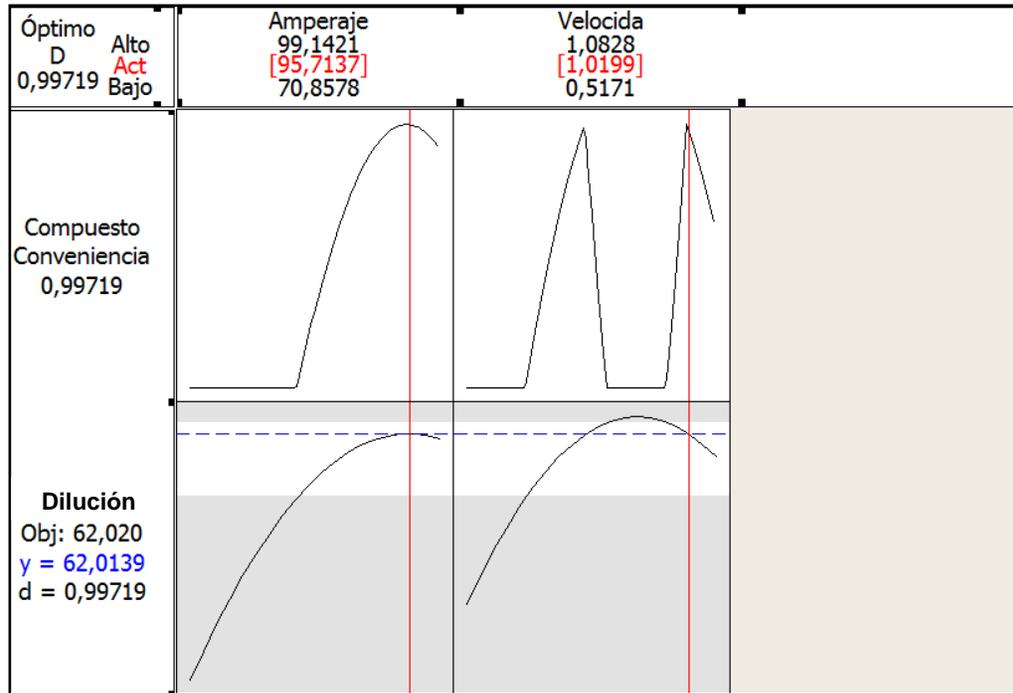
$$(5.2) \quad d_i = ((\hat{y}_i - L_i)/(T_i - L_i))^{r_i} \quad L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i$$

$$d_i = ((62,0139 - 59,86)/(62,02 - 59,86))^1$$

$$d_i = 0.997185925$$

Los parámetros obtenidos mostraron como resultado una solución global con un valor de amperaje de 95.71 A y una velocidad de avance de 1.01994 m/min, con una respuesta pronosticada de dilución del 62.0139 % y un valor de conveniencia 0.997185 el cual indica que la optimización es aceptable ya que los valores de aceptabilidad son 0-1 donde  $d_i=0$  no es aceptable y un  $d_i$  cercano a 1 ó 1 es un modelo aceptable.

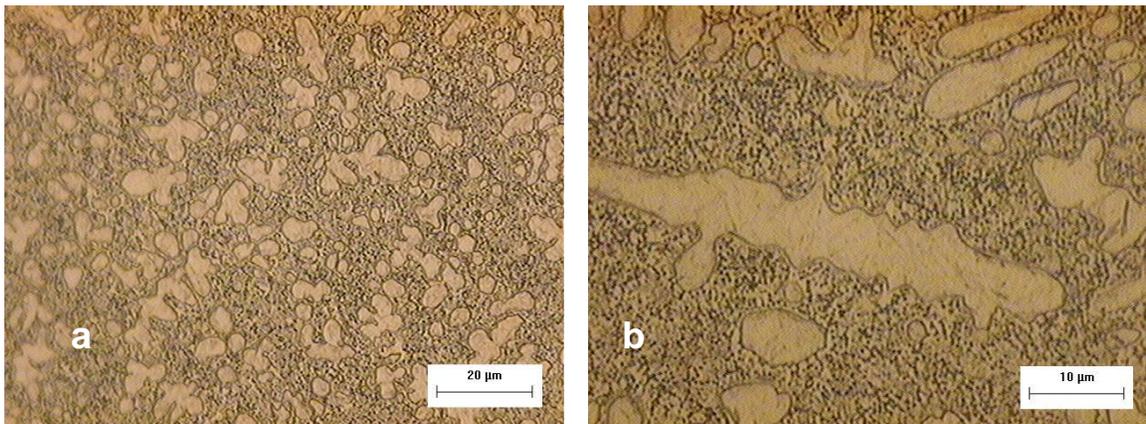
En la figura 5.15 se puede observar la gráfica del resultado de los parámetros óptimos según el criterio objetivo utilizado para la optimización.



**Figura 5. 15.** Gráfica del simulador de los resultados de los parámetros óptimos.

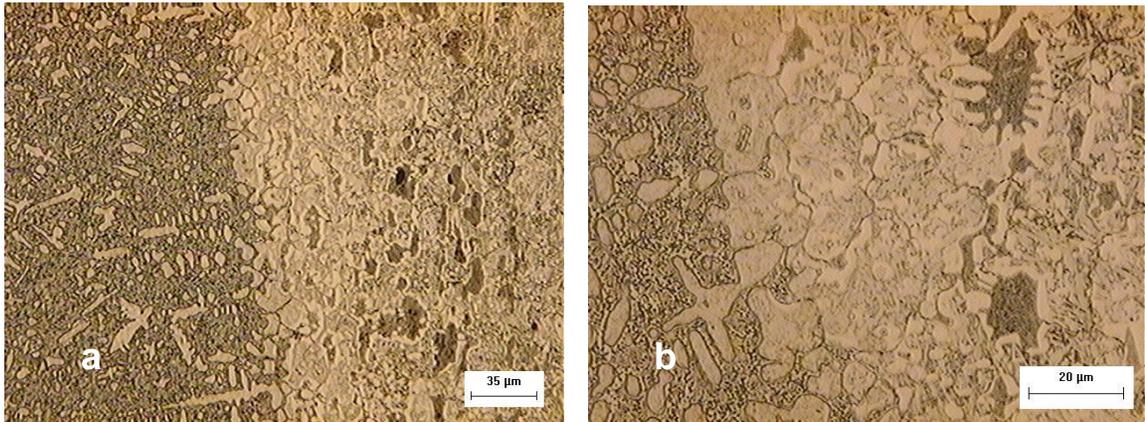
## 5.7. Caracterización microestructural

Después de la evaluación dimensional de las características físicas del cordón de soldadura del área de refuerzo y del área de penetración se caracterizó el aporte del cordón de soldadura. En la figura 5.16a presenta fotomicrografías tomada a 500x donde se observa la microestructura del aporte la cual está formada típicamente por partículas angulares de carburos (Cr, Nb), dentro de una matriz aglutinante relativamente blanda (a base de Fe), donde se puede observar más a detalle la distribución de los carburos en la figura 5.16b.



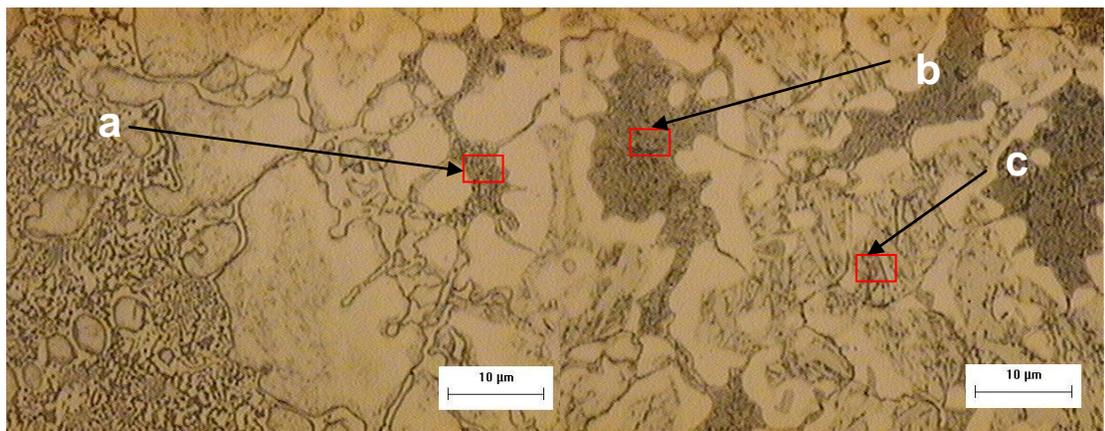
**Figura 5.16.** a) Microestructura del aporte a 500X, b) Microestructura a 1000X.

En la figura 5.17 se aprecia la microestructura de la línea de interface y la interacción del acero grado herramienta D2 y el aporte base Fe. En la figura 5.17a se observa el crecimiento uniforme a partir de la línea de interface en donde presenta una matriz base Fe, con austenita retenida.



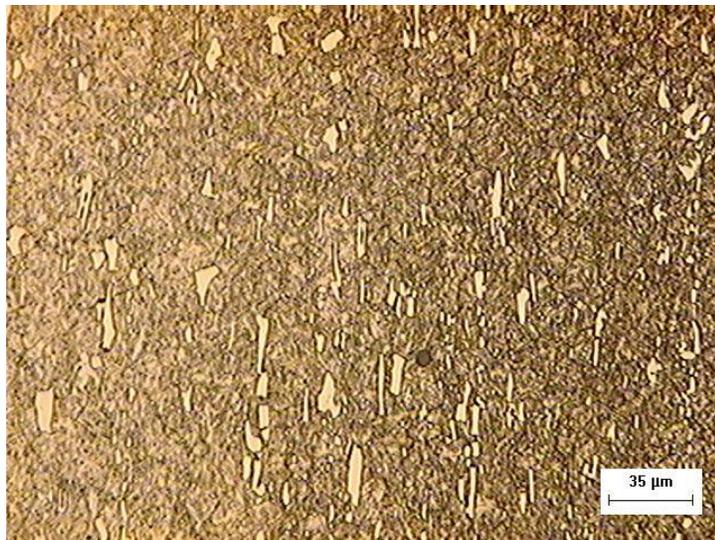
**Figura 5.17.** a) Microestructura del aporte a 200X, b) Microestructura a 500X.

En la figura 5.18 se muestra la microestructura tomada a 1000x la cual se observa a) Matriz base Fe, b) Los puntos oscuros son partículas de Nb distribuidas sobre la matriz base Fe la cual presenta durezas de hasta 68 Rc debido a la presencia de estas partículas, c) Presenta agujas de martensita formada en la austenita.



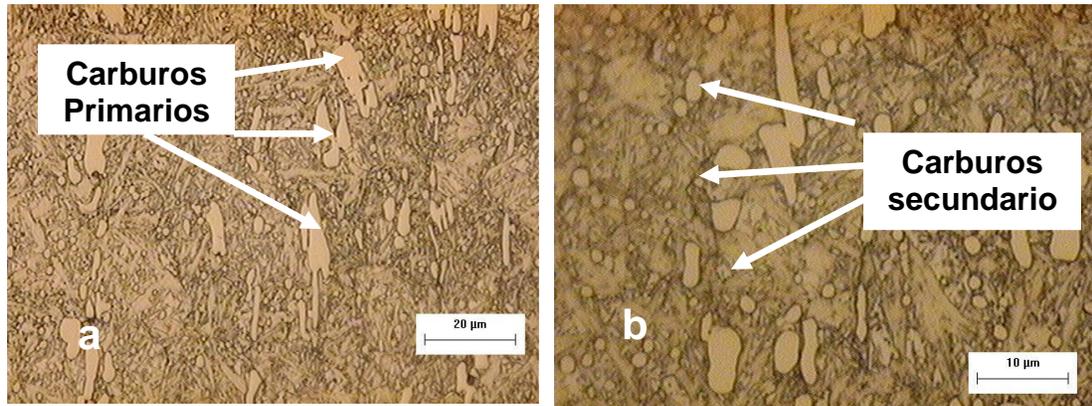
**Figura 5. 18.** Microestructura de la línea de interface a 1000X.

En la figura 5.19 Se presenta la micrografía mostrando la microestructura de la zona afectada por el calor, donde se observan los carburos primarios y secundarios ricos en cromo distribuidos en una dirección, lo cual es debido al proceso de laminación al que fue sometido el metal base. La microestructura principal está compuesta por martensita en forma de placas con austenita retenida, debido a los altos contenidos de carbono mostrados en su composición química, además de los carburos de cromo observados desde la microestructura original, la cual presenta una dureza promedio en la matriz de  $57.3 \pm 1\text{HRC}$  y en los carburos primarios se registraron durezas de  $62 \pm 1\text{HRC}$ .



**Figura 5.19.** Micro estructura de la zona afectada por el calor.

En la figura 5.20 se observa la microestructura del metal base a) Se observan las partículas de carburos primarios los cuales son identificados como  $M_7C_3$  con pequeñas cantidades de  $Cr_7C_3$  registrando medidas mayores a las 5 micras en forma de placas, b) Carburos secundarios identificados como  $M_{23}C_6$  con medidas menores a 5 micras generalmente en forma esferoidal en una matriz martensítica y de austenita retenida.

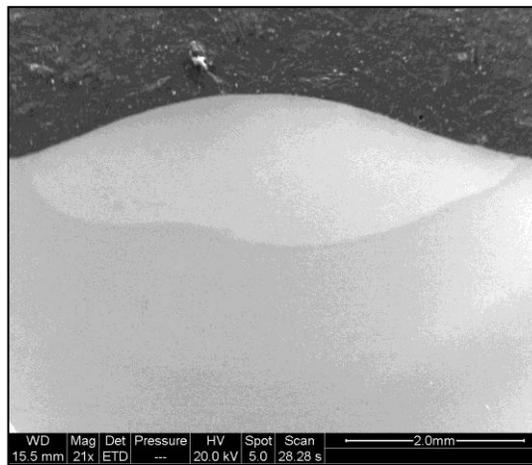


**Figura 5.20.** a) Carburos primarios presentes en la microestructura del aporte a 500X, b) Carburos secundarios microestructura a 1000X.

## 5.8. Caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

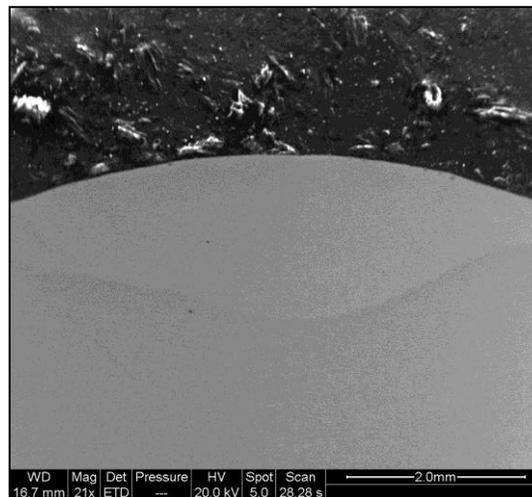
Realizando un análisis por MEB de los cordones que no presentaron fractura en la zona afecta por el calor y en el aporte del cordón soldadura, mostrando características mecánicas aceptables para la recuperación de componentes, en la figura 5.24 y 5.25 se aprecian las macrográficas de las pruebas 4 y 8 en las cuales se observa que no presenta fractura.

**M4**



**Figura 5. 21.** Cordón de soldadura número 4 sin fractura

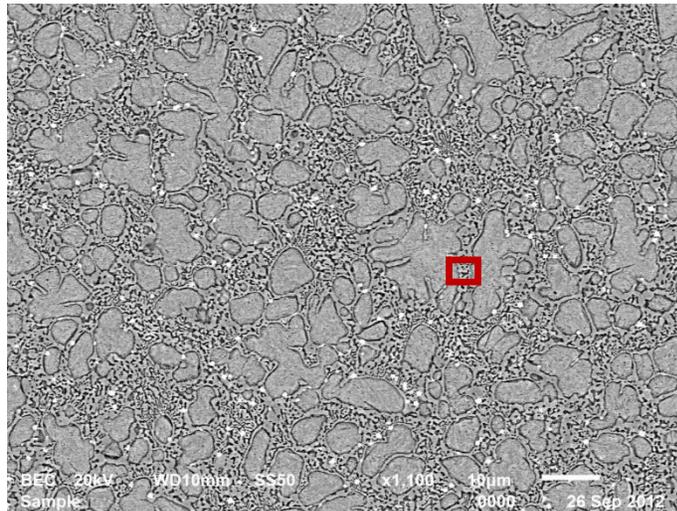
**M8**



**Figura 5. 22.** Cordón de soldadura número 8 sin fractura

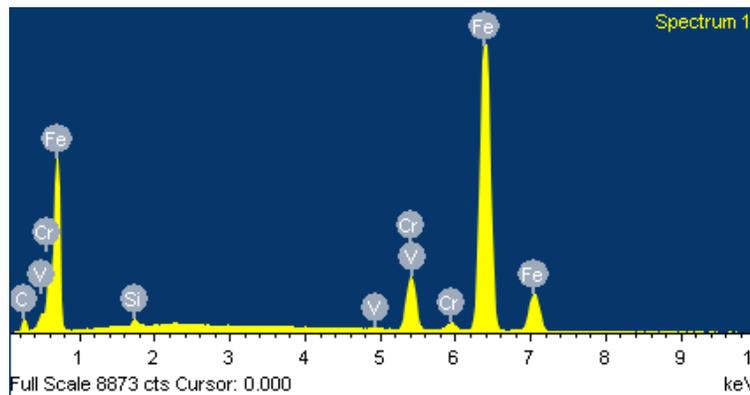
### 5.8.1. Identificación de carburos

Los resultados de EDS en una microárea del recubrimiento se presentan en la figura 5.23. Como se puede apreciar el aporte del cordón de soldadura, presentó una distribución de partículas de Nb uniforme la cual se muestra en la figura 5.23.



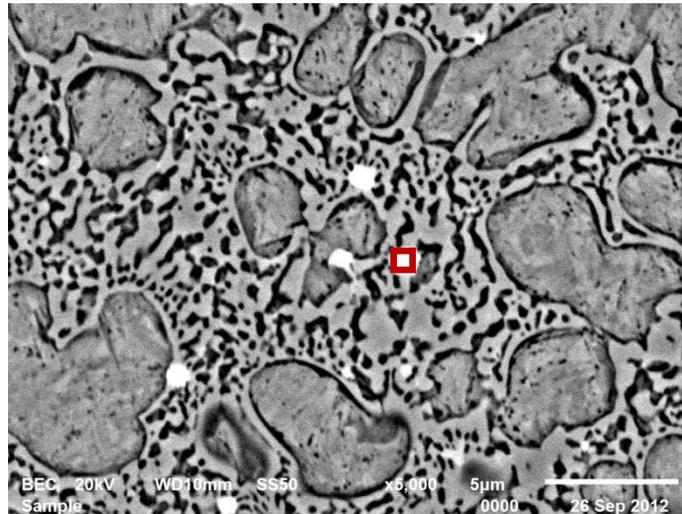
**Figura 5. 23.** Metalografía tomada a 1100X

En el análisis EDS realizado en la figura 5.24 presentó un porcentaje de Fe de 83.13 % y de Cr 8.79 %.

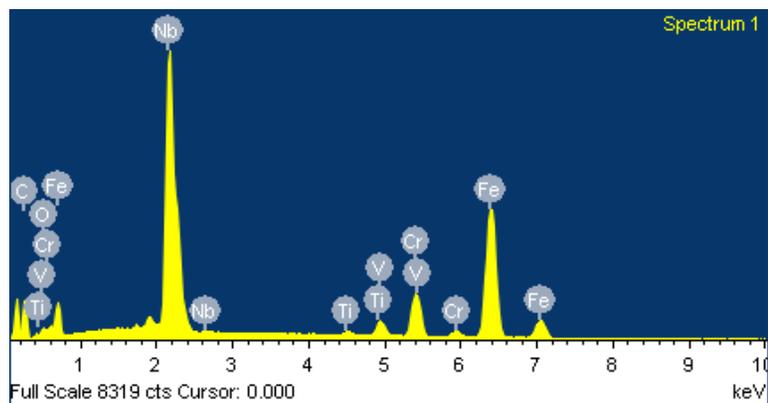


**Figura 5. 24.** Gráfica Análisis puntual de EDS correspondiente a la matriz del aporte base Fe

El análisis realizado en la muestra 4 presentó una distribución de Nb uniforme con dimensiones pequeñas entre 1.000  $\mu\text{m}$  y 0.250  $\mu\text{m}$  de diámetros los cuales se muestran en la figura 5.25.



**Figura 5. 25.** Microanálisis de las partículas de Nb las cuales presentan una distribución uniforme en la matriz base Fe.

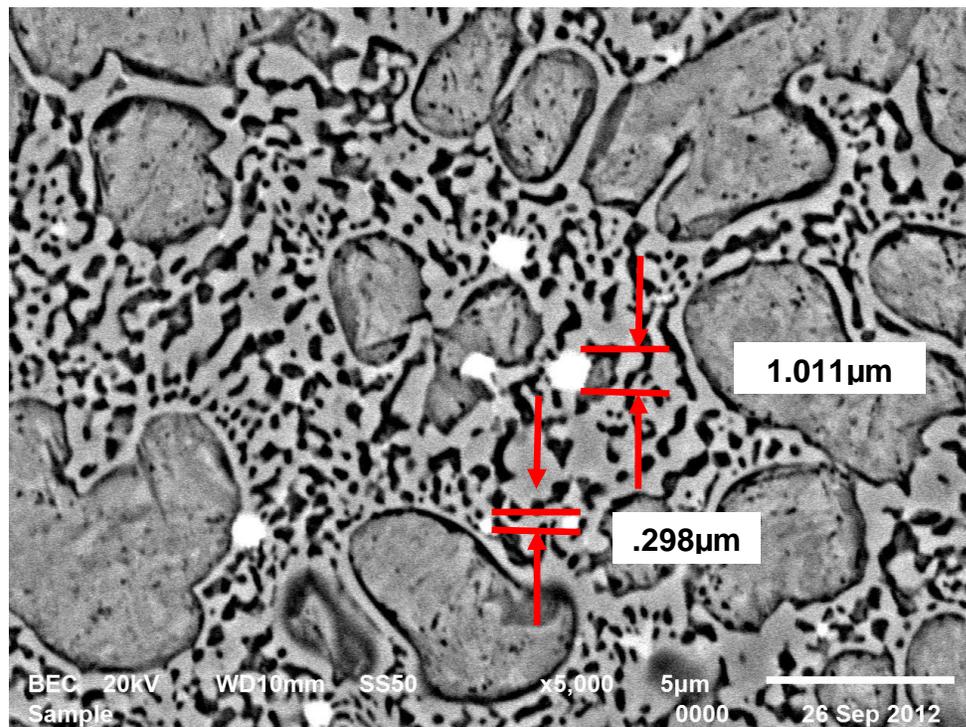


**Figura 5. 26.** Análisis EDS correspondiente a las partículas de Nb distribuidas uniformemente.

En la gráfica 5.26 se muestran los resultados del microanálisis realizado al las partículas claras presentadas en la figura 5.20 las cuales presentaron una composición principal de Nb con un contenido de 37.66% (e.p.) y un contenido

de Cr de 6.38% (e.p.) el cual mejora las características mecánicas de resistencia al desgaste [30].

Las partículas de Nb presentes en la microestructura fueron medidas y caracterizadas las cuales presentar una forma amorfa con unas dimensiones estándar de 0.500-1.00 $\mu\text{m}$ .

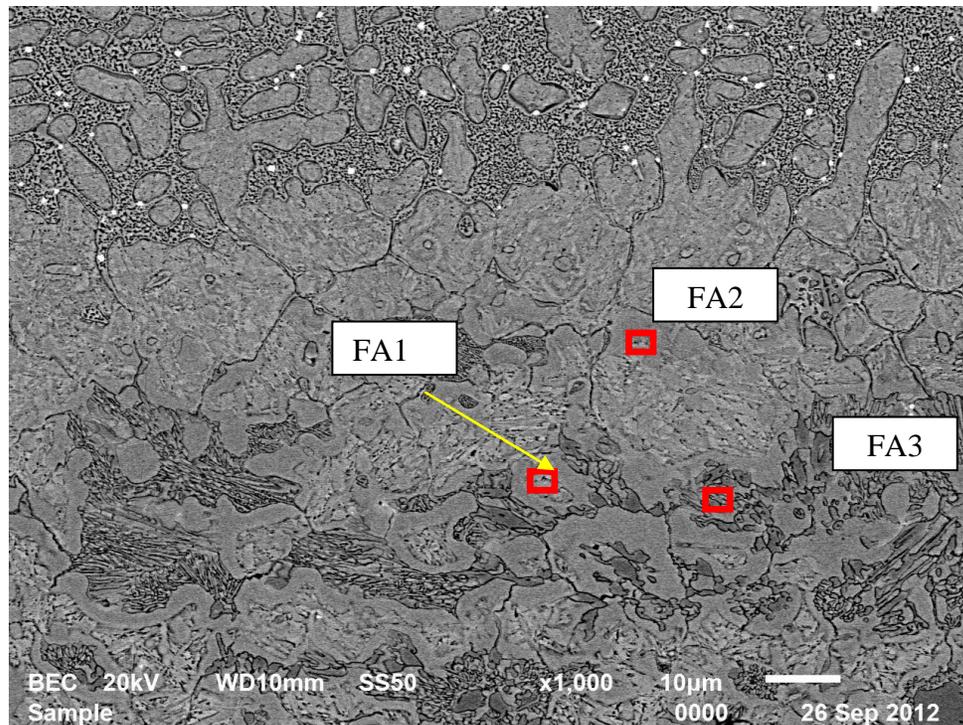


**Figura 5. 27.** Medición de las partículas de Nb.

La morfología y la distribución de las partículas de Nb fueron las mismas presentadas en las muestras 8 y 10 las cuales no muestran fractura y con una distribución uniforme de las partículas de Nb [31].

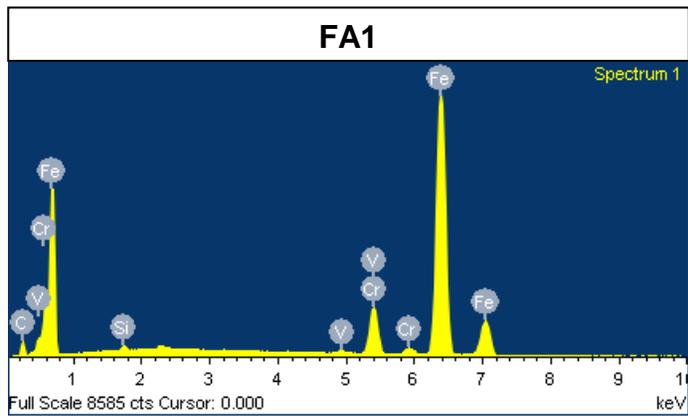
## 5.8.2. Identificación de línea de interfase

Durante el proceso de soldadura se presentó un ablandamiento o una caída de dureza en la línea de interfase mostrando una dureza de de 46 -51 HRC. la cual es debido a que es el punto más alejado y el último en solidificar realizando un revenido del material, realizando una análisis de MEB (Microscopio electrónico de barrido).



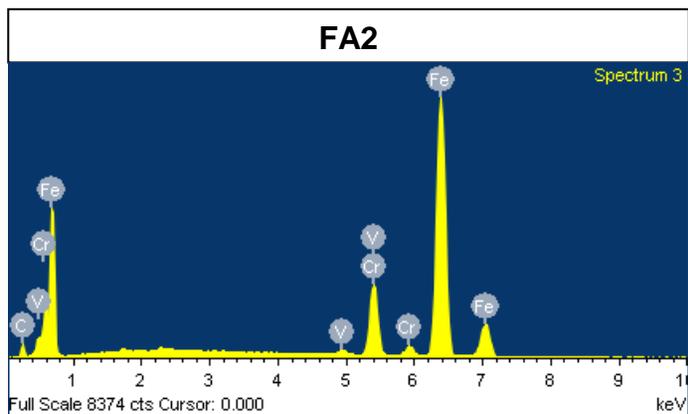
**Figura 5. 28.** Microestructura de la muestra 4 analizada en el MEB de la línea de interfase

En la Figura 5.29 donde se aprecia la gráfica realizada a la FA1 el cual presenta un estructura base Fe con un porcentaje en peso de 82.40, un contenido de Cr de 8.25 y carbono de 8.65 lo cual favorece la presencia de martensita revenida y autenita debido al tiempo y temperatura a la que fue expuesta la línea de interfase durante la soldadura [32].



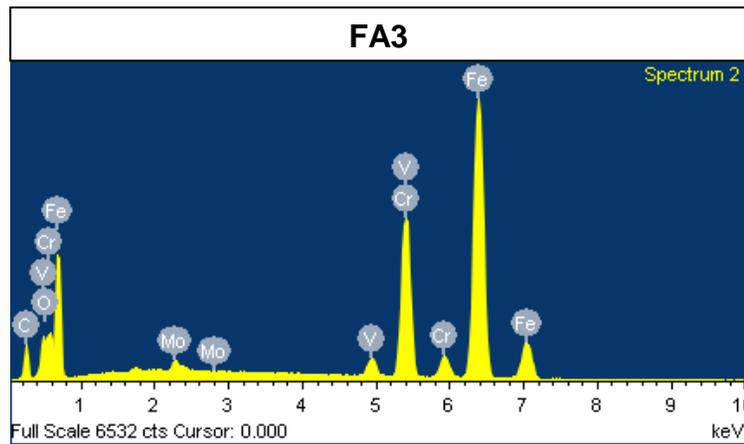
**Figura 5. 29.** Gráfica del análisis EDX de la zona FA1 de la línea de interfase.

En la figura 5.30 se aprecia el análisis EDX realizado a la fase más clara la microestructura de la figura 5.21 en la cual se encontró un incremento en el contenido de Cr con un valor de 12.39% lo cual indica que tenemos presente una matriz de martensita con austenita retenida y la presencia de carburos secundarios presentando una dureza con rango entre 47.5-52HRC en la línea de interfase.



**Figura 5. 30.** Gráfica del análisis EDX de la zona FA2 de la línea de interface.

En la figura 5.31 se presenta el análisis EDX realizado a la matriz de la línea de interfase donde mostró un incremento considerable del contenido de Cr de 20.89% donde el cromo se precipitó hacia la matriz principal presentando una matriz austenítica con carburos de cromo primarios.



**Figura 5. 31.** Gráfica del análisis EDX de la zona FA2 de la línea de interfase.

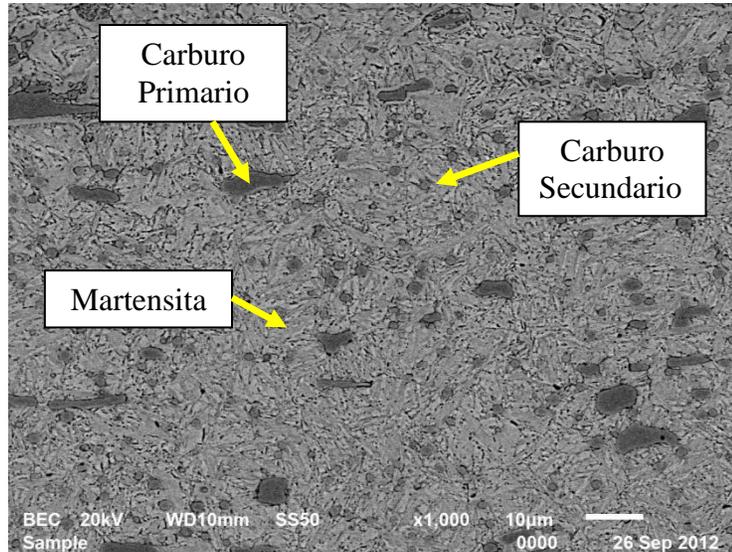
En la tabla 5.27 se muestra en porcentaje en peso de los análisis EDS realizados en la microestructura mostrada previamente en la figura 5.21

**Tabla 5. 25.** Análisis EDS de las zonas marcadas en la figura 5.21

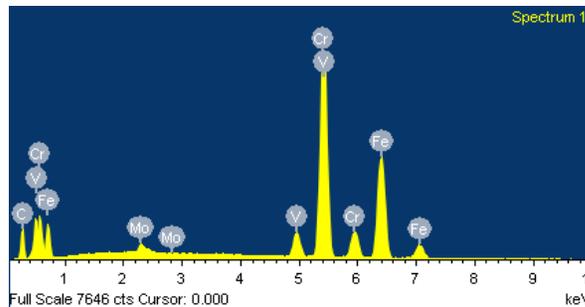
| % peso del EDS en Línea de interfase |       |      |      |      |       |       |    |      |
|--------------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|----|------|
| Área                                 | C     | Si   | V    | Mo   | Cr    | Fe    | Nb | O    |
| <b>FA1</b>                           | 8.65  | 0.41 | 0.28 |      | 8.25  | 82.40 |    |      |
| <b>FA2</b>                           | 7.95  |      | 0.65 |      | 12.39 | 79.00 |    |      |
| <b>FA3</b>                           | 13.14 |      | 2.06 | 1.51 | 20.89 | 60.41 |    | 1.99 |

### 5.8.3. Zona afectada por el calor

En la figura 5.32 se muestra la zona afectada por el calor donde se aprecian la presencia de carburos primarios y carburos secundarios y una matriz de agujas de martensita.



**Figura 5. 32.** Microestructura tomada con el MEB de la zona afectada por el calor



**Figura 5. 33.** Gráfica del análisis EDS de los carburos primarios en la zona afectada por el calor

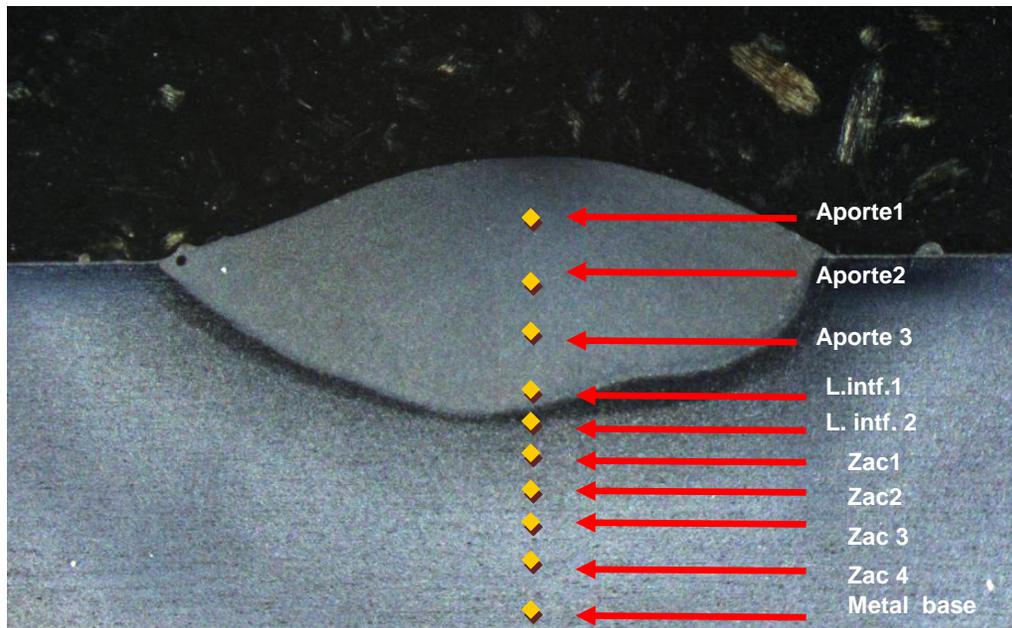
**Tabla 5. 26.** Valores de % en peso del análisis realizado a los carburos

| % peso del EDX en línea de interface |       |      |   |      |       |       |      |
|--------------------------------------|-------|------|---|------|-------|-------|------|
| Área carburos                        | C     | Si   | V | Mo   | Cr    | Fe    | Nb O |
|                                      | 15.96 | 4.46 |   | 1.88 | 42.97 | 34.73 |      |

## 5.9. Pruebas mecánicas

### 5.9.1. Pruebas de dureza

En la tabla 5.29 se muestran los datos de las pruebas de dureza realizados a los recubrimientos en las diferentes zonas, en la figura 5.34 se muestra las regiones donde se realizaron las microindentaciones.



**Figura 5.34.** Mapeo de las pruebas de dureza realizada a los cordones de soldadura.

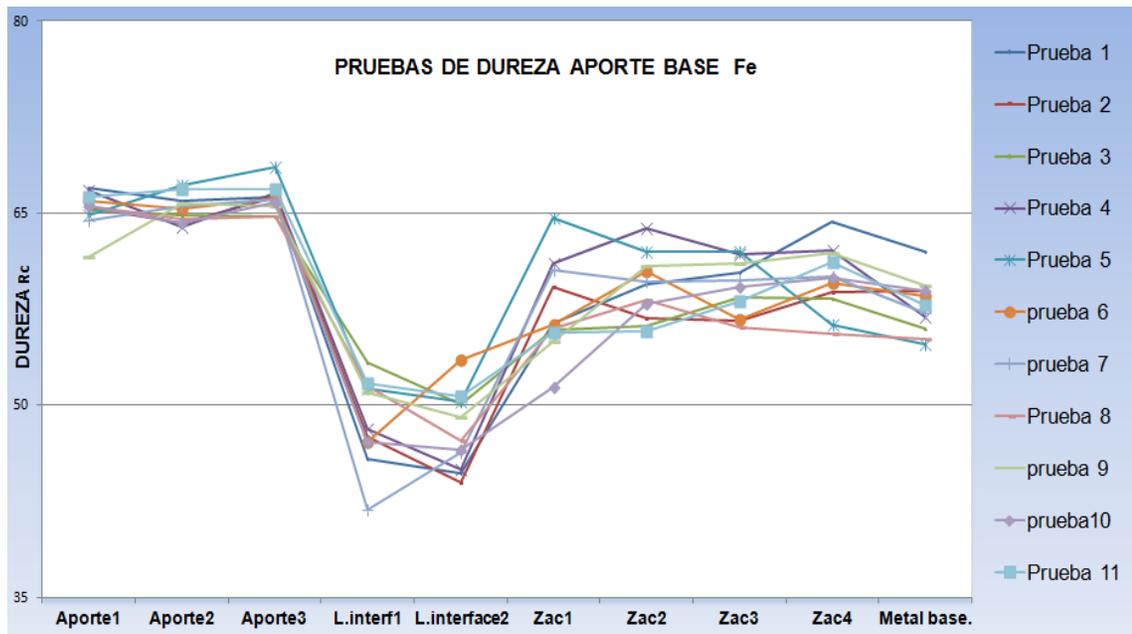
En la tabla 5.29 se puede apreciar los valores de microdureza realizada con una carga de 500g y a una temperatura ambiente controlada de cada una de las muestras donde el comportamiento de las que no presentaron fractura muestra 4,8 10 se pueden apreciar su ablandamiento en la línea de interfase

**Tabla 5. 27.** Resultados de las pruebas de dureza realizadas en la sección transversal de los cordones de soldadura

| Prueba | Aporte1<br>HRC. | Aporte2<br>HRC | Aporte3<br>HRC | L.interf1<br>HRC | L.interf2<br>HRC | Zac1<br>HRC | Zac2<br>HRC. | Zac3<br>HRC | Zac4<br>HRC | M.<br>base<br>HRC |
|--------|-----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|
| 1      | 67.0            | 65.9           | 66.2           | 45.8             | 44.7             | 56.4        | 59.4         | 60.3        | 64.3        | 62                |
| 2      | 65.4            | 64.2           | 66.2           | 47.5             | 44               | 59.2        | 56.8         | 56.6        | 58.8        | 58.9              |
| 3      | 65.2            | 64.8           | 64.7           | 53.3             | 50.1             | 55.9        | 56.2         | 58.4        | 58.3        | 56                |
| 4      | 66.7            | 63.9           | 66.5           | 48.1             | 45               | 61.1        | 63.8         | 61.8        | 62.1        | 56.9              |
| 5      | 64.8            | 67.2           | 68.6           | 51.3             | 50.3             | 64.6        | 62           | 62          | 56.3        | 54.7              |
| 6      | 65.9            | 65.3           | 66.1           | 47.1             | 53.5             | 56.3        | 60.4         | 56.7        | 59,5        | 58.5              |
| 7      | 64.4            | 65.5           | 66.0           | 41.8             | 46.3             | 60.5        | 59.6         | 59.7        | 60          | 57.2              |
| 8      | 65.5            | 64.5           | 64.7           | 51.5             | 47.2             | 56.0        | 58.2         | 56.1        | 55.6        | 55.2              |
| 9      | 61.6            | 65.7           | 65.5           | 51.0             | 49.0             | 54.9        | 60.8         | 61.1        | 61.9        | 59.3              |
| 10     | 65.5            | 64.2           | 65.8           | 47.1             | 46.5             | 51.4        | 57.9         | 59.2        | 59.9        | 58.9              |
| 11     | 66.2            | 66.9           | 66.9           | 51.7             | 50.7             | 55.7        | 55.8         | 58.1        | 61.2        | 57.8              |

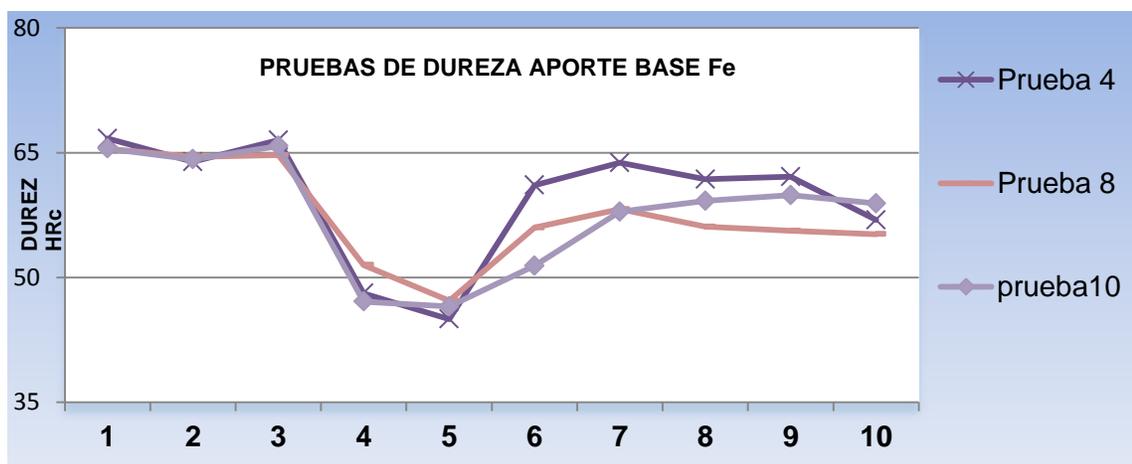
En la figura 5.35. Se puede observar el comportamiento de las durezas de las pruebas, donde se aprecia un incremento de la dureza en el cordón de soldadura de 57 HRC del metal base se incrementó hasta un 67 HRC en el cordón de soldadura este incremento de la dureza en el cordón de soldadura favorece la resistencia al desgaste y la abrasión ya que son los métodos de desgaste que sufren en la actualidad los herramientas, en la línea de interface sufre un ablandamiento esto debido a la interacción del soluto con el solvente en la línea de interface al momento de la solidificación del charco de soldadura.

Las pruebas 4, 8 y 10 fueron las que presentaron durezas más elevadas en el aporte con 67 HRC. Incrementado 10 HRC por encima del metal base AISI D2.



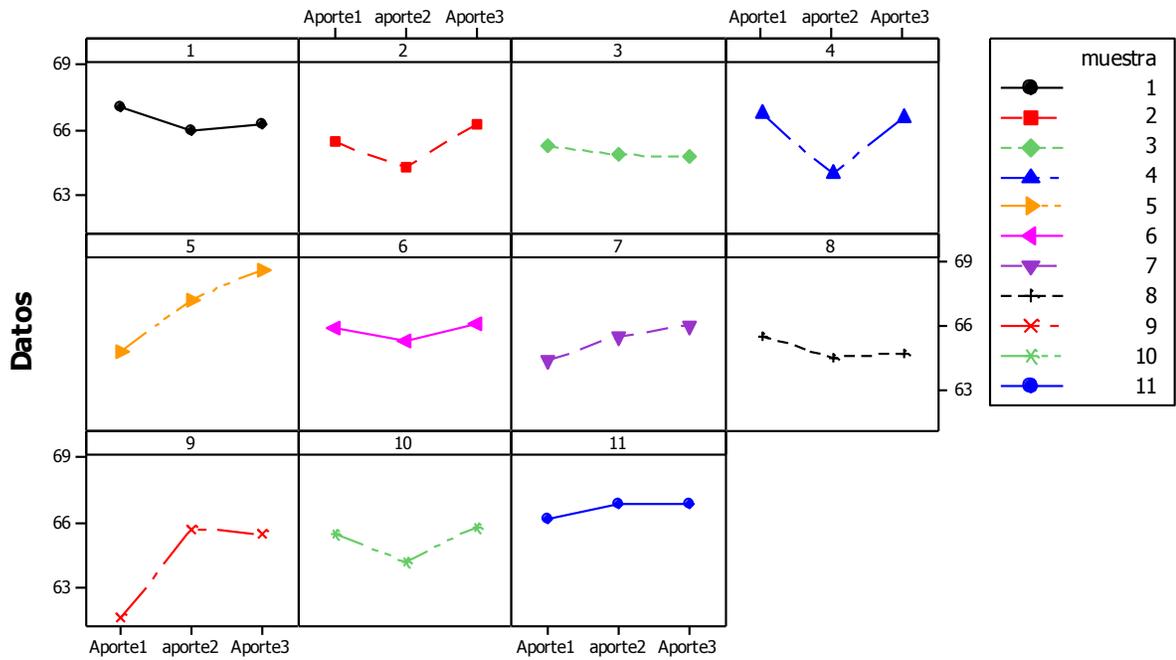
**Figura 5.35.** Gráfica del comportamiento de las pruebas de durezas realizadas a los recubrimientos.

En la figura 5.36 se muestra el comportamiento del aporte en los recubrimientos 4, 8 y 10 que no presentaron fractura y la tendencia en cada indentación donde la muestra 10 tiene una recuperación de dureza gradual en la zona afectada por el calor.



**Figura 5. 36.** Gráfica de la línea media del aporte 1, aporte 2, aporte 3.

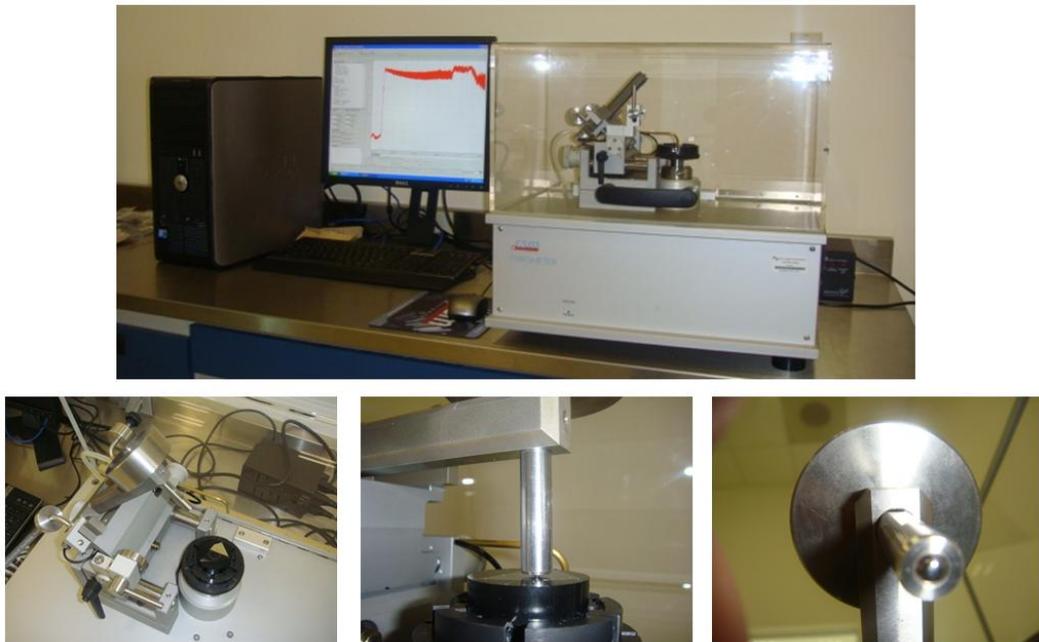
En la figura 5.37. Se muestra el comportamiento del aporte en cada uno de los recubrimientos y la tendencia en cada una de las 3 indentaciones realizadas en el aporte del cordón de soldadura, donde la tendencia más uniforme presentada en las muestras fue la muestra número 8.



**Figura 5.37.** Gráfica de la línea de medias (aporte1, aporte2, aporte3).

### 5.9.2. Pruebas de desgaste

Las pruebas de desgaste y fricción se llevaron a cabo aplicando el equipo de pin-on-disk, las pruebas se realizaron en un tribómetro CSM Instruments el cual se puede apreciar en la (Figura 5.38) con el programa Tribbox 4.1, en donde el sustrato de acero recubierto, se puso en contacto contra una bola de zafiro de un diámetro de 6 mm previamente limpiada con alcohol. La bola de zafiro fue fijada al brazo de carga, y el sustrato fue rotado por un motor eléctrico. En la prueba de desgaste, la carga de contacto fue de 1, 5 y 10 N. La velocidad de deslizamiento fue de 0.10 m/s con una distancia de 1000 m. La temperatura ambiental fue fijada en  $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$  con una humedad relativa de 20-30%.



**Figura 5. 38.** Fotografía del Tribómetro CSM Instruments

De acuerdo a la norma ASTM G99-05 se determinó la pérdida de volumen, como medida del desgaste, se calculó empleando la ecuación 5.6 para pérdida de volumen en disco, como establece esta norma.

$$V = \frac{\pi (R)(d)^3}{6(r)} \quad (5.6)$$

donde V es la pérdida de volumen en el disco [mm<sup>3</sup>], R es el radio de la huella de desgaste (distancia del centro del disco al pin) [mm], d es el ancho de la huella de desgaste [mm] y r es el radio de la bola [mm].

Una vez calculado el volumen perdido debido a la fricción posteriormente este valor se adicionó al software instalado para calcular la velocidad de desgaste ( $\kappa$ ), el cual calcula esta propiedad tomando en consideración el comportamiento del coeficiente de fricción durante el total de la distancia recorrida por el pin.

**Tabla 5. 28.** Parámetros utilizados en la prueba de tribología.

| Parámetros utilizados en la prueba de fricción | Valores seleccionados |
|--|-----------------------|
| Carga aplicada (N)                             | 1.5 y 10              |
| Velocidad (ms <sup>-1</sup> )                  | 0.10                  |
| Rapidez de adquisición (hz)                    | 2.0                   |
| Distancia (m)                                  | 1000                  |
| Ambiente                                       | Al aire               |
| Temperatura (°C)                               | 25 ± 2                |
| Humedad (%)                                    | 35 ± 5                |
| Duración (min)                                 | 90                    |
| Diámetro de la esfera de prueba (mm)           | 6.0                   |
| Material de la esfera                          | Zafiro                |

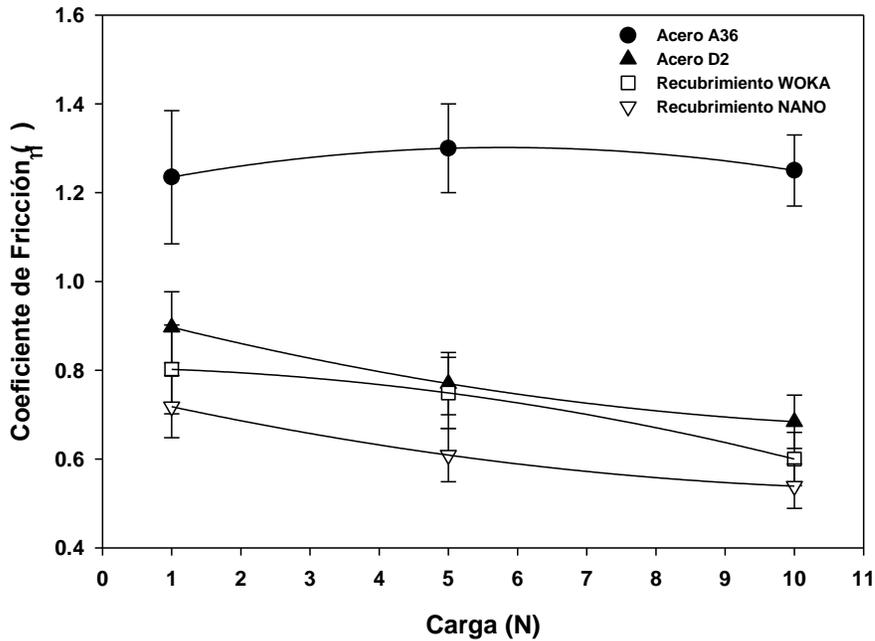


**Figura 5. 39.** Recubrimientos realizados para evaluar con las pruebas de desgaste.

Las pruebas de desgaste fueron realizadas al metal base, al aporte base Ni el cual fue utilizado para evaluar el efecto de la variable de la temperatura de precalentamiento, el aporte base Fe con Cr y Nb en el cual está basada la optimización de los parámetros ya que este aporte es el que tiene mejores propiedades de resistencia a la fricción y buena soldabilidad con el acero AISI D2, adicionalmente se realizaron las pruebas de desgaste al acero estructural tipo A36 para ver la referencia entre los coeficientes de fricción, solamente como comparativo.

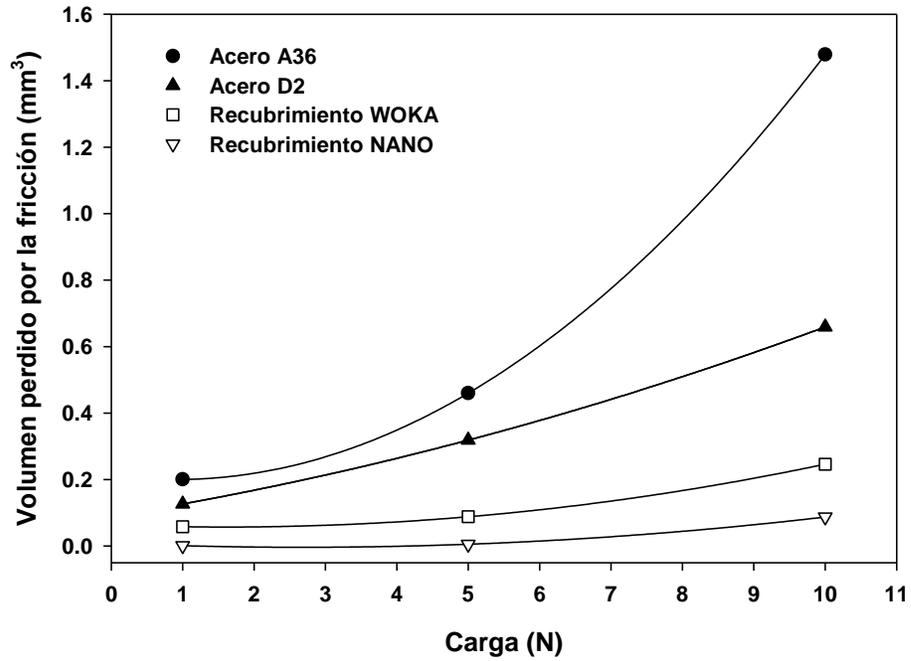
### **5.9.3. Resultados**

En la figura 5.40 se observa la gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción del material de aporte con respecto al metal base y a la referencia del acero tipo A 36 donde el coeficiente más bajo mostrado de las superficies analizadas fue el acero base Fe esto debido a los carburos de Cr y Nb y a las durezas alcanzadas entre 64-68 HRC.



**Figura 5. 40.** Gráfica del comportamiento del coeficiente de fricción de los recubrimientos

En la Figura 5.41 se puede evaluar la gráfica de la tendencia del comportamiento del volumen perdido aplicando carga de 1, 5 y 10 N en donde al incremento de la carga aumenta el volumen perdido. El volumen perdido de las pruebas de desgaste del recubrimiento base Fe fue  $0.12\text{mm}^3$ , este comportamiento de la análisis de la prueba de desgaste es debido a la microestructura que presenta con la presencia de los carburos de Cr y Nb que están distribuidos uniformemente en el recubrimiento.



**Figura 5. 41.** Gráfica del volumen perdido de los coeficientes de fricción de los recubrimientos.

En la Figura 5.41 indica el comparativo de la rapidez de desgaste la cual indica que el aporte base Fe tiene un valor de  $0.03 \text{ (mm}^3\text{/N/m)}$ , lo cual comprueba que el aporte base Fe es el más recomendado para hacer la recuperación de componentes de acero D2.

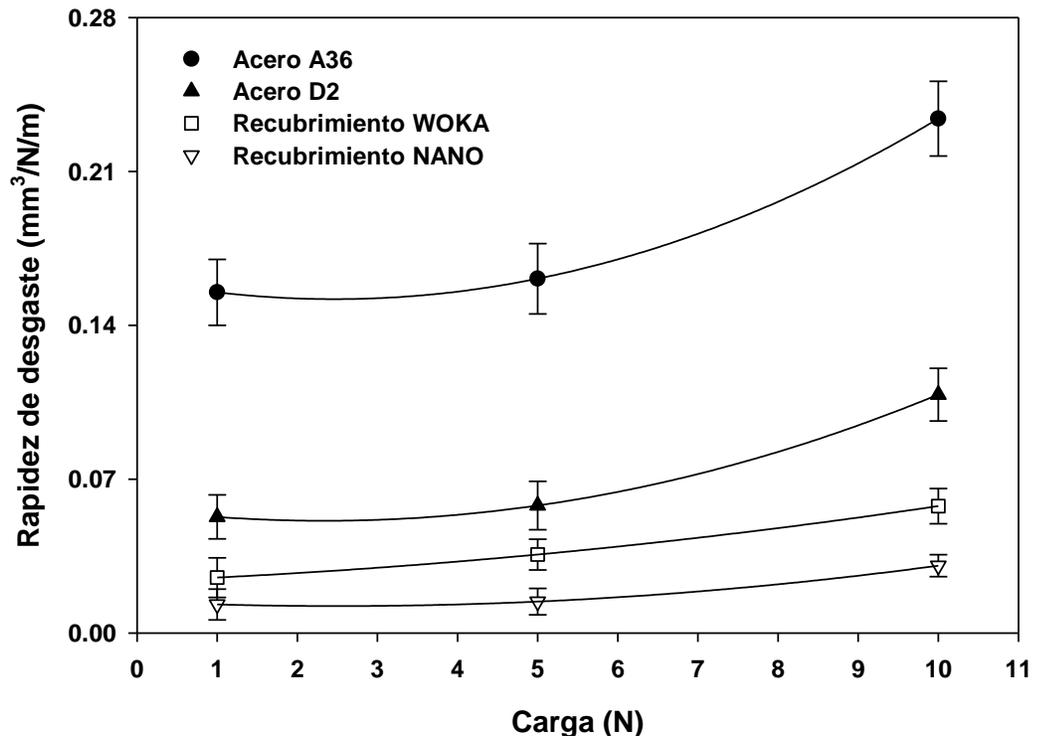


Figura 5. 42. Gráfica de rapidez del desgaste.

## 6. CONCLUSIONES

- Al realizar el análisis para obtener los mejores parámetros del proceso de la variable de dilución, se obtuvieron valores que determinan que el modelo tiene un rango aceptable de confiabilidad del proceso de recubrimientos realizado al acero grado herramienta D2 con aporte base Fe aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA.
- En la investigación realizada para el acero grado herramienta D2 con aporte nanoestructurado base Fe, se encontró un rango de dilución de 48.39-62.339%, estos debido al precalentamiento del substrato y al amperaje requerido para fundir las partículas de polvo.
- Planteando un resultado objetivo y aplicando el optimizador del programa estadístico generó como resultado una solución global con un valor de amperaje de 95.7137 A y una velocidad de avance de 1.01994 m/min, con una respuesta pronosticada del área de refuerzo de 62.0139 % con los cuales las características del cordón no debe presentar microfracturas.
- La evaluación del aporte por medio del MEB presentó una matriz de Fe con una distribución homogénea de carburos de Cr y Nb donde las partículas de Nb oscilan entre 250-1,100nm la cual hace que su superficie presente alta resistencia al desgaste debido a la distribución uniforme de los carburos.
- Mediante la evaluación de las pruebas mecánicas de dureza y desgaste Pin on disk se comprobó que el aporte que cuenta con las mejores características que cumplen con los requerimientos para realizar la recuperación de componentes para herramientas es el acero base Fe.

## 6.1 Bibliografía

- [1] K. Silva, N. Murugan y V. Raghupathy, «Modeling analysis and optimization of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing,» *International OCSCO World Press*, 2009.
- [2] E. Bourithis, A. Tazedakis y G. Papadimitrio, «Laboratory A study on the surface treatment of Calmax tool steel by a plasma transferred arc (PTA),» 2002.
- [3] S. Thompson, *Handbook of mould tool and die repair welding*, woodhead publishing ltd., 1999.
- [4] L. Yuan-Fu, C. De-Quiang, H. Jian-Min y X. Xiang-Yang, «Microestructura y propiedades de revestimiento compuesto por Cr<sub>3</sub>Si/γ-fe por plasma transferido arco,» 2009.
- [5] E. Hiromassa, D. Tequiroz y A. S. D. Oliveira, «Evaluación del efecto los parámetros del proceso PTA sobre recargue superficial.,» 2006.
- [6] C. Ramachandran y C. Muralidharan, «welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors.,» *Manuf Technol*, vol. 40, pp. 887-897, 2009.
- [7] T. Brett y B. Wolfe, «Homogeneity of Metal Matrix Composites Deposited by Plasma Transferred Arc Welding.,» *Spring*, 2010.
- [8] Stellite, «Deloro Stellite Brochur (DSB),» [En línea]. Available: 17608 (SR0608). [Último acceso: 2010].
- [9] J. Wilden, P. Bergman y H. Frank, «Plasma Transferred Arc Welding-Modeling and Experimental Optimization.,» *Journal of Thermal Spray Technology*, pp. 779-784, 2006.
- [10] R. Bini y M. Monno, «Effect of Cathode Nozzle Geometry and Process Parameters on the Energy Distribution for an Argon Transferred Arc Plasma Chem Plasma Process.,» pp. 359-380.

- [11] ISOTEC., «<http://www.isotec.at>,» [En línea]. [Último acceso: 5 Junio 2010].
- [12] A. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian y R. Varahamoorthy, «Predicting the Dilution of Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stellite on Carbon Steel Using Response Surface Methodology,» *METALS AND MATERIALS International.*, pp. 779-785, 2008.
- [13] A. Gualco, « Efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura y la resistencia al desgaste de recargues martensíticos depositados con alambres tubulares metal-cored.,» 2011, pp. 150-180.
- [14] A. Gatto, E. Bassoli y M. Fornari, «Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys, process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration Surface .,» pp. 265-271, 2004.
- [15] E. Gruzdys y M. S., «Influence of Plasma Transferred Arc Process Parameters on Structure and Mechanical Properties of Wear Resistant NiCrBSi-WC/Co Coatings ISSN 1392–1320 MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 17, No. 2.,» 2011.
- [16] E. Díaz y T. Ortiz, «Curso de Recuperación de Piezas. Universidad del Valle del Cauca. Cali. Colombia, pp. 18-26.
- [17] A. BOEHLER, «<http://www.acerosboehler.com.ar>,» [En línea]. [Último acceso: 20 octubre 2012].
- [18] Harvey y P. D., «Engineering Properties of steel.,» de *Engineering Properties of steel.*, 1982, pp. 432-453..
- [19] T. Rizzo, «Caracterización de metales de aporte base cobalto modificadas por la adición de carburo de tungsteno.,» 2005, pp. 34-64.
- [20] A. Balasubramanian, R. Lakshminarayanan y S. Varahamoorthy, «Application of Response Surface Methodology to Prediction of Dilution in Plasma Transferred Arc Hardfacing of Stainless Steel on Carbon Steel.,» *IRON AND STEEL RESEARCH*, 2009.

- [21] C. Katsich, A. Zikin y E. Badisch, «Wear protection of highly loaded components: advantages of plasma transferred arc welding as hardfacing technology,» *8th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING*, 2012.
- [22] C. M. Douglas, «Diseño y análisis de experimentos,» segunda edición universidad estatal de Arizona ed., limusa wiley, 2004.
- [23] S. Aithal, V. Subramaniam y V. Babu, «Comparisons Between Numerical Model and Experiments for a Direct Current Plasma Flow Plasma Chemistry and Plasma Processing.,» vol. 19, nº 4, 1999.
- [24] A. Dean y V. Daniel, «Design and Analysis of Experiments.,» Springer texts in statistics, 1999, pp. 420- 565.
- [25] K. FanRong1., Z. HaiOu1†. y W. GuiL, «Numerical simulation of the transient multiphase field during plasma deposition manufacturing composite materials Science in China Series G,» *Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009.
- [26] T. Jean y M. Wang, «Optimization of the cobalt-based hardfacing in carbon steel using the fuzzy analysis of the robust design.,» *Springer-Verlag London Limited.*, (2006).
- [27] S. Kou, «Welding Metallurgy,» segunda, Ed., John Wiley & Sons, Inc. NJ., (2003), pp. 13-19..
- [28] B. NIZNIK y M. B. PIETRZYK, «Model of phase transformation for niobium microalloyed steels.,» *Metallurgy and materials*, vol. 56, nº 3, 2011.
- [29] N. Rodríguez., «Efectos de los carburos en el desgaste de un acero D2,» Monterrey, Nuevo Leon , 1998, pp. 50-85.
- [30] F. Bassi y G. Lavorato, «Matriz amorfa metálica en una aleación Fe<sub>36</sub>Co<sub>36</sub>B<sub>14.4</sub>Si<sub>9.6</sub>Nb<sub>4</sub>- compuesto.,» F2er Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales – Posadas – Misiones., pp. 16-17, 2008..

- [31] X. Y. Jiao y L. S. Zhenyu, «Effects of Nano Precipitates in Austenite on Ferrite Transformation Start Temperature during Continuous Cooling in Nb–Ti Micro-alloyed Steels.,» *ISIJ International*,, 2007.
- [32] L. M. A. Béjar, «Propiedades mecánicas y micro estructuras de la unión soldada de un acero microaleado al niobio.,» CONAMET/SAM., 2006.

