

CORPORACION MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“Optimización de parámetros y análisis de resistencia al desgaste en recubrimientos base Ni sobre acero A36 mediante plasma transferido por arco (PTA)”

TESIS

Que para obtener el Grado Académico de

Maestro en Ciencia y Tecnología en Sistemas de Manufactura Avanzados

Presenta:

Carlos Javier Echavarría Figueroa

Saltillo, Coahuila Noviembre de 2016

“Optimización de parámetros y análisis de resistencia al desgaste en recubrimientos base Ni sobre acero A36 mediante plasma transferido por arco (PTA)”

Por
Carlos Javier Echavarría Figueroa

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

Maestría en Ciencia y Tecnología
Sistemas de Manufactura Avanzados

Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA / CONACyT

Saltillo, Coahuila Noviembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca y el apoyo otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

El proceso de plasma transferido por arco (PTA) es utilizado para realizar recubrimientos que se utilizan para mejorar las propiedades superficiales de algunas piezas y componentes mecánicos sometidos a desgaste abrasivo. En este trabajo se estudia el uso de materiales de aporte base Ni (N625 y 88PTA) como recubrimientos en sustratos de acero A36 mediante el proceso de plasma transferido por arco (PTA). Con el fin de determinar las condiciones adecuadas para garantizar la calidad del recubrimiento sobre el sustrato, se planteó un diseño de experimentos (DOE), donde la tasa de alimentación, el amperaje y la velocidad de soldadura se utilizan como parámetros de entrada, y el porcentaje de dilución como variable de respuesta. Para obtener los valores adecuados de los parámetros se utilizó una metodología de superficies de respuesta (MSR) restringida por una función objetivo de deseabilidad. Para la evaluación de las características metalúrgicas en los recubrimientos obtenidos se realizó una caracterización microestructural mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB) y para evaluar las propiedades mecánicas se llevaron a cabo las pruebas de dureza correspondientes. Además, mediante el uso de la técnica pin on disk se evaluó la resistencia al desgaste que presentan los recubrimientos aplicados, donde se puede observar que los recubrimientos con mayor resistencia son aquellos que se obtuvieron de la optimización utilizando los puntos centrales. Se obtiene como resultado un grado de dilución adecuado acorde a cada material de aporte, alta dureza y mayor resistencia al desgaste producto de una combinación de parámetros dada por: un bajo amperaje, baja tasa de alimentación y alta velocidad de recubrimiento.

Palabras clave: PTA, DOE, MSR, Optimización, Recubrimiento, Pin on disk

Contenido

Capítulo 1	1
Introducción.....	1
Capítulo 2	2
Antecedentes	2
Capítulo 3	3
Planteamiento del Problema	3
3.1 Descripción del problema.....	3
3.2 Preguntas de investigación.....	3
3.3 Hipótesis	4
3.4. Objetivos	4
3.4.1 Objetivo general	4
3.4.2 Objetivos específicos.....	4
3.5 Justificación.....	5
3.6 Alcance y delimitaciones	5
Capítulo 4	6
Marco Teórico.....	6
4.1 Plasma transferido por arco (PTA)	6
4.1.2 Principio de funcionamiento del PTA.....	7
4.1.3 Aplicaciones del proceso PTA.....	8
4.1.4 Ventajas del PTA sobre los procesos de soldadura tradicionales	9
4.2 Recubrimientos por plasma transferido por arco.....	10
4.3 Clasificación de los aceros.....	10
4.3.1 Acero ASTM A36.....	12
4.4 Material de aporte para PTA.....	12
4.4.1 Aleación de Níquel N-625.....	13
4.4.2 Aleación de Níquel 88-PTA	14
4.5 Parámetros de soldadura en el proceso PTA	14
4.6 Dilución.....	17

4.6.1 Variables de soldadura que afectan la dilución	17
4.7 Diseño Factorial 2k	21
4.8 Parámetros significativos en el proceso	22
4.9 Metodología de superficies de respuesta	22
4.9.1 Función de deseabilidad	23
4.10 Prueba de desgaste (Pin on Disk)	26
Capítulo 5	29
Estado del Arte	29
5.1 Diferencias entre el proceso PAW Y PTA	29
5.2 Diseños factoriales utilizados para control de parámetros	31
5.3 Obtención de parámetros para aplicación de recubrimientos en el proceso PTA35	
5.4 Factores que determinan la resistencia al desgaste.....	35
5.4 Caracterización de recubrimientos aplicados por PTA.....	37
Capítulo 6	41
Metodología	41
Capítulo 7	43
Experimentación y Resultados.....	43
Capítulo 8	63
Conclusiones.....	63
9. Referencias.....	65

Índice de Figuras

Figura 4.1 Proceso por PTA y PAW	7
Figura 4.2 Aplicaciones del proceso por PTA.....	8
Figura 4.3 Comparación entre los procesos de soldadura convencionales y el proceso PTA	9
Figura 4.4 Esquema de dilución de un cordón de soldadura	17
Figura 4.5. Modos básicos de oscilación y configuración de cordones.....	19
Figura 4.6. Efecto de la velocidad de soldadura sobre la dilución	19
Figura 4.7 Soldadura ascendente y descendente sobre placas y partes cilíndricas.....	20
Figura 4.8 Grafica de la función de deseabilidad para maximización	24
Figura 4.9 Grafica de la función de deseabilidad para un valor objetivo	25
Figura 4.10 Esquema de la prueba de desgaste Pin on Disk.....	26
Figura 5.1 Configuración de soldadura en a) Fusión incompleta, b) Ausencia de penetración, c) Buena soldadura, d) Exceso de penetración	30
Figura 5.2 Comparación del proceso de plasma transferido por arco PTA y PAW.....	30
Figura 5.3. Aspecto superficial de Stellite 6 depositado por: a) PAW, b) PTA	31
Figura 5.4. Modelo 3-D desarrollado mediante el método de regresión factorial completo	31
Figura 5.5 Gráfica de contorno de efecto de la temperatura sobre el recubrimiento	32
Figura 5.6 Efecto de la tasa de alimentación sobre la geometría del cordón.....	33
Figura 5.7 Efecto de las variables del proceso sobre la penetración	34
Figura 5.8 Imagen SEM del carburo de Tungsteno utilizado en el recubrimiento a 180A, b) Zona amplificada	36
Figura 5.9 Coeficiente de desgaste con barras de error y desviación estándar	37
Figura 5.10 Geometría del cordón de soldadura para diferente metal base y amperaje	38
Figura 5.11 Zona afectada por el calor y metal base (SEM) a) ZAC, b) Metal base.....	38
Figura 5.12 Huellas de desgaste a) 140A, b) 160A, c) 180A, d) 200 A.....	39
Figura 5.13) Fractografía del recubrimiento por PTA desde el exterior de la superficie hasta el interior del metal base.....	40
Figura 6.1 a) Diagrama que muestra la metodología de investigación	41
Figura 7.1 a) Micrografía acero A36 (MEB), b) Micrografía acero A36 (MO)	44
Figura 7.2 Evaluación de la dilución por estereoscopia, a) P1 b) P2 c) P3 d) P6 e) P7	45
Figura 7.3 Microestructura de la pieza 6 usando microscopía Óptica, a) Zona de interfase sin ataque, b) Zona entre interfase-zona afectada por el calor- metal base y c) Zona de interfase .	46
Figura 7.4 a) Perfiles de dureza de los mejores recubrimientos utilizando metal base Ni en acero A36, b) Microestructura que ilustra las zonas de indentación realizadas en las muestras	47

Figura 7.5 a) Gráfica de los efectos principales para la dilución b) Efecto del amperaje sobre la dilución c) Efecto de la velocidad de soldadura sobre la dilución	48
Figura 7.6 Gráfica de optimización 1° Modelo N625	50
Figura 7.7 Gráfica de optimización 2° Modelo N625	52
Figura 7.8 Gráfica coeficiente de fricción N625	53
Figura 7.9 Gráfica tasa de desgaste N625	54
Figura 7.10 Evaluación de la dilución por estereoscopia, a) P3 b) P6 c) P7 d) P11	56
Figura 7.11 a) Perfiles de dureza de los mejores recubrimientos utilizando metal de aporte 88PTA, b) Micrografía del recubrimiento 88 PTA	57
Figura 7.12 Gráfica de optimización 88PTA (1)	59
Figura 7.13 Gráfica de optimización 88PTA (2)	60
Figura 7.14 Gráfica coeficiente de fricción 88PTA	61
Figura 7.15 Gráfica tasa de desgaste 88PTA	61
Figura 7.16 Huella de desgaste a) Modelo 1, b) Modelo 2	62

Índice de Tablas

Tabla 4.1 Composición química N-625 (%)	13
Tabla 4.2 Composición química 88PTA (%).....	14
Tabla 4.3 Parámetros del proceso de plasma transferido por arco (PTA)	16
Tabla 5.1 Límites y niveles de los parámetros de soldadura.....	35
Tabla 7.1 Parámetros del proceso por PTA.....	43
Tabla 7.2 Parámetros constantes del proceso por PTA	43
Tabla 7.3 Matriz de parámetros del DOE N625.....	44
Tabla 7.4 Análisis de la varianza	49
Tabla 7.5 Resumen del 1º Modelo N625	49
Tabla 7.6 Análisis de la varianza	51
Tabla 7.7 Resumen del 2º Modelo N625	51
Tabla 7.8 Comparación de modelos respecto a la predicción.....	52
Tabla 7.9 Resultados de la prueba de desgaste	53
Tabla 7.10 Microestructuras obtenidas durante la experimentación 88PTA	55
Tabla 7.11 Matriz de parámetros del DOE 88PTA	56
Tabla 7.12 Análisis de la varianza	58
Tabla 7.13 Resumen del modelo 88PTA	58
Tabla 7.14 Resultado de optimización 1	59
Tabla 7.15 Resultado de optimización 2.....	60
Tabla 7.16 Resultados de la prueba de desgaste 88PTA	60

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, se utilizan los procesos de recuperación por soldadura para realizar recubrimientos en componentes de acero al carbono, la industria tiene la necesidad de implementar procesos alternativos para recuperación de componentes con la finalidad de obtener mayores beneficios. [1]

El proceso de soldadura que se propone como alternativa de recuperación de componentes es el proceso de plasma transferido por arco (PTA). El proceso consiste principalmente en realizar un aporte en forma de polvo al sustrato.

En el proceso de soldadura por PTA se obtiene un valor de dilución determinado, 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.

Para obtener el más bajo porcentaje de dilución permitido se busca en el presente trabajo realizar una optimización de parámetros (velocidad de soldadura, temperatura, material de aporte, entre algunas) en el proceso de plasma transferido por arco, se opta por utilizar una herramienta de optimización y delimitar los valores adecuados para los parámetros de soldadura por plasma transferido por arco.

Además, se utilizará un material de aporte base Níquel N625 y 88PTA para obtener un mejor porcentaje de dilución, el material de aporte presenta excelentes propiedades mecánicas y genera protección al desgaste por abrasión.

Por medio de una metodología se especificara lo necesario para realizar un recubrimiento por medio del proceso de soldadura de plasma transferido por arco.

Capítulo 2

Antecedentes

Anteriormente, los procesos de soldadura convencionales eran utilizados con la finalidad de realizar la recuperación de componentes mecánicos para diferentes industrias, se realizaban los procesos de soldadura con el propósito de obtener recubrimientos para los componentes y así aumentar la vida útil de los mismos.[2] Los recubrimientos son aplicados mediante diferentes procesos de soldadura, existen diferentes investigaciones con el fin de obtener procesos cada vez más avanzados que generen menor costo, altas velocidades de producción y lo más importante que los procesos manejen alto grado de calidad. [3]

La empresa Innovación Tecnológica en Soldadura y Superficies, S.A de C.V (SOLDATECH) tiene la necesidad de crear recubrimientos de Ni (N625 y 88PTA) sobre acero A36 con la finalidad de que este último obtenga la mayor resistencia al desgaste posible brindada por cada material de aporte, además de tomar en cuenta tener buena calidad en la unión del recubrimiento y metal base.

Puesto a que se realizan diferentes investigaciones, pero estas con resultados muy específicos (los resultados varían según cada material base y su respectivo material de aporte) no se tiene conocimiento exacto de la variabilidad de los parámetros en el proceso para cada material, el proceso de soldadura de plasma transferido por arco se caracteriza por tener entre sus principales parámetros de entrada el material de aporte, el amperaje, la velocidad de avance, distancia tobera-pieza y si existe una oscilación en el electrodo, se toma en cuenta la velocidad del mismo.

La principal propiedad que se cuida es la dilución, esto para obtener una adecuada penetración entre material de aporte y material base.

Capítulo 3

Planteamiento del Problema

3.1 Descripción del problema

Las instalaciones y componentes mecánicos utilizados en diferentes industrias están expuestos a deterioro por desgaste abrasivo generando un constante mantenimiento y gastos excesivos, [1] se opta por utilizar probetas de acero A36 con recubrimiento base níquel para obtener los valores adecuados para los parámetros del proceso y generar un aumento en la vida útil del material, además de una posible solución al constante mantenimiento.

Se busca que con un material de aporte base Níquel N-625 y 88PTA se proteja el material base, aumente las propiedades del mismo, se genere resistencia al desgaste por abrasión y se reduzca el porcentaje de dilución. El problema planteado en esta investigación es que se requiere de una metodología adecuada para encontrar los rangos adecuados de los parámetros del proceso de soldadura por transferencia de arco utilizados para realizar recubrimientos en probetas de acero A36. Por medio de la metodología se obtendrán los parámetros adecuados para el proceso de plasma transferido por arco para obtener un bajo porcentaje de dilución y beneficiar así las propiedades de los materiales.

3.2 Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los parámetros de mayor influencia en el proceso PTA aplicado en la recuperación de componentes de acero al carbono con metal de aporte base Níquel N-625 y 88PTA?
- ¿Cuál es el efecto que tiene el grado de dilución en el proceso de soldadura por PTA?

- ¿Será posible encontrar los valores correctos para el proceso de PTA en la aplicación de recubrimientos mediante una MSR y una optimización aplicando una función de deseabilidad (objetivo)?
- ¿Cuál es el efecto que tienen los valores de los parámetros en el proceso de PTA respecto al grado de dilución obtenido?
- ¿Cómo se comporta la resistencia al desgaste aplicado el recubrimiento de N625 y 88PTA?

3.3 Hipótesis

Mediante el proceso de plasma transferido por arco se puede obtener un recubrimiento base Níquel N625 y 88PTA para un acero A36 capaz de aumentar la resistencia al desgaste por abrasión.

Por medio de una herramienta de optimización para el control de parámetros (amperaje, velocidad de soldadura y tasa de alimentación) en el proceso de PTA se puede generar una disminución en el porcentaje de dilución.

3.4. Objetivos

3.4.1 Objetivo general

Determinar el efecto de los parámetros del proceso PTA utilizando un metal de aporte base níquel sobre el porcentaje de dilución, características microestructurales y aumentar la resistencia al desgaste en componentes de acero al carbono A36, además de la optimización de estos parámetros.

3.4.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte para identificar los parámetros con mayor impacto en el proceso de soldadura PTA utilizados en la aplicación de recubrimientos N-625 y 88PTA para componentes de acero al carbono A36.
- Utilizar un material de aporte base Níquel N-625 y 88PTA en el proceso de soldadura por PTA aplicado para realizar recubrimientos en componentes de acero al carbono A36.

- Realizar un diseño de experimentos para delimitar la región de operatividad de los parámetros del proceso por PTA.
- Utilizar una metodología de superficies de respuesta restringida por una función de deseabilidad (objetivo) para optimizar los parámetros.
- Analizar el impacto que tienen los valores de los parámetros del proceso PTA por medio de caracterización microestructural con microscopía óptica y electrónica de barrido en la disminución del porcentaje de dilución.
- Comparar el efecto que tiene un recubrimiento de aleación N625 y 88PTA respecto a la resistencia al desgaste obtenida.

3.5 Justificación

Se busca disminuir el porcentaje de dilución en el proceso de soldadura por PTA con el objetivo de crear recubrimientos base Níquel N-625 y 88PTA en acero al carbono A36. Al aumentar la resistencia al desgaste se crea una posible alternativa para mantenimiento de componentes mecánicos, se prolonga la vida útil del mismo, se generan mejores propiedades mecánicas, y además, como se desconocen los valores adecuados de los parámetros del proceso, se genera información específica para el proceso.

3.6 Alcance y delimitaciones

- Realizar un recubrimiento superficial utilizando un material de aporte N625 y 88PTA como recubrimiento para un acero al carbono A36, utilizar un diseño de experimentos para análisis de variabilidad y hacer uso de una MSR restringida por una función de deseabilidad para optimización de parámetros hasta obtener la mayor resistencia al desgaste posible.
- Evaluar la resistencia al desgaste (Pin on disk) y reducir el porcentaje de dilución (Microscopía).
- Comparar los recubrimientos con aleación 88 PTA y N-625 sobre un acero A36 respecto a la resistencia al desgaste.

Capítulo 4

Marco Teórico

4.1 Plasma transferido por arco (PTA)

Es un proceso de tratamiento superficial en el cual se funde un polvo metálico en un arco de plasma, soldándose sobre la superficie de la pieza trabajada. El depósito así formado es denso y resistente a la corrosión y el desgaste. Además, los recubrimientos se aplican con precisión, sobre una amplia gama de materiales de base, con prácticamente cualquier configuración geométrica. [3]

La dilución, o sea, el grado de mezcla entre el material de base y el material aportado, puede controlarse con precisión y se lo puede mantener normalmente por debajo del 5%.

El espesor del depósito en apenas una pasada puede controlarse perfectamente entre 0.2mm y 5mm, siendo posible también aplicar múltiples pasadas. El espesor del revestimiento puede controlarse con absoluta precisión y el proceso puede automatizarse fácilmente.

El calor del arco de plasma provoca la fusión del material de revestimiento que es aportado a través de un sistema de alimentación perfectamente controlado, como también la fusión de la superficie de la pieza objeto del revestimiento. [4]

Algunos procesos convencionales como TIG, SMAW, MIG, SAW son utilizados para aplicar recubrimientos y en unión de componentes, aunque su principal diferencia es el material de aporte que utilizan, que va desde micro alambre hasta electrodos consumibles con revestimiento. El proceso por PTA es más fácil de manejar, existe mayor control de parámetros y en cuestión de recubrimientos, por el material de aporte en polvo que puede variar de tamaño, permite mayor homogeneidad y velocidad de trabajo.

4.1.2 Principio de funcionamiento del PTA

La soldadura por arco de plasma es un arco proceso. El arco constreñido con la ayuda de una boquilla de pequeño diámetro es refrigerado por agua, esta aprieta el arco, aumenta su presión y la temperatura mejorando la estabilidad del arco, la forma del arco y las características de transferencia de calor. [4,14]

Proceso de arco transferido. El arco se forma entre el electrodo de trabajo y la pieza. Posee alta densidad de energía y el chorro de plasma es más veloz. Se emplea para cortar y fundir metales ferrosos y no ferrosos, así como aceros al carbono. Se alcanzan temperaturas del orden de 8000 – 25000 °C.

Componentes principales del sistema [4]

- 1- Fuente de potencia con control electrónico del arco piloto y arco transferido; generador de alta frecuencia para establecer el arco piloto; control de secuencia de los flujos de los gases de arrastre y de protección; sistema de enfriamiento en circuito cerrado con intercambiador de calor.
- 2- Consola para control de alimentación del polvo de aporte, de secuencia se encendido y apagado y de flujo de gas de transporte.
- 3- Torcha plasma PTA refrigerada.
- 4- Alimentador de polvo de tolva presurizada y cámara de dosificación.
- 5- Opcional: Oscilador electrónico.

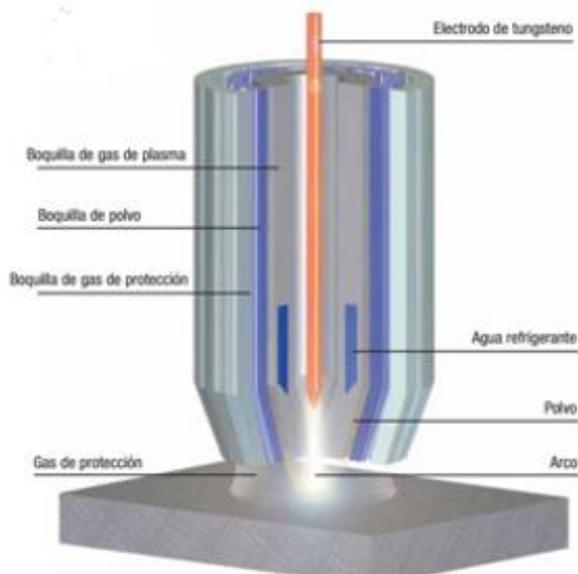


Figura 4.1 Proceso por PTA [4]

4.1.3 Aplicaciones del proceso PTA

Con el proceso de PTA se consigue soldar aceros de baja soldabilidad dado a la elevada penetración que se consigue durante el proceso. [1-4]

Una aplicación muy común consiste en realizar recubrimientos a base de cromo, níquel y cobalto con la finalidad de recuperar componentes mecánicos sometidos a altos índices de desgaste. En estos casos el metal de aporte es introducido en forma de polvo por un gas de transporte. En esta aplicación se utiliza como gas protector argón con un pequeño contenido de hidrogeno, para mejorar la penetración y reducir la posibilidad de formación de óxidos. [1-4]

El mismo principio se utiliza para realizar el corte con chorro de plasma.



Figura 4.2 Aplicaciones del proceso por PTA [27]

Las principales aplicaciones además de las anteriormente mencionadas son:

- Instrumentación y control.
- Relleno en matrices, moldes, herramientas, etc.
- Industria nuclear.
- Industria aeroespacial.

4.1.4 Ventajas del PTA sobre los procesos de soldadura tradicionales

Entre las principales ventajas que presenta el proceso de PTA respecto a los procesos de soldadura tradicionales (Figura 4.3) y en listado se encuentran las siguientes: [2-4]

- El PTA es fácil de automatizar, generando un alto grado de reproducibilidad.
- Permite una dosificación precisa de materia prima en forma de polvo.
- Utiliza menor cantidad de material comparado con otros procesos de soldadura tradicionales.
- Produce depósitos de una aleación dada con mayor dureza y resistencia a la corrosión.
- Los depósitos de soldadura se caracterizan por sus bajos niveles de inclusiones, óxidos y discontinuidades.

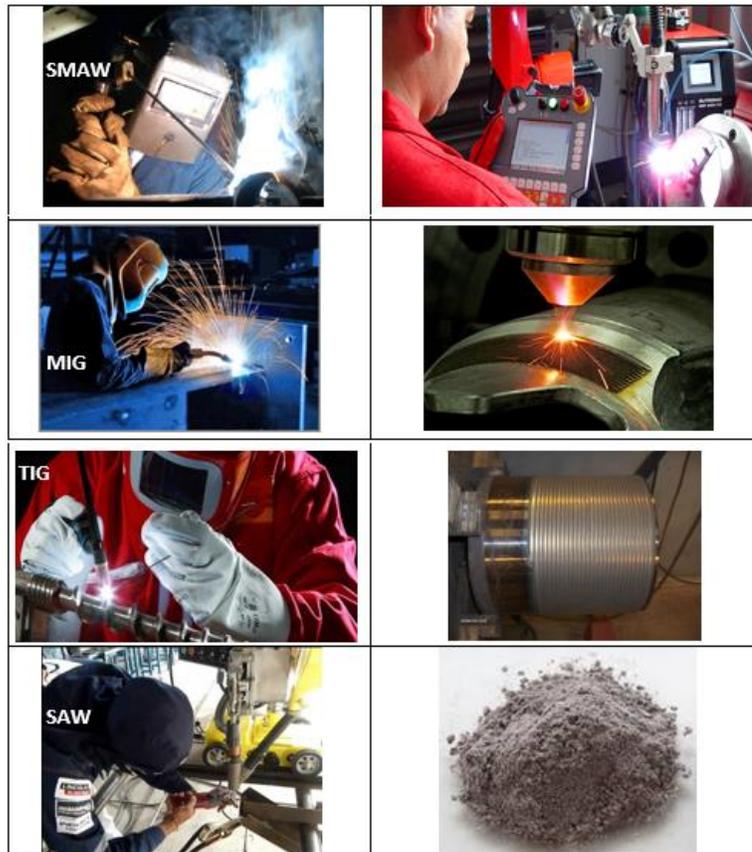


Figura 4.3 Comparación entre los procesos de soldadura convencionales y el proceso PTA

4.2 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. [8]

Se entiende por recubrimientos duros aquellas películas delgadas con las que se recubren superficies de muchas piezas de uso técnico, con la finalidad de proporcionarles mayor dureza y mayor resistencia al desgaste. También los recubrimientos pueden aportar otras propiedades de gran importancia para aplicaciones específicas como pueden ser; disminuir el coeficiente de fricción, aumentar la resistencia a la corrosión, introducir propiedades ópticas especiales en la superficie o también producir colores o texturas con fines decorativos.

En nuestros días los recubrimientos más modernos son los llamados recubrimientos de capa fina; capas delgadas de uno o más materiales con espesores pequeños, que van desde algunos nanómetros hasta algunas micras, y de alta calidad tanto en su composición como en su estructura. Su desarrollo y uso fue retardada debido a las tecnologías avanzadas involucradas, tales como; tecnología de alta corriente y voltaje, tecnología de control de proceso y electrónicas relacionadas, física y química de plasma y tecnología de vacío. [2-4]

4.3 Clasificación de los aceros

Aceros de muy bajo % de carbono (.05 a .15 %)

Se seleccionan en piezas cuyo requisito primario es el conformado en frío. Los aceros no calmados se utilizan para embutidos profundos por sus buenas cualidades de deformación y terminación superficial. Los calmados son más utilizados cuando se necesita forjarlos o llevan tratamientos térmicos. Son adecuados para soldadura y para brazing. Su maquinabilidad se mejora mediante el estirado en frío. Son susceptibles al crecimiento del grano, y a fragilidad y rugosidad superficial si después del formado en frío se los calienta por encima de 600°C. [5]

Aceros de bajo % de carbono (.16 a .30 %)

Este grupo tiene mayor resistencia y dureza, disminuyendo su deformabilidad. Son los comúnmente llamados aceros de cementación. Los calmados se utilizan para forjas. Su respuesta al temple depende del % de C y Mn; los de mayor

contenido tienen mayor respuesta de núcleo. Los de más alto % de Mn, se endurecen más convenientemente en el núcleo y en la capa. Son aptos para soldadura y brazing. La maquinabilidad de estos aceros mejora con el forjado o normalizado, y disminuye con el recocido.

Aceros de medio % de carbono (.35 a .53 %)

Estos aceros son seleccionados en usos donde se necesitan propiedades mecánicas más elevadas y frecuentemente llevan tratamiento térmico de endurecimiento. Se utilizan en amplia variedad de piezas sometidas a cargas dinámicas. El contenido de C y Mn, depende de una serie de factores. Por ejemplo, cuando se desea incrementar las propiedades mecánicas, la sección o la templabilidad, normalmente se incrementa el % de C, de Mn o de ambos. Los de menor % de carbono se utilizan para piezas deformadas en frío, aunque los estampados se encuentran limitados a plaqueados o doblados suaves, y generalmente llevan un recocido o normalizado previo. Todos estos aceros se pueden aplicar para fabricar piezas forjadas y su selección depende del tamaño y propiedades mecánicas después del tratamiento térmico. Los de mayor % de C, deben ser normalizados después de forjados para mejorar su maquinabilidad. Son también ampliamente usados para piezas maquinadas, partiendo de barras laminadas. Dependiendo del nivel de propiedades necesarias, pueden ser o no tratadas térmicamente. 2 Pueden soldarse pero deben tenerse precauciones especiales para evitar fisuras debido al rápido calentamiento y enfriamiento.

Aceros de alto % de carbono (.55 a .95 %)

Se usan en aplicaciones en las que es necesario incrementar la resistencia al desgaste y altas durezas que no pueden lograrse con aceros de menor contenido de C. En general no se utilizan trabajados en frío, salvo plaqueados o el enrollado de resortes. Prácticamente todas las piezas son tratadas térmicamente antes de usar, debiéndose tener especial cuidado en estos procesos para evitar distorsiones y fisuras. [5]

4.3.1 Acero ASTM A36

El acero suave es el tipo más común de acero utilizado en la construcción, la manufactura y muchas otras industrias. De los aceros al carbono, el acero ASTM A36 es una de las variedades más comunes en parte debido a su bajo costo. Ofrece una excelente resistencia y fuerza para un acero bajo en carbono y aleación. Aunque es propenso al óxido.

Como todos los aceros, el A36 se compone predominantemente de hierro (98 a 99 por ciento). Sin embargo, a diferencia de la mayoría de los aceros, tiene muy pocos elementos añadidos a él. Contiene 0.18 por ciento de carbono, 0.2 por ciento de cobre y entre 0.8 y 0.9 por ciento de manganeso para aumentar la fuerza y la resistencia. Tiene fósforo (0.04 por ciento máximo) e impurezas de azufre (0.05 por ciento máximo) que pueden hacer el acero frágil si se añade en cantidades demasiado grandes.

4.4 Material de aporte para 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. 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. 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.

A continuación, se mencionan algunos materiales de aporte y su función:

- Aleaciones 600, 601, 800, 800HT, 330
Combinaciones diferentes de aceros y aleaciones de níquel.
- Aleaciones 625, 601, 686, 622, C-276
Combinaciones diferentes de aceros y aleaciones a base de níquel.
Revestimiento de los aceros.

- Aleaciones 617, 800HT
Combinaciones diferentes de aleaciones de alta temperatura.
- Aleación 276
Revestimiento de los aceros.
Combinaciones diferentes de aceros y aleaciones a base de níquel.
- Aleaciones 800 y 800HT, 600 y 601
Unirse a combinaciones diferentes de aleaciones de carbono, inoxidable y de níquel-base.

4.4.1 Aleación de Níquel N-625

La aleación NiCr22Mo9Nb (Inconel 625), es resultado de los altos contenidos de Cromo, cobalto y molibdeno, esta aleación se caracteriza por una excelente resistencia a la corrosión en corrosivos hidratados y gaseosos (hasta, aproximadamente 1100°). Ver tabla 4.2

Las aleaciones de Ni-Cr-Mo se caracterizan por una resistencia a la corrosión igual a la de aleaciones de Ni-Cr en agentes de oxidación combinados con aleaciones de Ni-Mo en agentes reductores. Al aumentar el contenido de Cr, se incrementa la resistencia de la aleación níquel-hierro-molibdeno C-22 a los agentes de oxidación por ácidos. Al mismo tiempo, se aumenta, también, la resistencia a la picadura, fisuras y corrosión uniforme en los ácidos que no son de oxidación.

Tabla 4.1 Composición química N-625 (% e.p.)

Cr	C	Mo	Nb	Fe	Ni
21	0.05	9.2	3.5	3	Balance

4.4.2 Aleación de Níquel 88-PTA

Colmonoy 88 es una aleación única que contiene múltiples fases finas, duras que se distribuyen uniformemente a través de una matriz de Ni-Cr-B. Estas fases forman compuestos bi- y tri- metálicos complejos en forma de boruros y carburos, se precipitan durante la aplicación, y por lo tanto son una parte inherente de la microestructura. Las fases duras, junto con la alta dureza de la matriz de Ni-Cr-B, resisten la abrasión extrema y la corrosión. [6] Ver tabla 4.3

Tabla 4.2 Composición química 88PTA (%e.p.)

B	C	Cr	Fe	Si	W	Ni
3	0.80	15	3.5	4	17.3	Balance

4.5 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.
- Dilución.
- La corriente del arco de transferencia.
- La cantidad y velocidad de alimentación del polvo.
- El precalentamiento y post-calentamiento a la pieza de trabajo.

Además, existen otros parámetros que aunque parecen no tener efecto, pero su control mejora considerablemente las condiciones para aplicación del cordón de soldadura. [12,13]

- 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.

- 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.

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.

Los tipos de boquillas y el distancia tobera-pieza son importantes en el proceso de plasma transferido por arco PTA por lo que se debe hacer una adecuada selección, cuando se trabaja con un amperaje alto se debe de incrementar la distancia y tipo de la boquilla para poder obtener un rendimiento óptimo del equipo y una buena calidad de soldadura.

A continuación en la tabla 4.4 se enlistan a manera de resumen, las características de los parámetros del PTA.

Tabla 4.3 Parámetros del Proceso de Plasma Transferido por Arco (PTA)

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

4.6 Dilución

La figura 4.3 ilustra un esquema de dilución. La ecuación en la figura muestra los porcentajes de dilución como una función de la cantidad de metal base fundido (B) y el metal depositado (A).

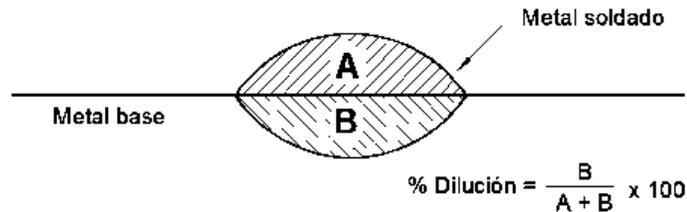


Figura 4.4 Esquema de Dilución de un Cordón de Soldadura [32]

Donde la dilución es el área de penetración entre el área de penetración más el área de refuerzo por cien.

Desde un punto de vista metalúrgico, la composición y las propiedades del recargue son fuertemente influidas por la dilución resultante. Debido a esta influencia, la cantidad de dilución que será obtenida con cada proceso de soldadura deberá ser considerada seleccionando apropiadamente la combinación del material de recargue y el proceso de soldadura para cada aplicación particular. [32]

4.6.1 Variables de soldadura que afectan la dilución

Gran cantidad de recargue se realiza con los procesos de soldadura por arco eléctrico. Debido a la importancia de la dilución, es necesario conocer el efecto de cada variable. Las mismas son:

Amperaje:

Incrementando el amperaje (densidad de corriente) aumenta la dilución. El arco es más caliente y rígido, la penetración es más profunda y mayor es la fusión del metal base.

Polaridad:

Con corriente directa con polo negativo al electrodo (DCEN) da menos penetración y, por lo tanto, menor dilución que con el electrodo al polo positivo (DCEP). Alternando las corrientes da diluciones intermedias a ambas. [7]

Diámetro del electrodo:

Diámetros pequeños de electrodo significan menores amperajes y por lo tanto menor dilución. En soldadura por arco bajo protección gaseosa, para un dado amperaje, diámetros grandes de electrodo (y bajas densidades de corriente) dan diluciones más bajas si el mayor diámetro resulta en transferencia globular; mientras que los diámetros más pequeños resultan en transferencia de rocío. Con otros procesos de soldadura el resultado puede variar.

Extensión del electrodo:

Un electrodo largo disminuye la dilución (para procesos con electrodo consumible) por incremento en la velocidad de fusión del electrodo ($\text{calor} = I^2R$) y la difusión de la energía del arco mientras ésta afecte sobre el metal base. A la inversa, un electrodo corto incrementa la dilución, dentro de ciertos límites.

Paso o separación de cordones:

Una ajustada separación entre cordones (mayor superposición) reduce la dilución debido a que mayor cantidad de cordones previos y menor material base se refunden e incorporan a la pileta líquida. Una amplia separación de cordones (menor sobreposición) incrementa la dilución.

Oscilación del electrodo:

Cuando se oscila el electrodo, se obtienen cordones anchos y menor penetración, por lo que es menor la dilución: los cordones finos, estirados, producen máxima dilución. La frecuencia de oscilación también afecta la dilución: como regla, a mayor frecuencia de oscilación menor dilución. Hay tres parámetros básicos de oscilación, como se indican en la figura 4.4.

La oscilación pendular se caracteriza por una oscilación sigilosa a ambos lados de los cordones en donde se produce mayor penetración y por lo tanto mayor dilución. La longitud del arco cambia continuamente con la oscilación pendular, resultando en variaciones en las características del arco.

La oscilación en línea recta da aproximadamente igual resultado que con oscilación pendular pero logra mantener constantes las características del arco. La oscilación en línea recta y con velocidad constante produce la dilución más baja y hace que la longitud del arco se mantenga constante, para movimientos horizontales [7].

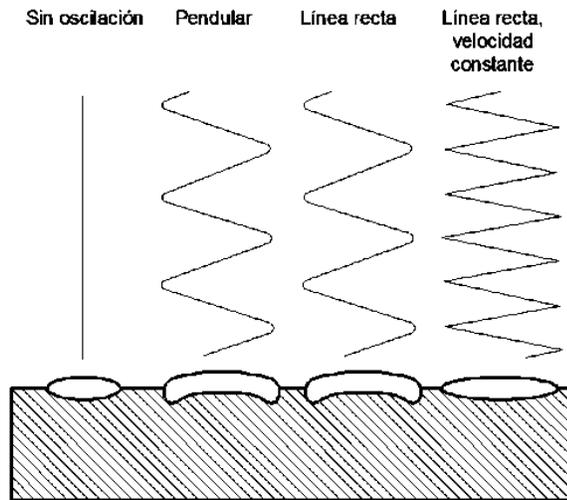


Figura 4.5 Modos básicos de oscilación y configuración de cordones [7]

Velocidad de avance:

Un decaimiento en la velocidad de avance disminuye la cantidad de metal fundido por unidad de tiempo y/o distancia e incrementa la cantidad de recargue agregado: esto reduce la dilución. Esta reducción se genera por el cambio de forma del cordón y el espesor y por el hecho de que la fuerza del arco es ejercida sobre la pileta líquida más que sobre el metal base. En la figura 4.5 se muestran estos efectos.

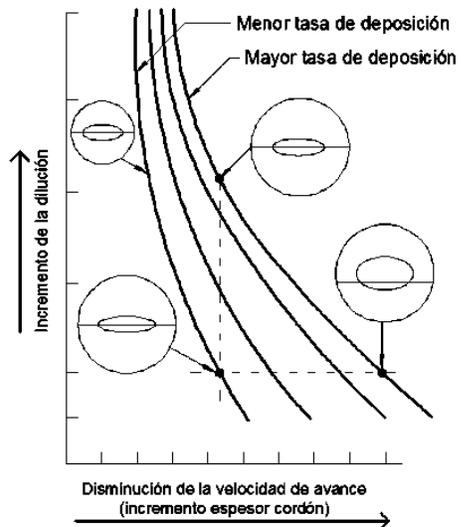


Figura 4.6 Efecto de la velocidad de soldadura sobre la dilución [7]

Posición de soldadura e inclinación de la pieza de trabajo:

La posición de soldadura sobre la cual se aplica el recargue es aplicado tiene una importante influencia sobre la dilución. Dependiendo de la posición o la inclinación de la pieza de trabajo la gravedad puede hacer que la pileta vaya delante de, se mantenga debajo o detrás del arco.

La mayoría de las piletas permanecen adelante o debajo del arco, por lo tanto la penetración en el metal base es menor y menor es entonces la dilución; así, la pileta líquida actúa como un recipiente, absorbiendo algo de la energía del arco antes de que incida sobre el metal base.

Esta absorción de la energía del arco aplana y extiende la pileta líquida y, por lo tanto, el cordón soldado. Si la pileta líquida está muy por delante del arco o es muy gruesa, habrá insuficiente fusión de la superficie del metal base y el depósito no tendrá lugar [7].

En los casos típicos, el orden de decrecimiento de la dilución para cada posición de trabajo es la siguiente:

1. Vertical ascendente (mayor dilución).
2. Horizontal.
3. Plana con inclinación (subiendo y bajando).
4. Plana sin inclinación.
5. Plana con inclinación (bajando).

La mayoría de las aplicaciones de recargue se realizan en posición plana. Para lograr la menor dilución en soldaduras ascendente o descendente de placas y partes cilíndricas la misma debe realizarse de acuerdo con la figura 4.6

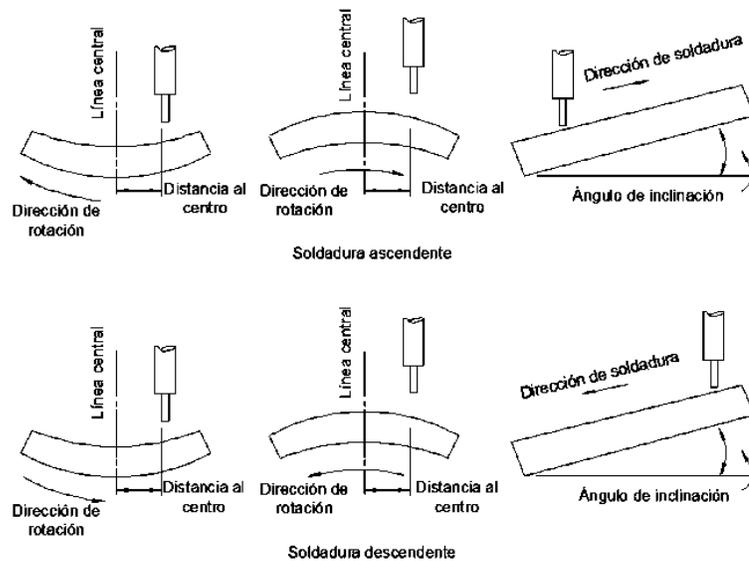


Figura 4.7 Soldadura ascendente y descendente sobre placas y partes cilíndricas [7]

Protección del arco:

El medio de protección, gas o fundente, tiene un significativo efecto sobre la dilución. Esta influencia se debe a la fluidez y tensión superficial de la piletta líquida, que a su vez, determinan la medida en que el metal de soldadura moja el metal base y se mezcla a lo largo de los bordes del cordón. El medio de protección también tiene un significativo efecto sobre el tipo de corriente de soldadura a usar. La lista debajo ordena de manera decreciente el efecto del medio de protección:

1. Helio (mayor).
2. Fundentes granulares sin adición de aleantes.
3. Dióxido de carbono.
4. Argón.
5. Fundentes granulares con adición de aleantes (menor).

4.7 Diseño Factorial 2^k

Los diseños factoriales 2^k son una clase especial de los diseños factoriales en los que se tienen k factores de interés a dos niveles cada uno. Son especialmente útiles en las etapas iniciales de la investigación para determinar, de un gran número de factores candidatos, cuales son los que realmente influyen sobre la variable respuesta. Se llaman diseños factoriales 2^k porque se quiere investigar la forma como influyen k factores sobre una variable respuesta y en cada factor se consideran dos niveles solamente. La réplica completa de un diseño de este tipo requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y recibe el nombre de diseño factorial 2^k .

El diseño 2^k es muy útil en las primeras etapas del trabajo experimental, cuando se investiguen muchos factores pero, probablemente todos ellos no influyen realmente sobre la variable respuesta. Este diseño proporciona el número más pequeño de corridas para estudiar simultáneamente k factores en un diseño factorial completo. Dado que sólo existen dos niveles para cada factor, es necesario suponer que la respuesta es aproximadamente lineal sobre el rango de los niveles seleccionados para el factor. Así, este tipo de diseño experimental es la forma más económica de estudiar el efecto combinado de k factores [9]. Los niveles de cada factor pueden ser cualitativos o cuantitativos y se denotan como Alto y Bajo o más (+) y menos (-).

4.8 Parámetros significativos en el proceso

Los parámetros a evaluar en el proceso de soldadura por PTA son:

Amperaje 140-180 A

Entre mayor sea el amperaje mayor será el grado de dilución obtenido. [21]

Tasa de alimentación 20-32 gr/min

Se tiene que realizar un precalentamiento del sustrato, para el caso de estudio se toma en cuenta un acero al carbono A-36. [25]

Velocidad de soldadura 15-19 cm/min

La velocidad de soldadura o avance determina el ancho y la profundidad del cordón de soldadura. [13]

4.9 Metodología de superficies de respuesta

La metodología de superficies de respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

La diferencia entre (MSR) y un diseño experimental corriente estriba en que un diseño experimental por si solo tiene como objetivo localizar el tratamiento “ganador” entre todos aquellos que se han probado. En cambio, MSR pretende localizar las condiciones óptimas de operación del proceso. Ello supone un reto para el investigador, requiere una estrategia más completa e incluye la posibilidad de efectuar varios experimentos secuenciales y el uso de técnicas matemáticas más avanzadas.

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), fue introducida por Box y Wilson [8] y es una colección de técnicas que permite al investigador inspeccionar una respuesta, que se puede mostrar como una superficie, cuando los experimentos investigan el efecto que tiene el variar factores cuantitativos en los valores que toma una variable dependiente o respuesta; ejemplo de esto puede ser estudiar cómo los valores de temperatura y presión afectan la tasa de una reacción química y tratar de encontrar los valores que optimicen esta

respuesta. Esto es, se trata de encontrar los valores óptimos para las variables independientes que maximizan, minimizan o cumplen ciertas restricciones en la variable respuesta.

La representación matemática de los modelos de MSR puede ser de diversas maneras:

Un modelo de primer orden (lineal) sin interacciones o productos cruzados:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

El modelo lineal de primer orden con interacciones:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

y el modelo cuadrático o de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

donde ε representa el ruido o error observado en la respuesta y .

En la metodología de superficie de respuesta se supone que la variable respuesta y está en función de los niveles de los factores cuantitativos representados por las variables x_1, x_2, \dots, x_k . Los modelos polinomiales se utilizan como una aproximación a la función de respuesta real, y generalmente son buenas aproximaciones cuando se trabaja en pequeñas zonas de los factores cuantitativos [9].

4.9.1 Función de deseabilidad

En orden para combinar las respuestas múltiples en una sola función que puede ser maximizada, una función de deseabilidad es definida primero para cada respuesta. La función de deseabilidad $d(y)$ expresa la deseabilidad un valor respuesta igual a y sobre una escala de 0 a 1. Esta función toma algunas de las tres formas, dependiendo hasta donde la respuesta debe ser maximizada, minimizada o alcanzar un valor objetivo. [10]

Maximización

Si la variable respuesta debe maximizarse, la función de deseabilidad es definida por:

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{y} < \text{bajo} \\ \left(\frac{\hat{y} - \text{bajo}}{\text{alto} - \text{bajo}} \right)^s, & \text{bajo} \leq \hat{y} \leq \text{alto} \\ 1 & \hat{y} > \text{alto} \end{cases}, \quad (4)$$

donde \hat{y} es el valor predicho de la variables respuesta, bajo es un valor abajo en el cual la respuesta es completamente inaceptable, y alto es un valor arriba donde la función de deseabilidad es un máximo [10].

La función es graficada abajo:

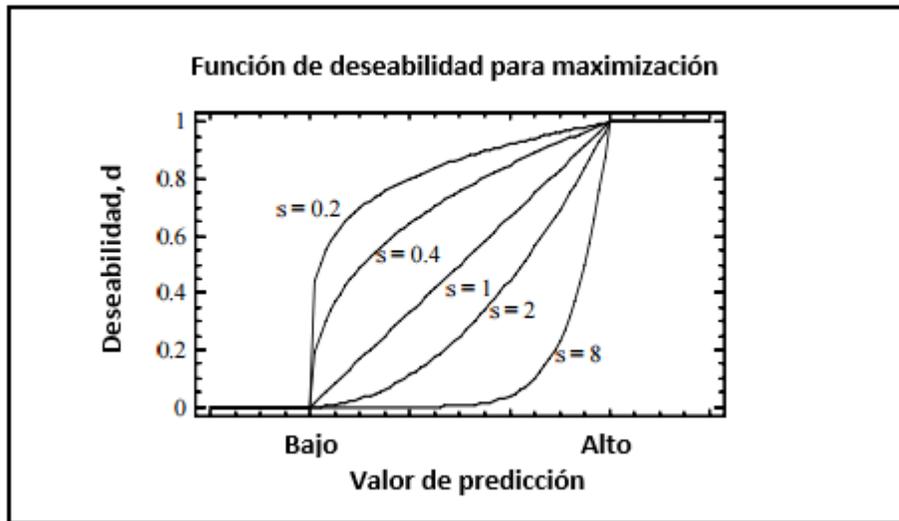


Figura 4.8 Gráfica de la función de deseabilidad para maximización [10]

El parámetro s define la forma de la función. Para $s = 1$, la deseabilidad se comporta linealmente de 0 en el valor bajo a 1 en el valor alto. Para $s < 1$, se incrementa rápidamente al principio y después se nivela más lento. Para $s > 1$, se incrementa lentamente al principio y después se acelera. El analista puede fijar s grande si es muy importante aproximarse al nivel máximo o pequeño si donde quiera que se cubra el rango de la respuesta especificada es casi igualmente deseable.

Minimización

Si la variable respuesta debe minimizarse, la función de deseabilidad es definida por:

$$d = \begin{cases} 1 & \hat{y} < bajo \\ \left(\frac{\hat{y} - alto}{bajo - alto} \right)^s & bajo \leq \hat{y} \leq alto \\ 0 & \hat{y} > alto \end{cases}, \quad (5)$$

La función es la imagen en un espejo que para la maximización, empezando en 1 en el nivel bajo y continuando en 0 en el nivel alto.

Alcanzar Valor Objetivo

Si la variable respuesta debe mantenerse en un valor objetivo, la función de deseabilidad es definida por:

$$d = \begin{cases} 0 & \hat{y} < bajo \\ \left(\frac{\hat{y} - bajo}{Objetivo - bajo} \right)^s & bajo \leq \hat{y} \leq objetivo \\ \left(\frac{\hat{y} - alto}{Objetivo - alto} \right)^t & objetivo \leq \hat{y} \leq alto \\ 0 & \hat{y} > alto \end{cases}, \quad (6)$$

La función es graficada como se muestra abajo:

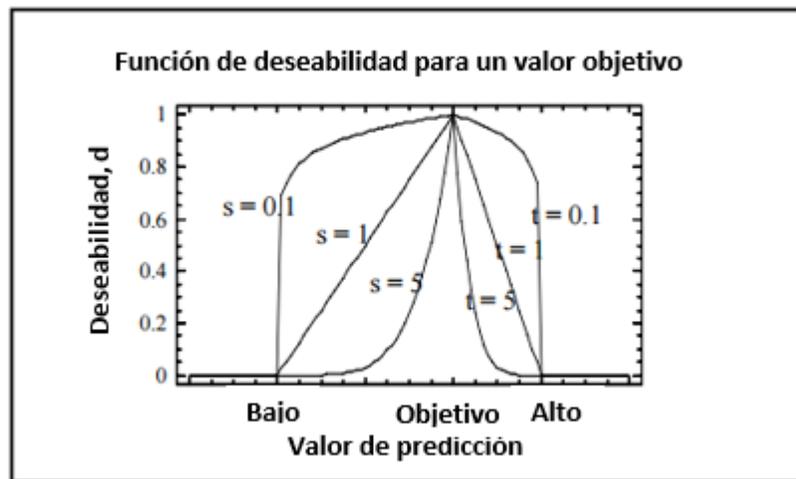


Figura 4.9 Gráfica de la función de deseabilidad para un valor objetivo [10]

El termino implicado s actúa como la función de deseabilidad máxima para predecir los valores respuesta menores que el valor objetivo, mientras que el termino implicado t actúa como la función de deseabilidad para predecir los valores respuesta mayores que el valor objetivo [10].

4.10 Prueba de desgaste (Pin on Disk)

Para la prueba de desgaste con este método se necesitan dos probetas. El primero es un pin cuyo tamaño es muy reducido, el cual es posicionado perpendicularmente a la otra pieza, la cual usualmente es un disco circular. La máquina de pruebas causa que el pin o el disco giren entre sí; como consecuencia de ello, se forma un camino de desgaste en el disco.

La probeta en forma de pin se presiona sobre el disco con una carga específica, y dicha probeta, se encuentra sujeta a un dispositivo posicionador con contrapesos. Los reportes de desgaste se realizan en términos de pérdida de volumen en milímetros cúbicos. La pérdida de masa por desgaste se puede convertir en pérdida de volumen mediante la utilización de adecuados valores de densidad.

En términos generales el equipo consiste en un posicionador de un pin esférico sobre un disco, el cual gira por la acción de un motor a unas determinadas revoluciones por minuto RPM. El pin se encuentra localizado a un radio R del centro del disco [11].

En la figura 4.9 se puede observar el esquema de la prueba de desgaste donde F es la fuerza aplicada al pin, D es el diámetro del disco, d el diámetro del pin, W la velocidad de rotación del disco y R el diámetro al que se realiza la prueba de desgaste.

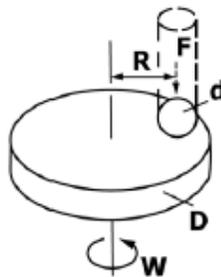


Figura 4.10 Esquema de la prueba de desgaste Pin on Disk [11]

Preparación de las muestras

Este método puede aplicarse a una gran variedad de materiales. El único requisito es que las probetas tengan dimensiones específicas para que puedan resistir las cargas aplicadas durante el ensayo. Los materiales a ser probados deberán tener una detallada descripción en cuanto a dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos y dureza.

La probeta pin típicamente es un cilindro y el acabado superficial deberá presentar un buen pulido.

Parámetros del ensayo:

Carga: Valores de la fuerza de contacto en Newton.

Velocidad: La velocidad relativa entre las superficies de deslizamiento en m/s.

Distancia: La distancia acumulada de deslizamiento en m.

Temperatura: La temperatura en las dos probetas en cercanía a la superficie de contacto.

Atmosfera: La atmosfera (aire del laboratorio, humedad relativa, argón, lubricante, etc.) alrededor de la superficie de contacto.

Procedimiento:

1. Se realiza la limpieza de los especímenes. Se pesan y se miden las probetas.
2. Se deberá insertar el disco en el dispositivo de sujeción, de tal manera que el disco se encuentre perpendicular al eje de rotación.
3. Insertar la probeta de pin en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quede perpendicular al disco, y así se tenga el mejor contacto.
4. Se aplica la carga apropiada al pin, de acuerdo a las condiciones de desgaste que se quieren medir.
5. Se prende el motor y se ajusta la velocidad (rpm) hasta el valor deseado.
6. Se inicia el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga. La prueba se detendrá cuando se hayan completado el número de

revoluciones programadas o el tiempo establecido. La prueba no deberá ser reiniciada o interrumpida.

7. Extraer las probetas y limpiarlas de cualquier partícula y esquirlas presentes.
8. Observar la presencia de protuberancias, desplazamientos de metal, decoloración, microfracturas o anomalías superficiales.
9. Se deberá medir nuevamente las probetas en cuanto a dimensiones y peso.
10. Esta prueba se debe repetir varias veces con el propósito de tener suficientes datos que estadísticamente produzcan resultados.

Obtención de la tasa de desgaste:

Las mediciones de desgaste pueden tomarse en % de pérdida en peso contra tiempo. Sin embargo, los resultados son más comúnmente reportadas como pérdida de volumen en milímetros cúbicos [11].

El volumen perdido está determinado por la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen perdido, } mm^3 = \frac{\pi(\text{radio de la huella, } mm)(\text{ancho de huella, } mm)^3}{6(\text{radio de la esfera, } mm)} \quad (7)$$

En la prueba de desgaste el coeficiente K, también conocido como tasa de desgaste tiene mucha importancia para analizar el efecto que tiene el recubrimiento durante la prueba realizada, por lo cual su cálculo es muy importante y se puede obtener con la siguiente formula:

$$\text{Tasa de desgaste, } mm^3/N = \frac{\text{Volumen perdido, } mm^3}{(\text{Carga, } N)(\text{Distancia, } m)} \quad (8)$$

Capítulo 5

Estado del Arte

A continuación, se presenta el estado del arte con los principales artículos relacionados al objeto de estudio, se destacan los métodos aplicados en las investigaciones y los resultados obtenidos con la finalidad de crear mayor conocimiento acerca del tema.

Singh H. [1] presentó el crecimiento que ha tenido el proceso por PTA durante los años a partir de su descubrimiento, señala las principales ventajas del proceso como la forma del cordón de soldadura, los cambios de microestructura que generan mayor dureza, no presentan rugosidad los cordones, el sistema es fácil de controlar, además de otras cualidades que tiene respecto a otros procesos para aplicación de recubrimientos.

5.1 Diferencias entre el proceso PAW Y PTA

Silva K. [12] estudió el efecto de varios parámetros del proceso PAW como corriente de soldadura, la altura de la antorcha, la velocidad de soldadura y el flujo de gas plasma respecto al grado de dilución sobre una aleación de Aluminio. Se lleva a cabo un diseño factorial compuesto por 16 experimentos: 2 niveles y 4 factores. Se obtienen los coeficientes mediante regresión y se forman los modelos matemáticos correspondientes para analizar la interacción entre variables. Además, Wu C [13] señala que para mayor control es necesario utilizar gas de protección y en unión con el gas plasma se genere una mejor atmosfera al momento de aplicar la soldadura.

Shane F. [14] se creó como objetivo optimizar los parámetros del proceso de soldadura por arco de plasma (PAW) para la soldadura de metales diferentes: acero inoxidable austenítico SS-304L y un acero de bajo carbono y A36. Se investiga el efecto de la corriente, velocidad de soldadura y la calidad en las uniones soldadas. Las características de calidad como la geometría del grano,

microestructura, la dureza, la cantidad de ferrita y ensayo de tracción se consideran para la calificación de las muestras soldadas. (Figura 5.1)

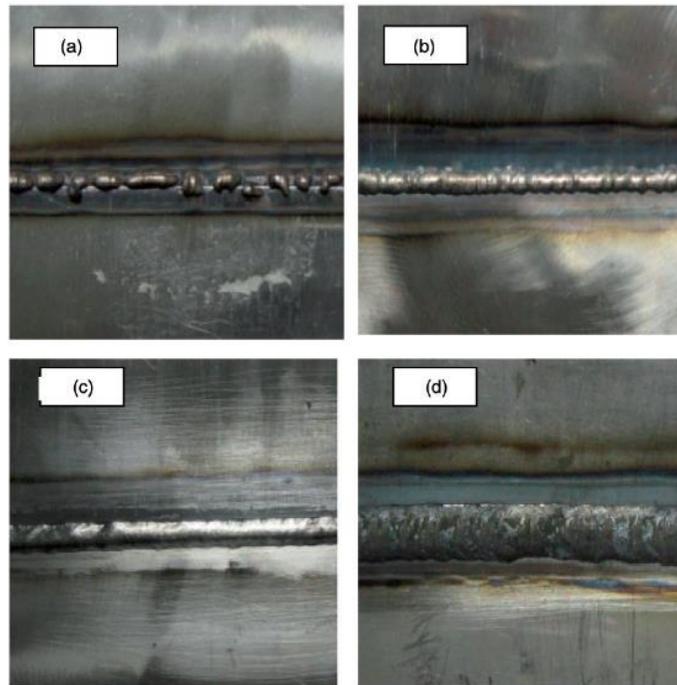


Figura 5.1 Configuración de soldadura en a) Fusión incompleta, b) Ausencia de penetración, c) Buena soldadura, d) Exceso de penetración [14]

Vergara V. [15] investigaron los procesos de soldadura PAW y PTA (Figura 5.3) con aplicación en operaciones de recubrimiento de superficies, en particular sobre álabes de turbina. Se diferencia un proceso de otro tomando en cuenta los cordones de soldadura (Figura 5.2), el grado de dilución, la dureza y la microestructura. Se obtuvo como resultado que el proceso de soldadura por PTA es superior al PAW debido principalmente a la geometría que presentan los cordones de soldadura y el control de parámetros que permite el proceso.

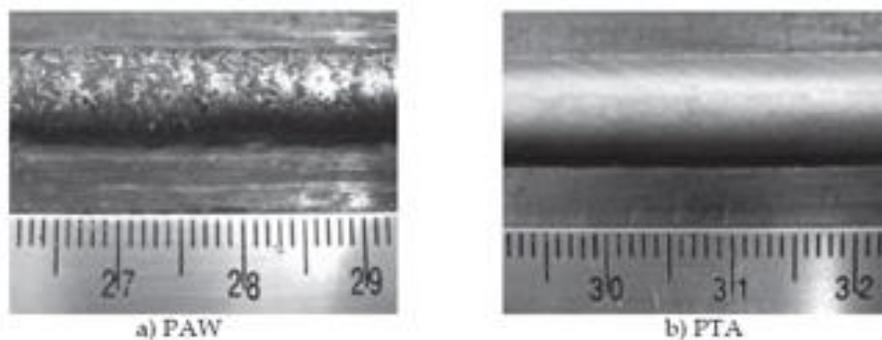


Figura 5.2 Aspecto superficial de Stellite 6 depositado por: a) PAW, b) PTA [15]

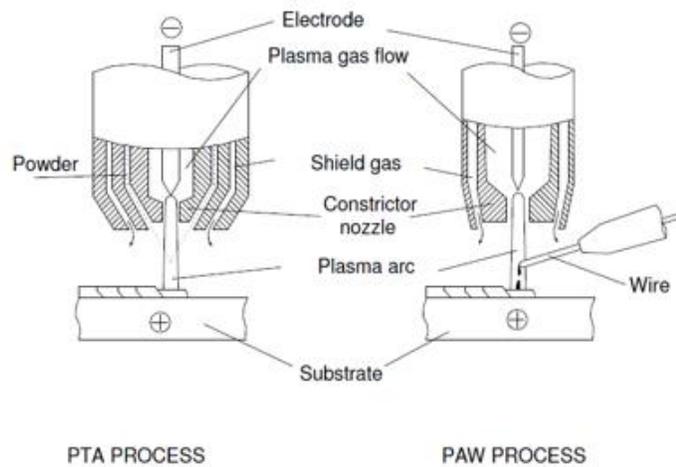


Figura 5.3 Comparación del proceso de plasma transferido por arco PTA y PAW [15]

5.2 Diseños factoriales utilizados para control de parámetros

Mohan K. [16] presentaron un estudio experimental llevado a cabo para modelar el efecto de varios parámetros de soldadura para el proceso de plasma transferido por arco (PTA) utilizados en la aplicación de recubrimientos de carburo de tungsteno sobre placas de acero inoxidable 316L. Los experimentos se llevaron a cabo en base a un diseño central compuesto rotatorio de 5 factores y 5 niveles. El modelo matemático se desarrolló para predecir la dilución.

Jivrag A. y Pople S. [17] estudiaron el efecto de desgaste del Inconel 625 para controlar el desgaste por erosión. Establecidos los mecanismos de desgaste de la erosión en Inconel 625, teniendo en cuenta que afecta ángulos de partículas a diferentes temperaturas del sustrato de Inconel 625 como parámetros de proceso y tasa de desgaste como parámetro de respuesta. Se utilizó un diseño factorial fraccionado de regresión (Figura 5.4) para determinar la relación entre los parámetros de proceso y parámetro de respuesta.

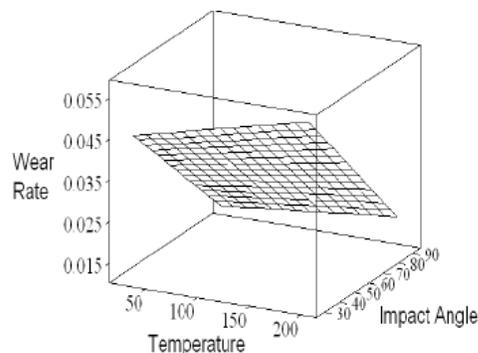


Figura 5.4 Modelo 3-D desarrollado mediante el método de regresión factorial completo [17]

Jiang Z. [18] utilizaron un diseño de experimentos basado en una metodología de superficies de respuesta (MSR), desarrollan un recubrimiento robusto mediante el proceso de plasma transferido por arco (PTA). Los parámetros importantes con respecto a la superficie a valores de dureza se identificaron en el diseño de Taguchi. Además, se aplican gráficos tridimensionales para desarrollar una superficie de respuesta produciendo la mejor área deseada de una capa que arroje como resultado un recubrimiento robusto. Un diseño de Box-Behnken es utilizado en su estudio. Los resultados revelaron que una MSR provee un método eficaz en comparación con el método de ensayo y error tradicional para explorar los efectos de los factores controlados en respuesta.

Srimanth N. y Murugan N. [19] utilizaron un diseño factorial de cinco factores y cinco niveles para el desarrollo de ecuaciones matemáticas para la predicción de la geometría de soldadura en depósito de 410L de acero inoxidable (Cr-Si-Ni) a anillos de asiento de la válvula de carbono. La cantidad de metal depositado ha reducido y las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las capas de revestido se han mejorado mediante la optimización de los parámetros del proceso.

Balamurugan S. y Murugan N. [2] emplearon la técnica de elementos finitos para el análisis de recubrimientos duros aplicados por medio del proceso PTA en acero estructural con carburo de titanio (TiC). El objetivo de este trabajo fue comparar los valores de la geometría del cordón de soldadura simulados con respecto a los resultados experimentales en diferentes condiciones de entrada de calor. Se utilizó software ANSYS (Figura 5.5) para determinar la penetración que tiene el material de aporte en función de la entrada de calor.

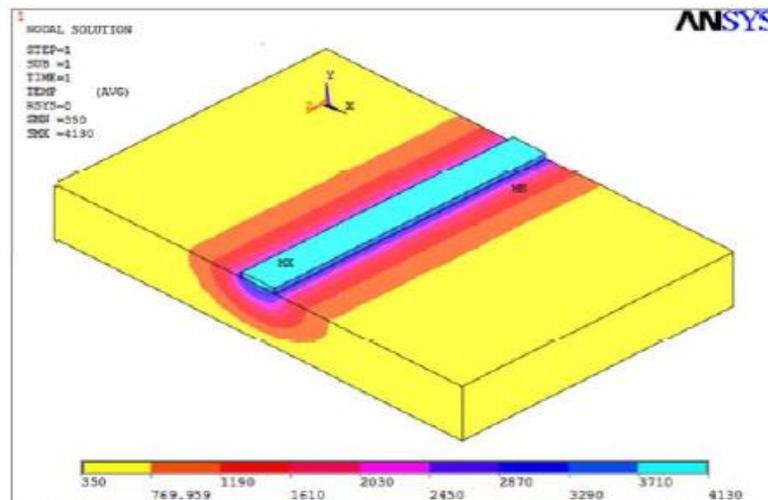


Figura 5.5 Gráfica de contorno de efecto de la temperatura sobre el recubrimiento [2]

Siva K. [20] realizaron una compilación de investigaciones basadas en diferentes procesos de soldadura SAW, GMAW, GTAW, SMAW, PTA, LBW, FSW, EBW y corte con plasma, donde se utiliza la MSR y diferentes tipos de diseños factoriales para optimizar los parámetros que intervienen en cada proceso anteriormente mencionado.

Balamurugan S. y Murugan N. [21] analizaron el recubrimiento mediante PTA de IS:2062 acero estructural con carburo de titanio (TiC). Los experimentos se llevaron a cabo en base a un diseño compuesto central rotatorio totalmente replicable de 5 factores y 5 niveles. Los modelos matemáticos se desarrollaron usando una MSR para estudiar los efectos de los parámetros del proceso de PTA como corriente de soldadura, velocidad de soldadura, la velocidad de alimentación de polvo, oscilación y la temperatura de precalentamiento con un efecto sobre la geometría del cordón, penetración, refuerzo, anchura del cordón y la dilución. Se analizaron los efectos directos (Figura 5.6) y la interacción de los parámetros del proceso de PTA respecto a la geometría del grano y dureza adquirida. A partir del modelo matemático, se optimizaron los parámetros del proceso.

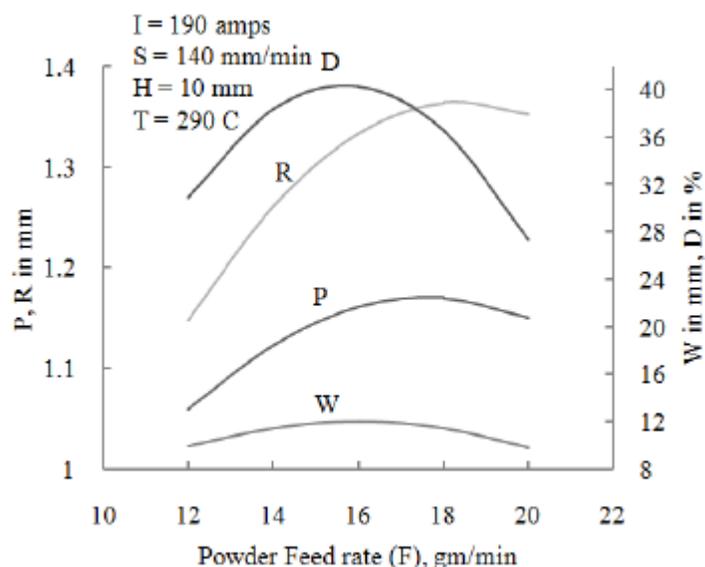


Figura 5.6 Efecto de la tasa de alimentación sobre la geometría del cordón [21]

Balamurugan S. y Murugan N. [22] emplearon la técnica de plasma transferido por arco (PTA) para depositar carburo de titanio (TiC) resistente al desgaste en IS: 2062 acero estructural. El ensayo de desgaste se realizó mediante la técnica de pin on roller bajo diferentes condiciones experimentales. La experimentación fue realizada mediante un diseño de experimentos para obtener la información necesaria acerca de los efectos directos y la interacción de los parámetros de entrada sobre la respuesta. Los experimentos están basados en un diseño

central compuesto plegable de 3 factores y 3 niveles. El modelo matemático empleado para predecir la tasa de desgaste y el desgaste de pista es obtenida a partir del microscopio. Encontraron que existe mayor resistencia al desgaste sobre superficie recubierta mediante PTA comparado a la del sustrato.

Dasgupta B [23] realizaron un análisis y optimización de los parámetros de soldadura, durante la deposición de una aleación base de níquel Colmonoy en placas de acero inoxidable por el medio de plasma transferido por arco (PTA), se buscan los valores de los parámetros del proceso para producir la geometría óptima del cordón de soldadura. Los experimentos se llevaron a cabo sobre un diseño de 5 parámetros de entrada y los modelos matemáticos se desarrollan utilizando la técnica de regresión múltiple. Los efectos directos de los parámetros del proceso de entrada respecto a la geometría del cordón de soldadura se analizaron mediante gráficos (Figura 5.7). Por último, la optimización de los parámetros del cordón de soldadura, que es la minimización de la penetración y la maximización de refuerzo y el ancho del cordón de soldadura, se hicieron con el fin de economizar los parámetros del proceso de entrada para conseguir la unión de soldadura deseable.

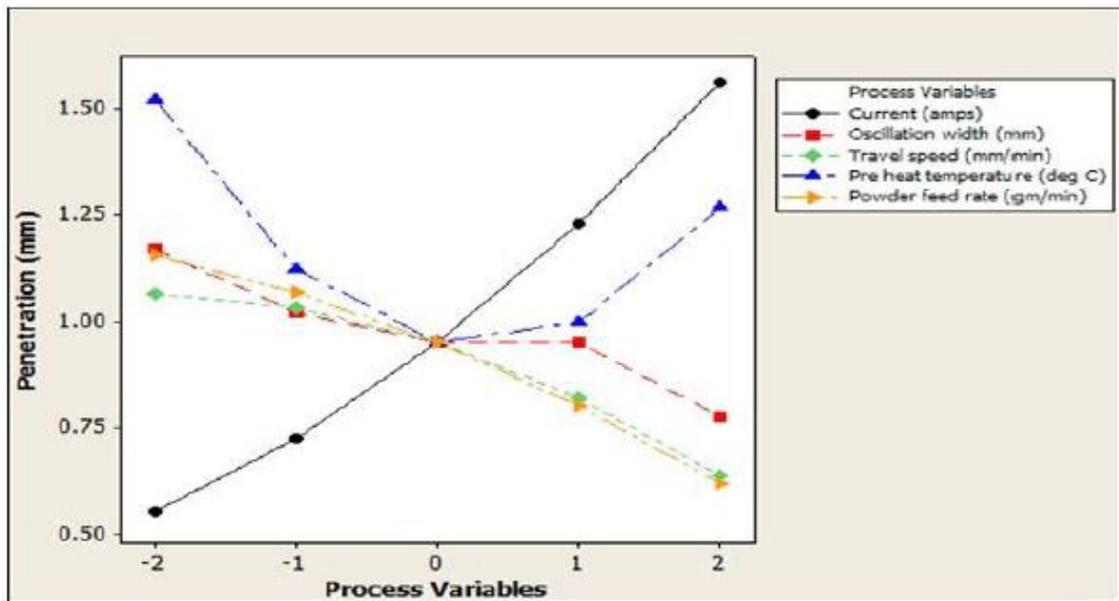


Figura 5.7 Efecto de las variables del proceso sobre la penetración [23]

5.3 Obtención de parámetros para aplicación de recubrimientos en el proceso PTA

Mohan K. [24] determinaron el efecto que tiene el amperaje, la velocidad de soldadura, tasa de alimentación y la oscilación mediante un diseño central compuesto rotatable. Se utilizó el proceso de plasma transferido por arco PTA para crear recubrimientos de carburo de Tungsteno sobre placas de acero inoxidable 316L. La Tabla 7.1 muestra los rangos de experimentación.

Tabla 5.1 Limites y niveles de los parámetros de soldadura [24]

Parámetros	Unidades	Notación	Niveles				
			-2	-1	0	1	2
Amperaje	A	I	135	142	149	156	163
Velocidad	mm/min	S	77	81	85	89	93
Alimentación	g/min	F	34	36	38	40	42
Oscilación	ciclos/min	H	36	38	40	42	44
Distancia Tobera	mm	N	8	9	10	11	12

Ravichandran M [25] determinaron que los parámetros para obtener alta resistencia a la tensión y al impacto sobre placas de acero inoxidable 202 soldadas mediante el proceso de soldadura PTA son: alto amperaje, bajo voltaje y baja tasa de alimentación, y para obtener la unión que tenga mayor dureza la combinación de parámetros será: bajo amperaje, bajo voltaje y baja tasa de alimentación.

5.4 Factores que determinan la resistencia al desgaste

Guoqing Ch [26] realizaron recubrimientos de Ni 50 sobre acero inoxidable 304L con la finalidad de analizar el efecto que tiene cada prueba respecto a la resistencia al desgaste. Determina que cuando en la prueba de desgaste el tiempo es corto y la carga a la que se somete es bajo, el mecanismo de desgaste será por abrasión, adhesivo cuando el tiempo es corto y la carga alta y cuando el tiempo es largo y se tiene una carga baja el mecanismo de desgaste será por oxidación, si se somete a una carga alta será por fatiga. Como método alterno para aumentar la resistencia al desgaste se pueden crear materiales de matriz compuesta como hizo Zikin A [27] donde reforzaron una matriz base Ni con

residuos de metales con contenido en W, Fe Y Co, aumentando así la dureza y resistencia al desgaste.

Fisher G [28] utilizaron carburo de tungsteno aplicado sobre equipo de minería mediante el proceso de PTA, esto con la finalidad de aumentar la vida útil del equipo, determina el tipo de carburo necesario para brindar mayor resistencia al desgaste. Por otra parte Tosun G [29] realizó recubrimientos con una aleación 95% Ni y 5% WC sobre un acero AISI 1010 donde determino que la formación de fases duras es debido al aumento del amperaje, se obtiene ferrita widmanstatten, ferrita acicular, vainita y martensita.

Sin embargo Deng D [30] demostró que los carburos en forma esférica tienen un efecto diferente, se aplicaron recubrimientos de Ni45 reforzado con carburos de tungsteno esféricos sobre un acero inoxidable 304L (Figura 5.8), se obtuvo como resultado que un bajo amperaje genera fisuras en el recubrimiento y que entre mayor sea el amperaje menor será la dureza obtenida.

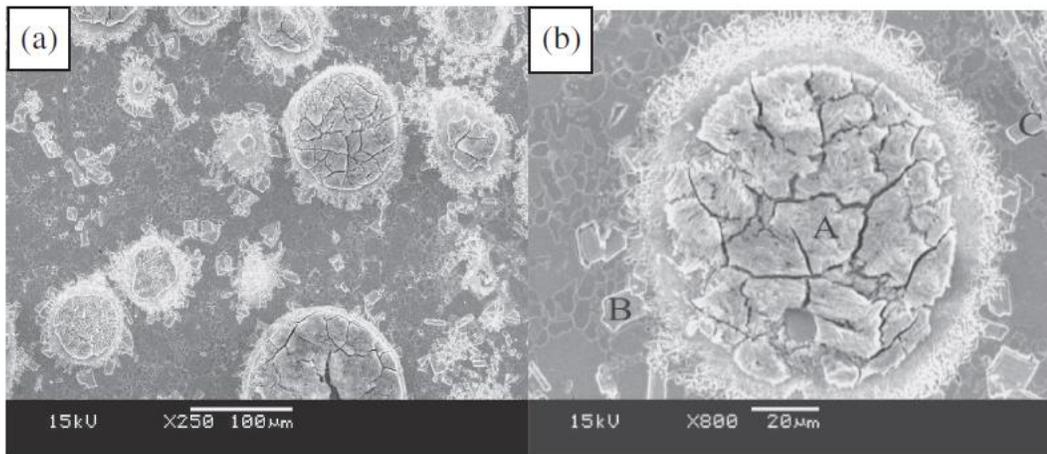


Figura 5.8 a) Imagen SEM del Carburo de Tungsteno utilizado en el recubrimiento a 180A, b) Zona ampliada [30]

Scheid A [31] analizaron recubrimientos CoCrWC y CoCrMoSi donde el recubrimiento reforzado con carburos de tungsteno presenta mayor resistencia al desgaste (Ver Figura 5.9) y resistencia a altas temperaturas.

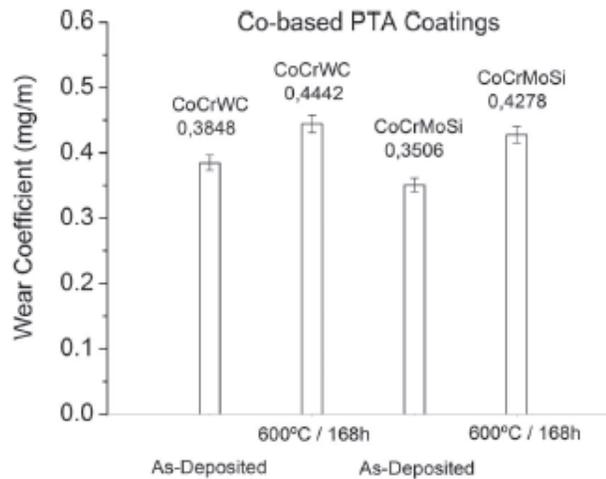


Figura 5.9 Coeficiente de desgaste con barras de error y desviación estándar [31]

5.4 Caracterización de recubrimientos aplicados por PTA

García F. [32] en su investigación, los cordones de soldadura fueron depositados sobre acero D2 mediante el proceso de PTA con diferentes parámetros como la corriente de soldadura y la velocidad de desplazamiento, utilizando como material de aporte un material base Níquel. Con el fin de evaluar las características metalúrgicas entre los cordones de soldadura y la interface sustrato se realizó una caracterización microestructural mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM) y para evaluar las propiedades mecánicas se llevó a cabo una prueba de desgaste.

Ferreira L. [33] realizaron recubrimientos base Ni C276 mediante el proceso por PTA sobre placas de acero 316L y API 5L X70. Analizan la geometría, la dilución y la microestructura de los recubrimientos mediante OM, SEM y difracción por rayos-x. Utilizando el mismo material base pero modificando el material de aporte por un N 625 Antoszczyszyn T [34] analiza el efecto que tiene la dilución después de usar diferente amperaje: 120, 150 y 180 A. Figura 510. Obtienen como resultado que entre menor sea el amperaje habrá una disminución en el porcentaje de dilución obtenido.

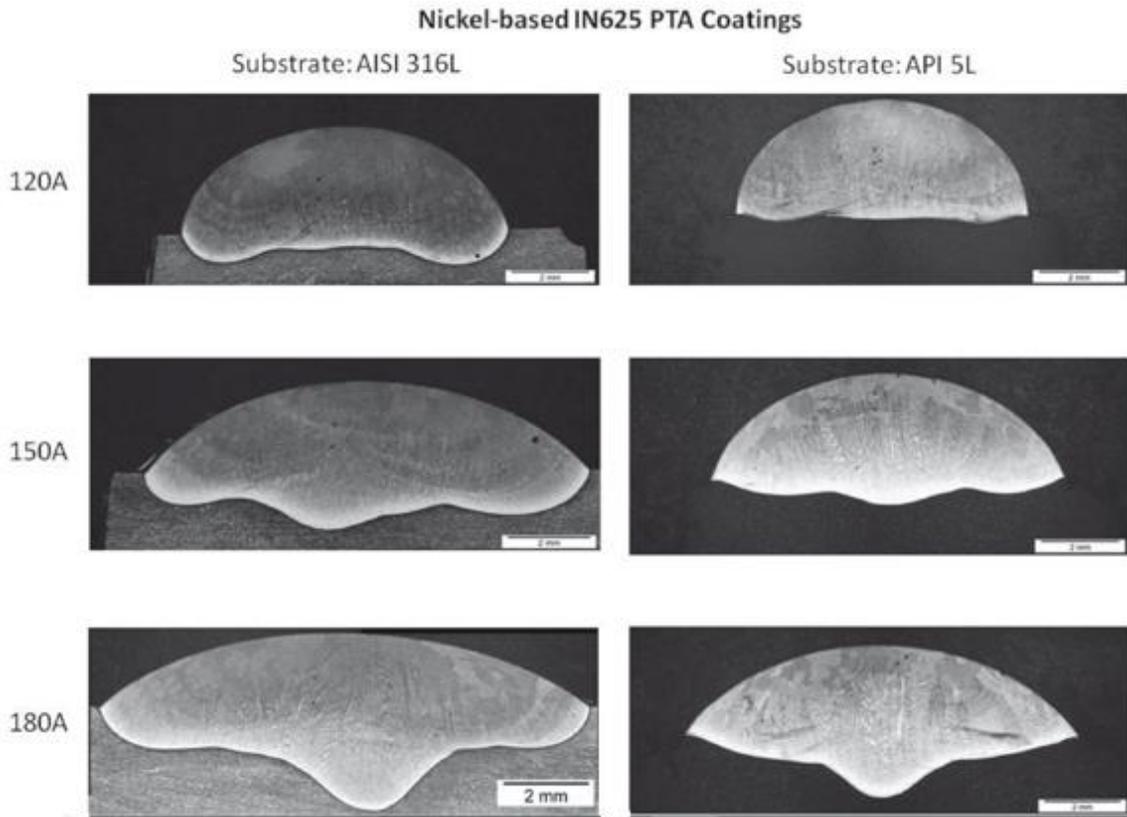


Figura 5.10 Geometría del cordón de soldadura para diferente metal base y amperaje [34]

Dewey D. [35] examinaron el cambio de fase mediante OM, SEM y TEM que se presenta entre el material base - zona afectada por el calor – interfase (Figura 5.11) después de aplicar un recubrimiento base Cobalto sobre un acero inoxidable 17-4PH mediante el proceso de PTA. Obtienen como resultado que se presentó un cambio de fase, la martensita precipita y se transforma en austenita.

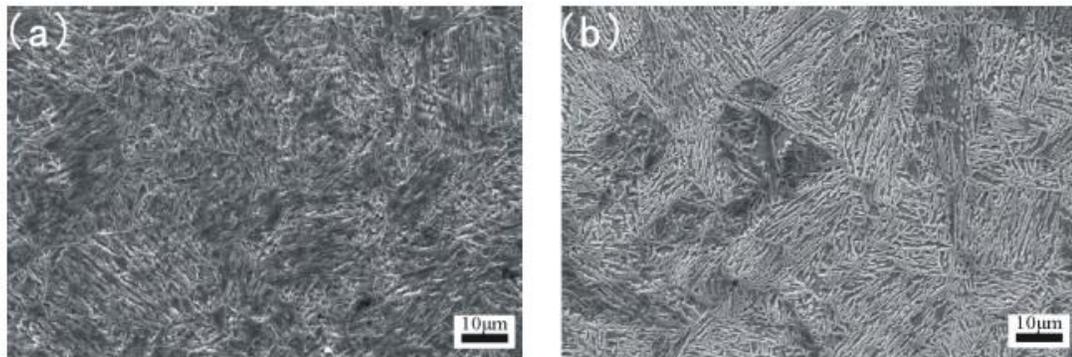


Figura 5.11 Zona afectada por el calor y metal base (SEM) a) ZAC, b) Metal base [35]

Fernandes F. [36] analizaron la microestructura adquirida después de aplicar un material de aporte base Ni sobre un hierro gris mediante el proceso de plasma transferido por arco PTA, el análisis se realiza mediante EPMA, SEM y difracción por rayos-x, además determinó que el incremento del amperaje reduce la porosidad, disminuye la velocidad y aumenta la dilución. Tomando en cuenta la conclusión anterior se puede respaldar el estudio de Dewey D [37] que analizó el efecto del amperaje que tiene un recubrimiento de Stellite 12 sobre un acero inoxidable dúplex SAD2507, utilizó muestras sometidas a 140, 160, 180 y 200A (Figura 5.12), donde la muestra bajo 160A mostró mejor dureza y mejor resistencia al desgaste debido también a la poca porosidad.

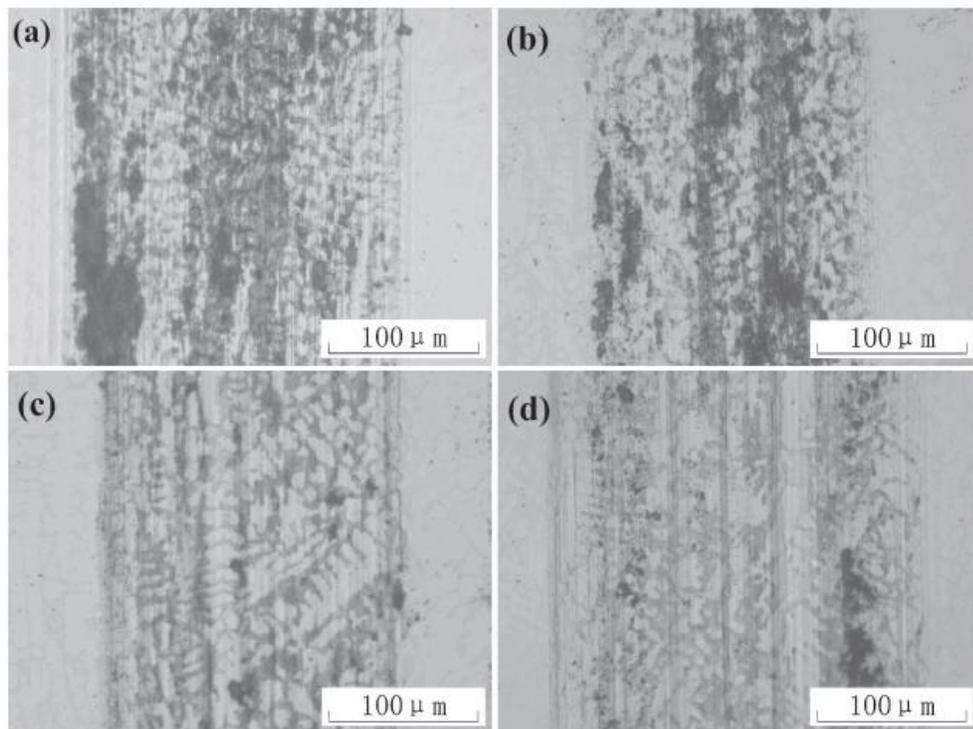
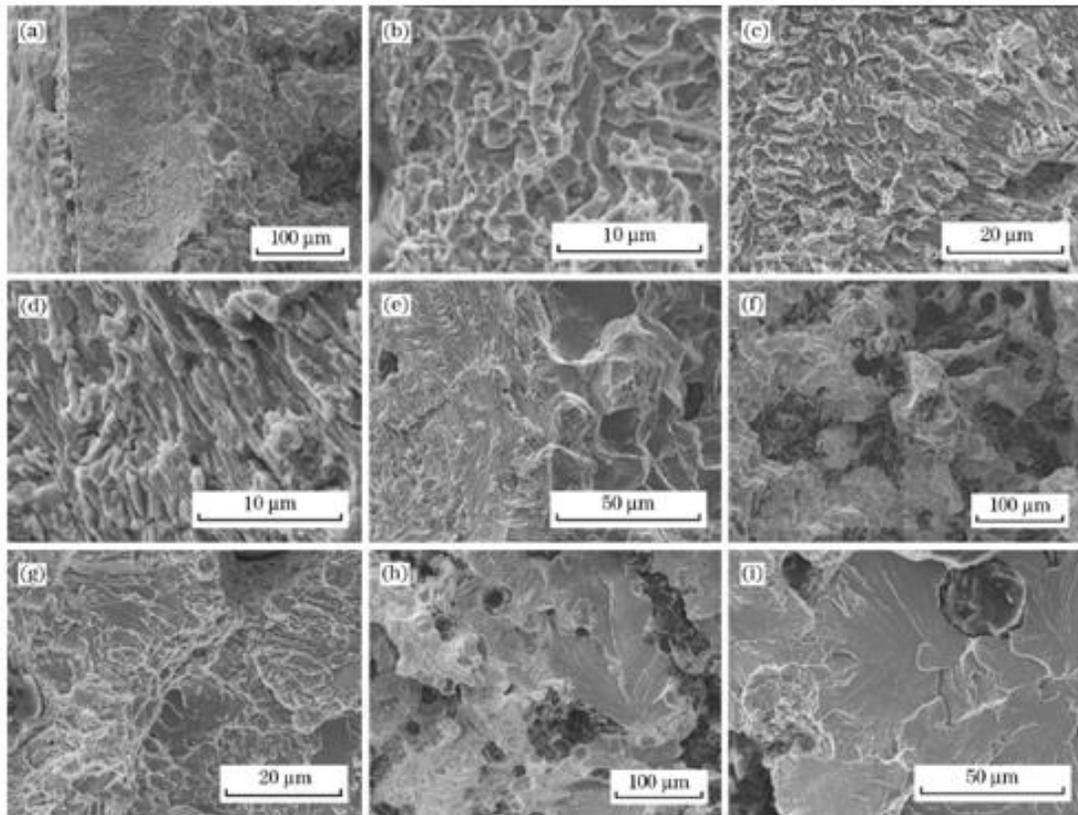


Figura 5.12 Huellas de desgaste a) 140A, b) 160A, c) 180A, d) 200A [37]

Feng J. [38] aplicaron un recubrimiento de Cr-Ni-Mo sobre un acero de grafito compacto mediante el proceso por PTA y examinaron la microestructura obtenida en cada zona entre el recubrimiento y metal base utilizando OM, EDS, SEM y XRD. (Ver Figura 5.13)



- a) Zona de recubrimiento, b) Zona amplificada de recubrimiento, c) Transición entre la zona de recubrimiento y la zona fundida, d) Ampliación de la zona fundida, e) Transición entre la zona fundida y la zona afectada por el calor, f) Zona afectada por el calor, g) Ampliación de la zona afectada por el calor, h) Transición entre la zona afectada por el calor y el material base, i) Ampliación del metal base

Figura 5.13 Fractografía del recubrimiento por PTA desde el exterior de la superficie hasta el interior del metal base [38]

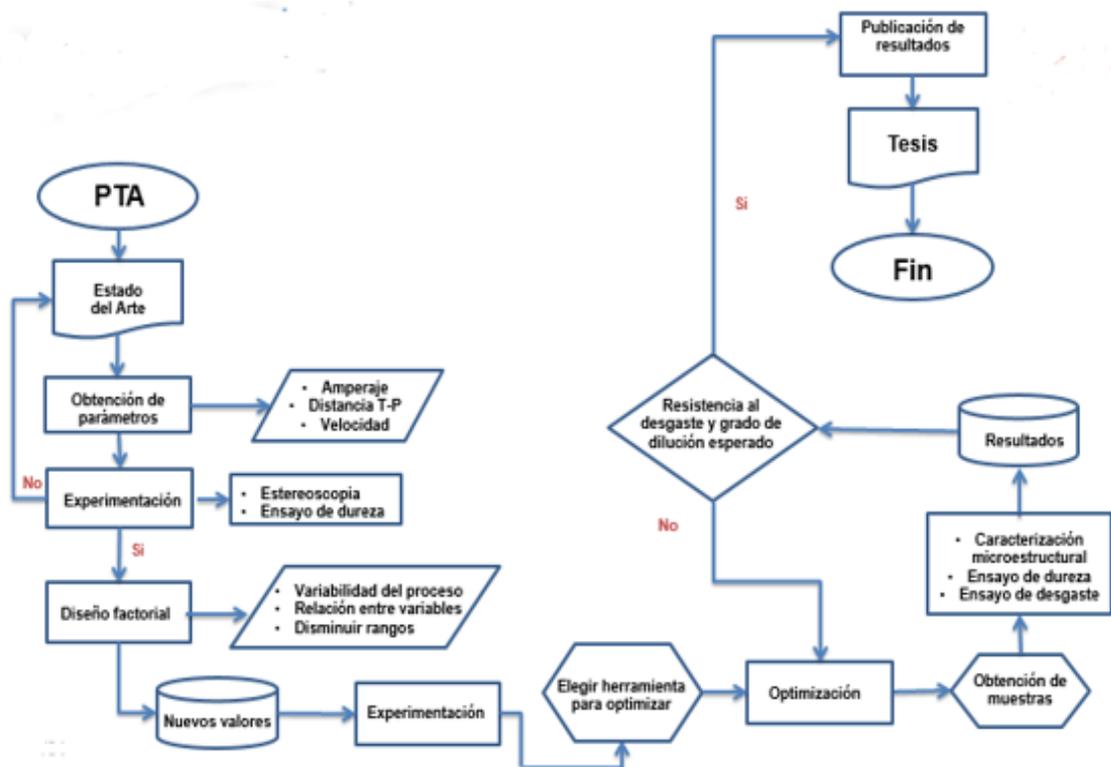
Los trabajos anteriormente descritos, fueron utilizados para la selección de las principales variables que afectan al proceso de soldadura por PTA y para obtener un rango aproximado de sus valores para experimentar sobre una zona de operatividad más restringida, además de adquirir las técnicas que se utilizaron para la optimización de parámetros y seleccionar la que más se adecue al diseño factorial propuesto.

Capítulo 6

Metodología

La metodología propuesta es con la finalidad de obtener los parámetros adecuados para el proceso de soldadura por plasma transferido por arco, se detallan los pasos necesarios para optimizar los parámetros del proceso y obtener los resultados esperados en la investigación.

Figura 6.1 Diagrama que muestra la metodología de investigación



1. Revisión del estado del arte.
Para identificar los parámetros con mayor impacto en el proceso de soldadura PTA utilizados en la aplicación de recubrimientos N625 y 88PTA para componentes de acero al carbono A36.
2. Selección de parámetros principales.
Amperaje, distancia tobera-pieza, velocidad de avance y la tasa de alimentación del material de aporte.
3. Pre experimentación.
Se realizan los recubrimientos correspondientes mediante el equipo de PTA sobre probetas de acero A36 con medidas de 15 x 8 x 1.5 cm.
4. Revisión del grado de dilución obtenido.
Mediante estereoscopia y realizar los ensayos de dureza correspondientes para cada muestra. Hay que verificar que el grado de dilución obtenido no sea muy bajo ni muy alto para evitar desprendimiento del recubrimiento y que la dureza alcanzada sea mayor a la dureza base del material de aporte.
5. Realizar un DOE.
Para analizar: la variabilidad del proceso, relación entre variables y delimitar la región de operatividad del proceso.
6. Utilizar una MSR para optimizar los parámetros.
Obtener el modelo matemático correspondiente para predecir el grado de dilución en nuevos experimentos. Restringir mediante una función de deseabilidad (objetivo) para obtener el valor de los parámetros que arrojaran el grado de dilución seleccionado.
7. Experimentación.
Utilizar los valores adquiridos mediante la optimización y algunos otros valores para aplicar nuevamente recubrimientos y así verificar que tanto la optimización como el modelo obtuvieron resultados satisfactorios.
8. Revisar el grado de dilución obtenido
Mediante caracterización microestructural (estereoscopia y barrido) y realizar los ensayos de dureza correspondientes.
9. Ensayo de desgaste
Preparar las muestras para la prueba de desgaste mediante la técnica de pin on disk, revisar la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción.
10. Publicar resultados y elaborar la tesis correspondiente.

Capítulo 7

Experimentación y Resultados

En el presente trabajo, es utilizado el proceso de PTA para aplicar recubrimientos sobre placas de acero A36, dichas placas tienen un tamaño aproximado de 15 x 8 x 1.5 cm, los recubrimientos aplicados son materiales base Ni (N625 y 88PTA). Los parámetros del proceso que serán controlados durante la aplicación de recubrimientos, en base a su efecto significativo, es la tasa de alimentación, la velocidad de soldadura y el amperaje, cuyos valores adaptados al DOE se muestran en la Tabla 7.1, además en la Tabla 7.2 se pueden apreciar los parámetros constantes, también se toma en cuenta la distancia tobera-pieza (10 mm). Las principales características a evaluar serán el porcentaje de dilución y la resistencia al desgaste obtenidos.

Tabla 7.1 Parámetros del proceso por PTA

Variables	Niveles		
	-1	0	1
Tasa de Alimentación (gr/min)	20	26	32
Velocidad de Soldadura (cm/min)	15	17	19
Amperaje (A)	140	160	180

Tabla 7.2 Parámetros constantes del proceso por PTA

Parámetros Constantes	
Gas Plasma (l/min)	5
Gas de Protección (l/min)	12
Gas de Alimentación (l/min)	5

Acero ASTM A36

De los aceros al carbono, el acero ASTM A36 es una de las variedades más comunes en parte debido a su bajo costo. Ofrece una excelente resistencia y fuerza para un acero bajo en carbono y aleación. Aunque es propenso al óxido. Mediante los recubrimientos con N625 y 88PTA sobre el acero A36 se busca obtener bajo porcentaje de dilución y alta resistencia al desgaste. Para comenzar

con la experimentación es necesario observar la microestructura del acero (Fig. 7.1), y posteriormente realizar las corridas necesarias para el DOE.

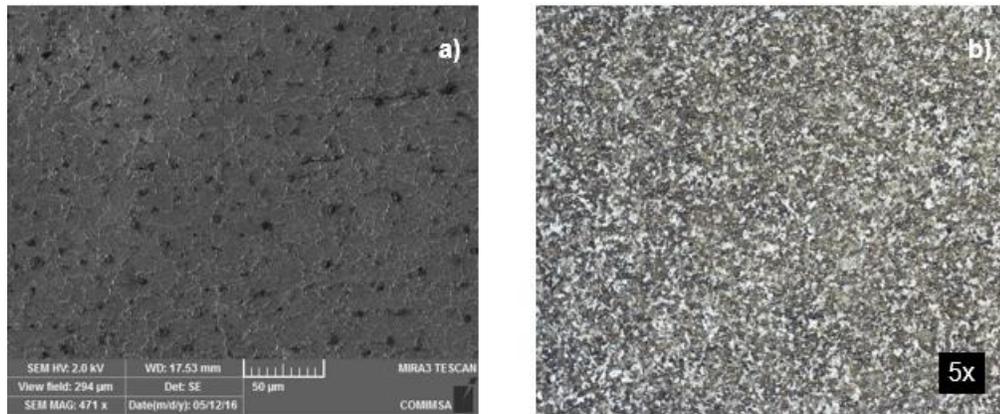


Figura 7.1 a) Micrografía acero A36 (MEB), b) Micrografía acero A36 (MO)

DOE

La matriz del diseño elegido (Tabla 7.3) para llevar a cabo el experimento fue un diseño factorial 2^3 con puntos centrales. Se compone de 12 pasos en condiciones codificadas y comprende un medio de replicación de diseño de $2^3 = 8$ factorial con 4 puntos centrales. Todos los parámetros de soldadura a nivel medio (0) constituyen los puntos centrales, mientras que la combinación de cada parámetro de soldadura en su valor más bajo (-1) o de mayor valor (1).

Tabla 7.3 Matriz de parámetros del DOE N625

Pieza	Tasa de alimentación (gr/min)	Velocidad de soldadura (cm/min)	Amperaje (A)	Dilución (%)
1	1	1	1	4.67
2	1	1	-1	0.27
3	1	-1	-1	3.19
4	1	-1	1	12.17
5	-1	-1	1	25.84
6	-1	-1	-1	1.24
7	-1	1	-1	1.79
8	-1	1	1	17.35
9	0	0	0	5.38
10	0	0	0	6.22
11	0	0	0	5.74
12	0	0	0	5.12

La dilución es un factor determinante cada vez que se quiere evaluar las propiedades del recubrimiento. En comparación con otros procesos de soldadura el PTA requiere menos cantidad de material a depositar con mejores propiedades metalúrgicas y permite una medición precisa de materias prima o polvo metálico [39,40]. La forma de la geometría de cordón de soldadura se ve afectada por los valores de los parámetros del proceso de PTA mantenido durante la deposición [41,42]. Los resultados de dilución medida mediante estereoscopia para las diferentes condiciones de procesamiento se muestran en la Fig. 7.2

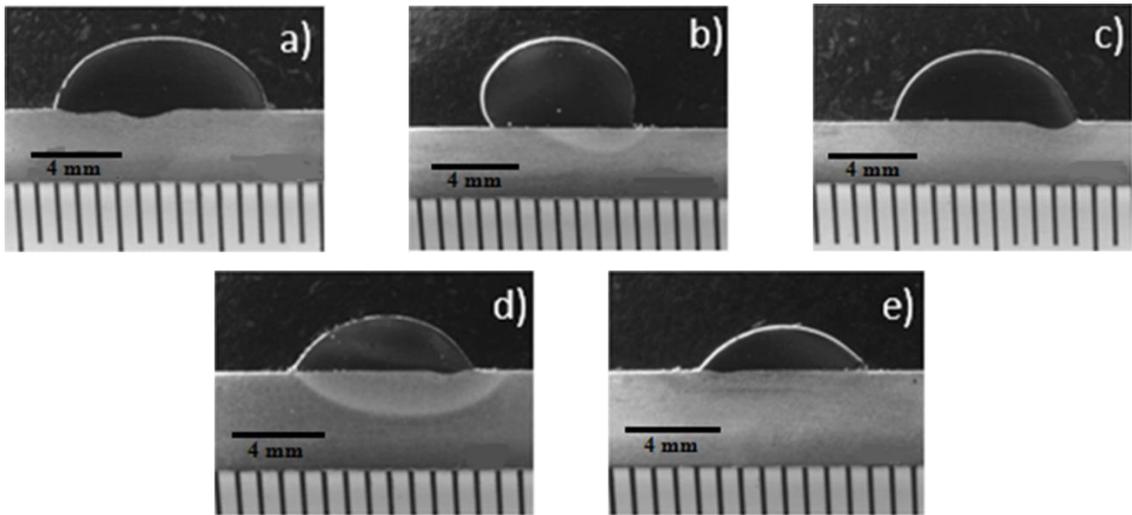


Figura 7.2 Evaluación de la dilución por estereoscopia, a) P1 b) P2 c) P3 d) P6 e) P7.

Basado en el mejor nivel de dilución es seleccionada la muestra 6 porque presenta la geometría del cordón de soldadura adecuado; aunque hay piezas con una dilución menor éstas no poseen la geometría y las propiedades necesarias para un recubrimiento esperado. La microestructura de la muestra 6 se muestra en la Fig. 7.3a muestra la zona de interfaz sin ataque químico, Fig. 7.3b es la zona de interface- zona afectada por el calor- metal base, Fig. 7.3c muestra la microestructura de la zona de interfase con ataque químico mediante microscopía óptica.

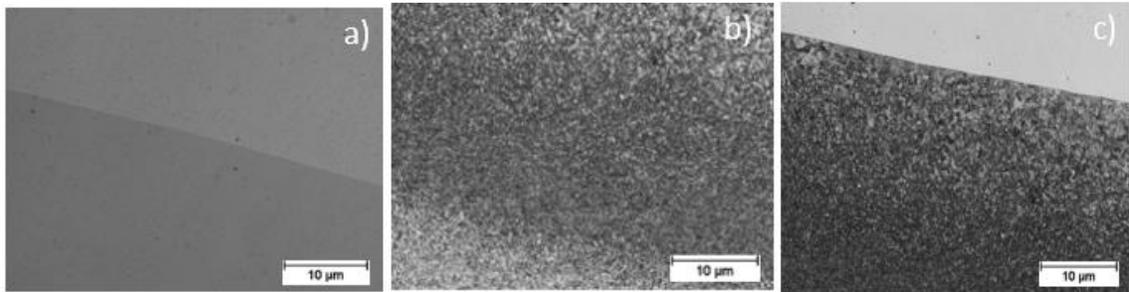
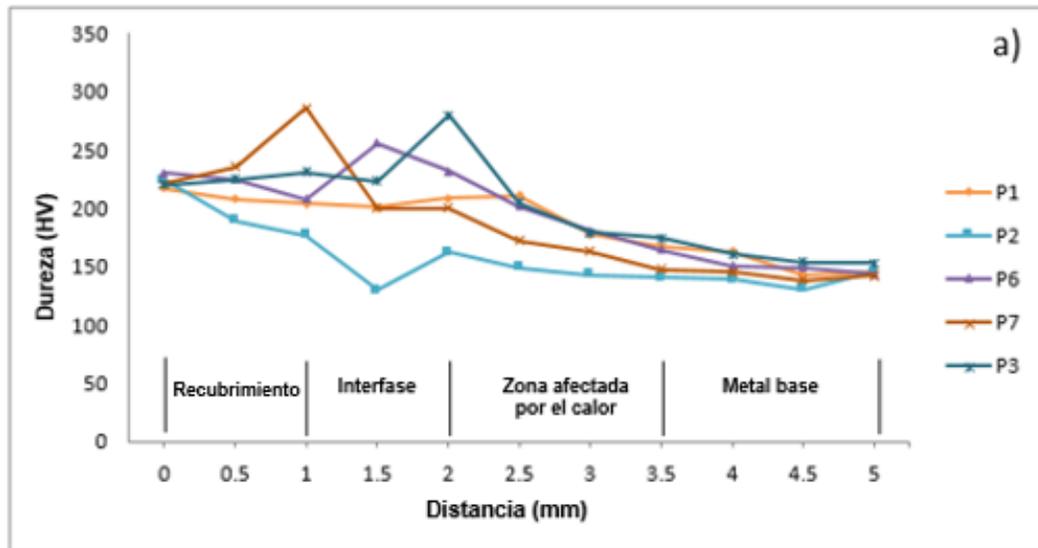


Figura 7.3 Microestructura de la pieza 6 usando microscopia óptica, a) Zona de interfase sin ataque, b) Zona entre Interfase-zona afectada por el calor- metal base y c) Zona de interfase.

Los resultados de la prueba de dureza de las muestras con recubrimiento base Ni (N625) se muestran en la Fig. 7.4a, la microestructura en la Fig. 7.4b ilustra las zonas donde se midió la dureza. La grafica de dureza de la muestra 6 presenta un progreso homogéneo, por lo que de nuevo se comprueba que la muestra 6 muestra la mejor combinación de parámetros, específicamente los parámetros con valores bajos. La muestra 6 no presenta cambios significativos en el perfil de dureza obtenido, pero la dureza del metal base aumenta por el recubrimiento realizado y proporciona una vida más larga al material.



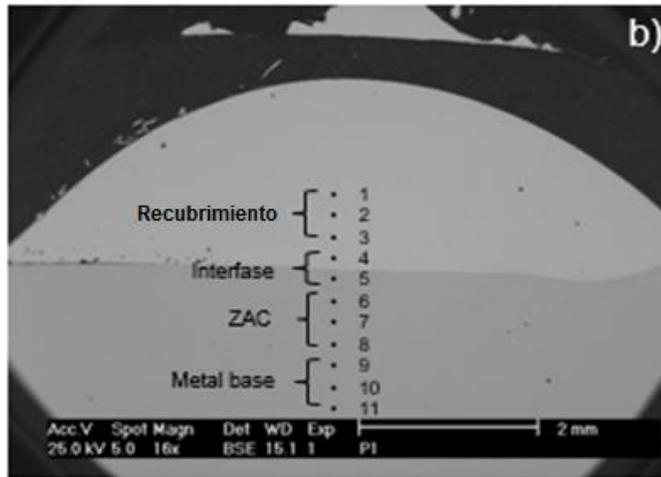
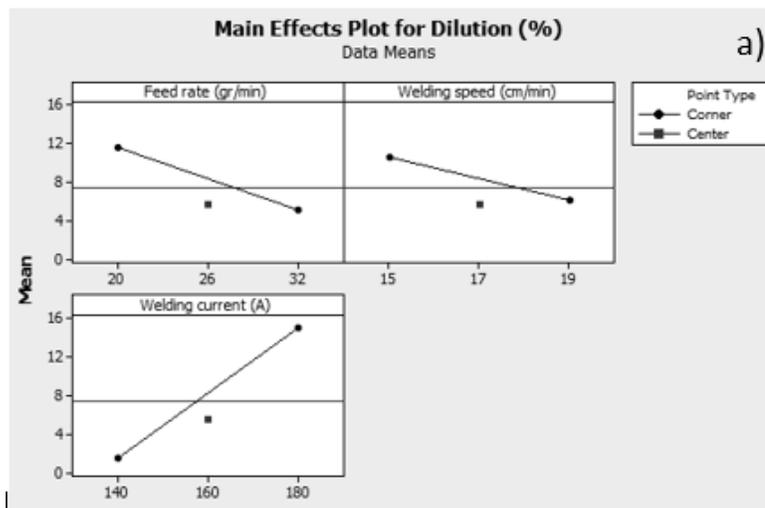


Figura 7.4 a) Perfiles de dureza de los mejores recubrimientos utilizando metal base Ni en acero A36, b) Microestructura que ilustra las zonas de indentación realizadas en las muestras.

En comparación con los resultados de Siva K. y asociados [43], las gráficas de los principales efectos de dilución Fig. 7.5a determinados por el DOE muestran un comportamiento similar en relación al rango de amperaje, cuando el amperaje es bajo, hay una disminución del porcentaje de la dilución.

Esto se atribuye al hecho de que la entrada de calor al metal de base incrementa cuando se aumenta este parámetro. El porcentaje de dilución disminuye constantemente con el aumento de la velocidad de soldadura (S). Esto se atribuye a la entrada de calor reducida por unidad de longitud del cordón de soldadura cuando S se incrementa. [44-45]



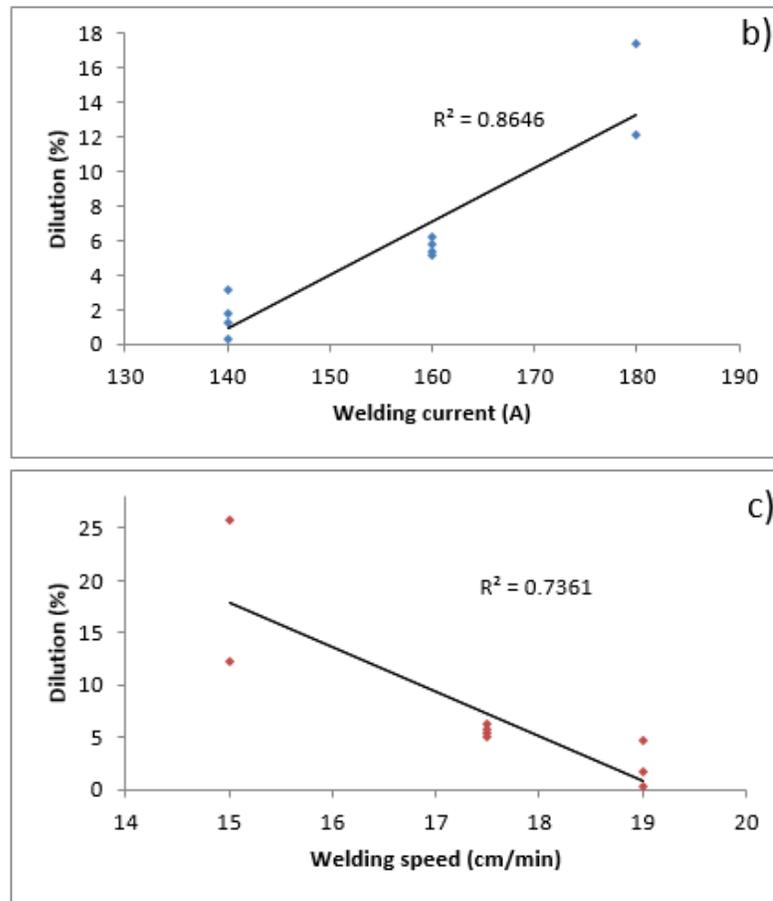


Figura 7.5 a) Gráfica de los efectos principales para la dilución b) Efecto del amperaje sobre la dilución c) Efecto de la velocidad de soldadura sobre la dilución.

Optimización

La función de respuesta que representa cualquiera de las dimensiones del cordón de soldadura se puede expresar como

$$D = f(C, S, F) \quad (9)$$

donde D (dilución) es la respuesta, C la corriente de soldadura (A), S velocidad de soldadura (cm/min), F velocidad de alimentación (gr/min).

El polinomio de segundo orden (regresión) ecuación utilizada para representar la superficie de respuesta para los factores K está dada por:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

Utilizando MINITAB 17 paquete de software estadístico, los coeficientes significativos fueron determinados y dos modelos finales se desarrollaron utilizando dichos coeficientes para estimar el porcentaje de dilución, dureza, y otros valores de los parámetros que permiten un buen cordón de soldadura.

1° Modelo

Tomando en cuenta el DOE de la Tabla 7.3, pero sin utilizar los puntos centrales de la matriz, se obtuvieron los parámetros más significativos y se reflejan en el análisis de la varianza (Tabla 7.4), que arrojó con mayor efecto todos los parámetros como termino lineal y en la interacción entre factores solo tiene efecto significativo la alimentación – amperaje.

Tabla 7.4 Análisis de la varianza

Análisis de varianza					
Fuente	GI	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	4	574.023	143.506	21.56	0.000
Lineal	3	484.343	161.448	24.26	0.000
Alimentación	1	83.819	83.819	12.60	0.009
Velocidad de avance	1	42.141	42.141	6.33	0.040
Amperaje	1	358.383	358.383	53.85	0.000
Interacciones de 2 términos	1	89.680	89.680	13.48	0.008
Alimentación * Amperaje	1	89.680	89.680	13.48	0.008
Error	7	46.583	6.655		
Falta de ajuste	4	45.901	11.475	50.51	0.004
Error puro	3	0.682	0.227		
Total	11				

El modelo matemático final sin tomar en cuenta los puntos centrales está dado por:

$$D = -128.7 + 3.92 F - 1.148 S + 1.060 C - 0.02790 FC \quad (10)$$

donde el valor de predicción que alcanza el modelo anterior se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 7.5 Resumen del 1° modelo N625

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajus)	R-cuad (pred)
2.57966	92.49%	88.20%	66.80%

Para realizar la optimización de los parámetros en base al porcentaje de dilución permitido y mediante la función de deseabilidad para un objetivo seleccionado:

$$d = \begin{cases} 0 & \\ \left(\frac{\hat{y} - bajo}{Objetivo - bajo} \right)^s & \hat{y} < bajo \\ \left(\frac{\hat{y} - alto}{Objetivo - alto} \right)^t & bajo \leq \hat{y} \leq objetivo \\ 0 & objetivo \leq \hat{y} \leq alto \\ & \hat{y} > alto \end{cases} \quad (6)$$

Se toma la función anterior como restricción, los valores asignados están dados de la siguiente manera bajo= 1, objetivo= 1.5, alto= 3. Dichos valores arrojan la siguiente gráfica de optimización:

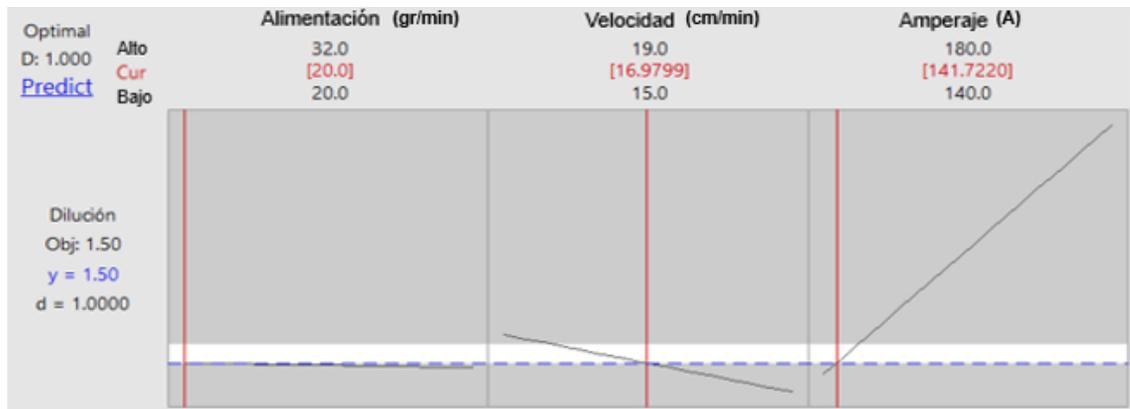


Figura 7.6 Gráfica de optimización 1° Modelo N625

2° Modelo

Se utilizó el mismo diseño de experimentos, pero en esta ocasión si se agregan los valores obtenidos en los puntos centrales, se obtuvo un segundo modelo matemático final, se puede observar en el análisis de la varianza (Tabla 7.6) cuales son los términos con mayor efecto.

Tabla 7.6 Análisis de la Varianza

Análisis de varianza					
Fuente	Gl	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	6	616.686	102.781	131.11	0.000
Lineal	3	484.343	161.448	205.94	0.000
Alimentación	1	83.819	83.819	106.92	0.000
Velocidad de avance	1	42.141	42.141	53.75	0.001
Amperaje	1	358.383	358.383	457.15	0.000
Interacciones de 2 términos	2	112.919	56.459	72.02	0.008
Alimentación * Amperaje	1	89.680	89.680	114.39	0.008
Velocidad de avance * Amperaje	1	23.239	23.239	29.64	0.003
Curvatura	1	19.424	19.424	24.78	0.004
Error	5	3.920	0.784		
Falta de ajuste	2	3.238	1.619	7.13	0.073
Error puro	3	0.682	0.227		
Total	11				

El modelo matemático final tomando en cuenta los puntos centrales está dado por:

$$D = -243.7 + 3.925 F + 5.67 S + 1.784 C - 0.02790 FC - 0.04261 SC - 2.699 Ctral Pt \quad (11)$$

El valor de predicción que alcanza el modelo anterior (Tabla 7.7) es mucho mejor que el del modelo que no toma los puntos centrales, sin embargo, falta verificar los resultados con la optimización y las pruebas reales.

Tabla 7.7 Resumen del 2° Modelo N625

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajus)	R-cuad (pred)
0.885408	99.37%	98.61%	91.46%

De igual manera, se realizó la gráfica de optimización para obtener los parámetros adecuados en función del grado de dilución seleccionado, las restricciones para la función de deseabilidad (6) son las mismas que se aplicaron al modelo anterior, el resultado se puede observar en la Fig 7.7

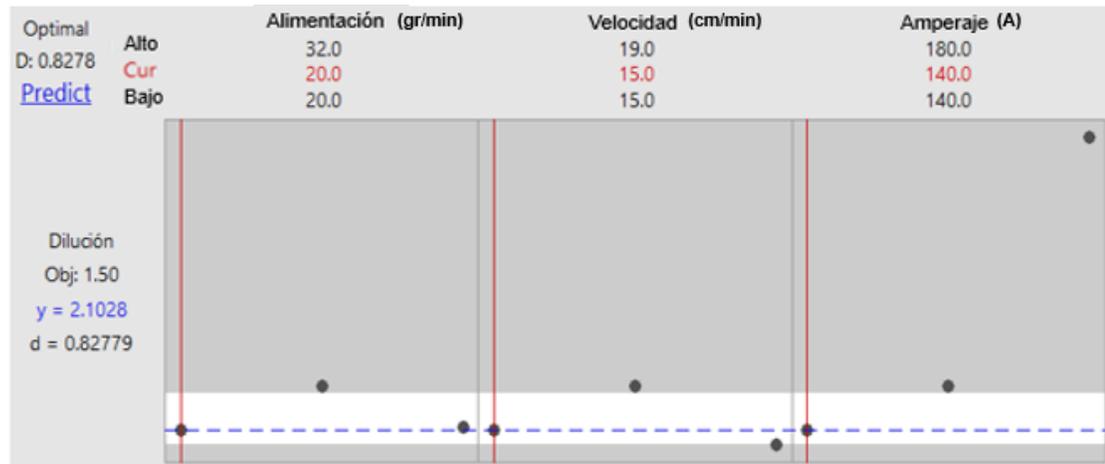


Figura 7.7 Gráfica de optimización 2° Modelo N625

Para verificar la variación entre un modelo y otro se agregan los valores de las predicciones de ambos modelos y se comparan con el valor real obtenido durante la experimentación. Ver la Tabla 7.8

Tabla 7.8 Comparación de modelos respecto a la predicción

Pieza	Tasa de Alimentación	Velocidad de Soldadura	Amperaje	Dilución		
				Real	Predicción (1)	Predicción (2)
1	32	19	180	4.67	5.02	4.32
2	32	19	140	0.27	-1.66	1.06
3	32	15	140	3.19	2.93	2.24
4	32	15	180	12.17	9.62	12.32
5	20	15	180	25.84	22.84	25.48
6	20	15	140	1.24	2.76	2.01
7	20	19	140	1.79	-1.83	0.83
8	20	19	180	17.35	18.25	17.48
9	26	17	160	5.38	7.24	5.51
10	26	17	160	6.22	7.24	5.51
11	26	17	160	5.74	7.24	5.51
12	26	17	160	5.12	7.24	5.51
13	20	16.5	142	1.13	2.04	2.61

Después de obtener los valores de la optimización, se realizaron los recubrimientos correspondientes para posteriormente preparar las probetas que serán utilizadas en las pruebas de desgaste. Las pruebas realizadas son en condiciones similares, están sometidas a cargas de 1 y 5 N, a 3 y 6 mm de radio respectivamente y restringidas ambas pruebas a un cierto número de vueltas (3000 vueltas) para percibir el efecto de mejor manera. Los resultados de la prueba de desgaste se pueden observar en la Tabla 7.9

Tabla 7.9 Resultados de la prueba de desgaste

Muestra	Condición	Radio de esfera (mm)	Carga (N)	Radio de huella (mm)	Ancho promedio de huella (mm)	Volumen perdido en muestra (mm ³)	Tasa de desgaste (mm ³ /Nm)	Coefficiente de Fricción promedio (μk)
Modelo 1	Seco	3	1	3	0.270 ± 0.044	0.01034383	0.000275572	0.764 ± 0.124
		3	5	6	0.819 ± 0.074	0.575325641	0.001529411	0.742 ± 0.084
Modelo 2	Seco	3	1	3	0.332 ± 0.036	0.019206858	0.000511693	0.877 ± 0.060
		3	5	6	0.766 ± 0.025	0.470091544	0.001245504	0.771 ± 0.045

La Fig 7.8 muestra la gráfica del coeficiente de fricción respecto a cada vuelta que se dio durante la prueba, mediante los resultados obtenidos se determinó que el modelo 2 alcanzó un menor coeficiente de fricción lo cual genera mayor resistencia al desgaste.

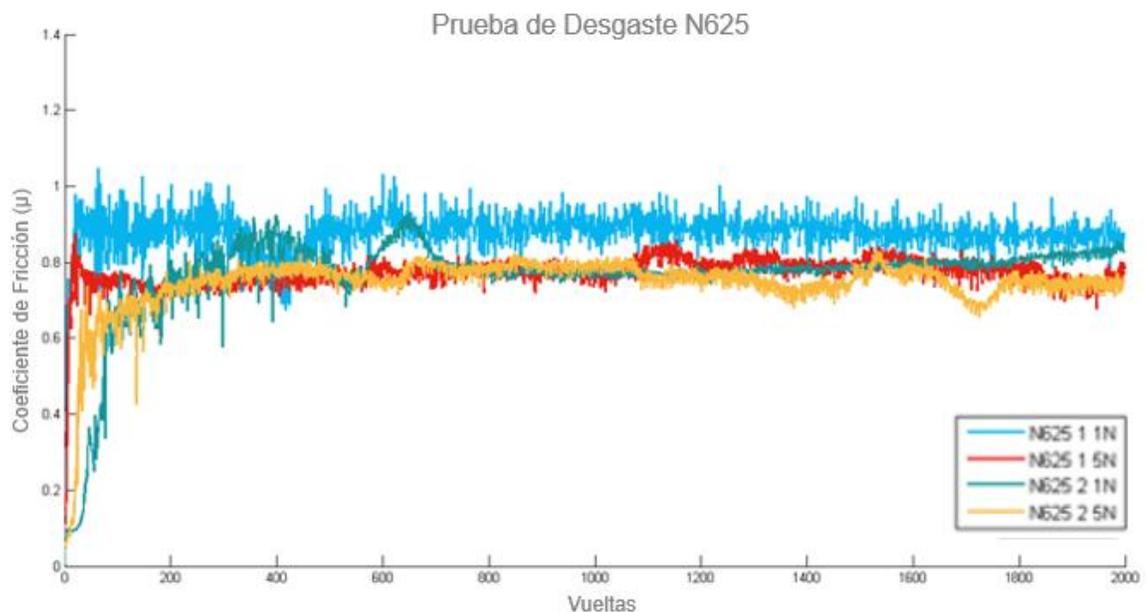


Figura 7.8 Gráfica coeficiente de fricción N625

Para analizar el efecto que tiene la tasa de desgaste (k) y verificar que recubrimiento es más resistente se puede observar la Fig. 7.9. Después de graficar los resultados obtenidos, se obtuvo que los parámetros del modelo 2 permiten al recubrimiento mayor resistencia al desgaste.

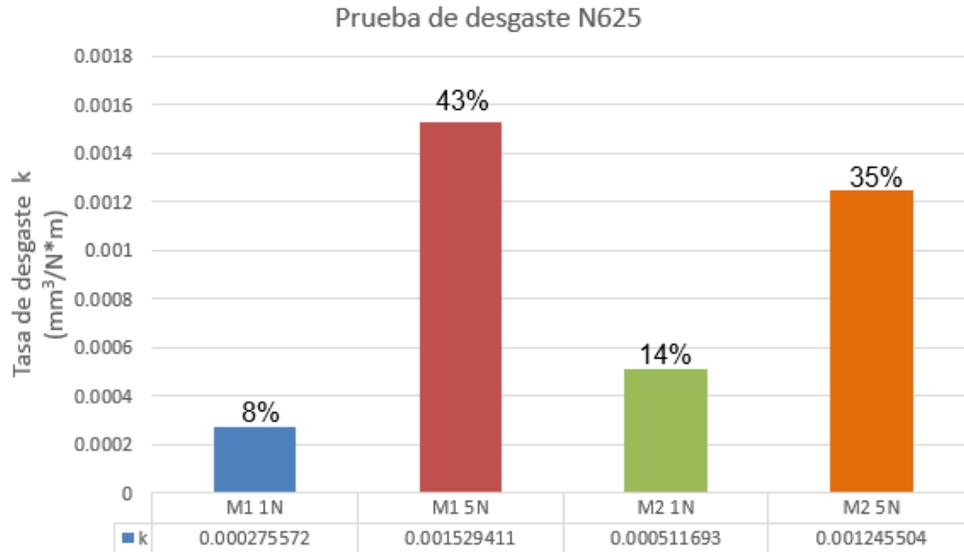


Figura 7.9 Gráfica tasa de desgaste N625

Experimentación 88PTA

Se experimentó con un segundo recubrimiento, es un material base Ni con una aleación principal de W, B y Cr; entre sus propiedades principales se encuentra una alta resistencia a la abrasión.

La matriz del diseño elegido (Tabla 7.11) para llevar a cabo el experimento fue un diseño factorial 2^3 con puntos centrales. Se compone de 12 pasos en condiciones codificadas y comprende un medio de replicación de diseño de $2^3 = 8$ factorial con 4 puntos centrales. Todos los parámetros de soldadura a nivel medio (0) constituyen los puntos centrales, mientras que la combinación de cada parámetro de soldadura en su valor más bajo (-1) o de mayor valor (1). Por lo tanto estos 12 corridas experimentales permiten observar el efecto de los parámetros de soldadura sobre el porcentaje de la dilución.

La siguiente tabla, muestra las diferentes microestructuras obtenidas durante la experimentación, cada una de estas se llevó a cabo bajo distinta combinación de parámetros, esto con la finalidad de crear la matriz para el diseño factorial y analizar los resultados adquiridos.

Tabla 7.10 Microestructuras obtenidas durante la experimentación 88PTA

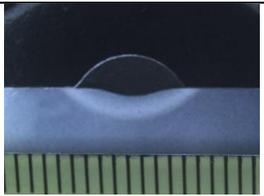
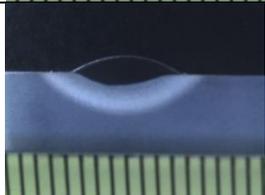
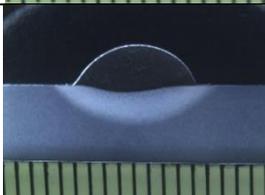
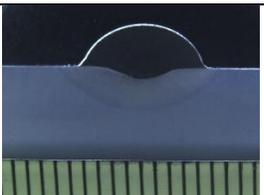
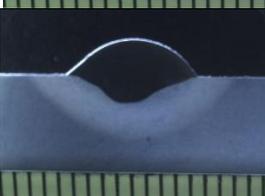
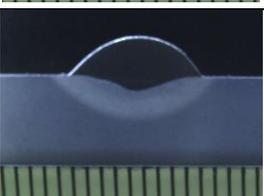
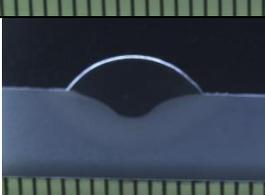
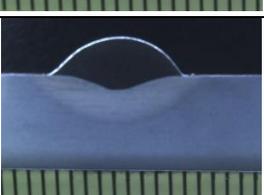
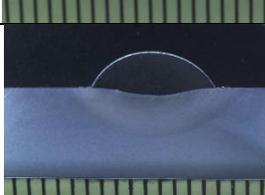
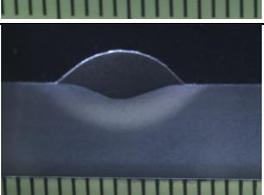
Pieza	Micrografía	Dilución (%)	Pieza	Micrografía	Dilución (%)
1		48.24	7		11.99
2		34.83	8		34.012
3		9.361	9		16.96
4		34.51	10		17.123
5		42.79	11		17.111
6		11.175	12		17.26

Tabla 7.11 Matriz de parámetros del DOE 88PTA

Pieza	Tasa de alimentación (gr/min)	Velocidad de soldadura (cm/min)	Amperaje (A)	Dilución (%)
1	1	1	1	48.24
2	1	1	-1	34.83
3	1	-1	-1	9.361
4	1	-1	1	34.51
5	-1	-1	1	42.79
6	-1	-1	-1	11.175
7	-1	1	-1	11.99
8	-1	1	1	34.012
9	0	0	0	16.96
10	0	0	0	17.123
11	0	0	0	17.111
12	0	0	0	17.26

Los mejores resultados de dilución medidos mediante estereoscopia para las diferentes condiciones de procesamiento se muestran en la Fig. 7.10

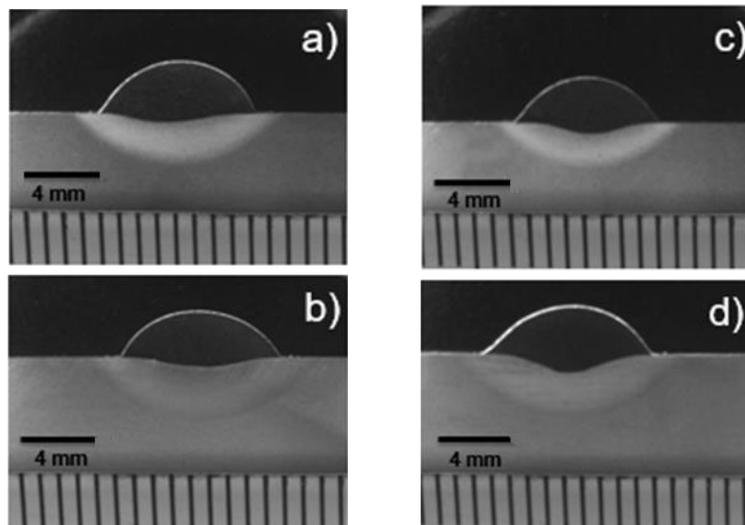


Figura 7.10 Evaluación de la dilución por estereoscopia, a) P3 b) P6 c) P7 d) P11

Los resultados de la prueba de dureza de las muestras con recubrimiento base Ni (88PTA) se muestran en la Fig. 7.11a

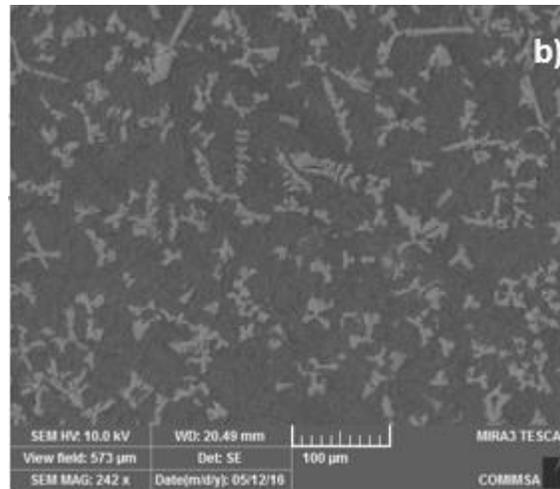
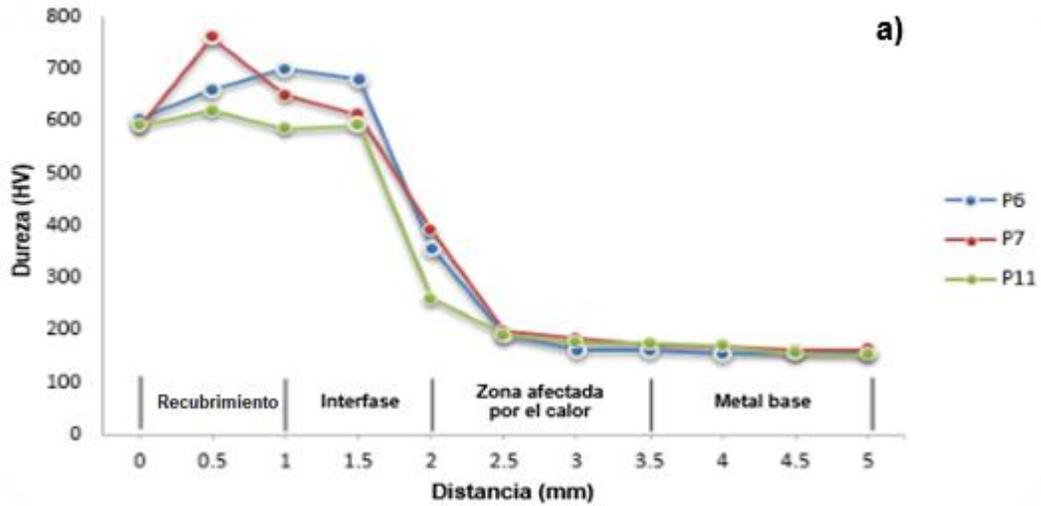


Figura 7.11 a) Perfiles de dureza de los mejores recubrimientos utilizando metal de aporte 88PTA, b) Micrografía del recubrimiento 88 PTA

Los valores de dureza obtenidos son gracias a la formación de carburos de Cr y W, como se puede apreciar en la micrografía (Fig. 7.11b) la matriz de Ni tiene una gran cantidad de carburos que propician el aumento de dureza en el recubrimiento.

Tomando en cuenta el DOE de la Tabla 7.10 y utilizando los puntos centrales de la matriz, se obtuvieron los parámetros más significativos y se reflejan en el análisis de la varianza (Tabla 7.12), que arroja con mayor efecto todos los parámetros en términos lineales, todas las interacciones entre factores y en términos cuadráticos solo tiene efecto significativo la alimentación.

Tabla 7.12 Análisis de la varianza

Análisis de varianza					
Fuente	Gl	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	7	1976.64	282.38	1835.32	0.000
Lineal	3	1275.8	425.27	2764.03	0.000
Alimentación	1	91.02	91.02	591.57	0.000
Velocidad de avance	1	122.04	122.04	793.2	0.000
Amperaje	1	1062.74	1062.74	6907.32	0.000
Cuadrado	1	337.49	337.49	2193.49	
Alimentación * Alimentación	1	337.49	337.49	2193.49	
Interacciones de 2 términos	3	363.36	121.120	787.22	0.008
Alimentación * Velocidad de avance	1	278.15	278.15	1807.84	
Alimentación * Amperaje	1	28.380	28.380	184.46	0.000
Velocidad de avance * Amperaje	1	56.830	56.830	369.36	0.000
Error	4	0.620	0.15		
Falta de ajuste	1	0.57	0.57	37.92	0.009
Error puro	3	0.05	0.02		
Total	11				

1° Modelo

El modelo matemático final tomando en cuenta los puntos centrales está dado por:

$$D = 17.115 + 2.453 F + 2.840 S + 8.382 C + 5.950 F^2 + 3.118 FS - .996 FC - 1.409 SC \quad (12)$$

El valor de predicción que alcanza el modelo anterior (Tabla 7.13) tiene un alto porcentaje de predicción por lo que se podría decir que se tiene un buen modelo, sin embargo, falta verificar los resultados con la optimización y las pruebas reales

Tabla 7.13 Resumen del modelo 88PTA

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajus)	R-cuad (pred)
0.392247	99.97%	99.91%	98.15%

Los valores asignados a las restricciones para la función de deseabilidad (6) en la optimización, están dados de la siguiente manera bajo=11, objetivo=13, alto=17. Con el fin de normalizar los datos y obtener menor variación en los resultados, se optó por codificar o escalonar los datos. Dichos valores arrojaron la siguiente gráfica de optimización:

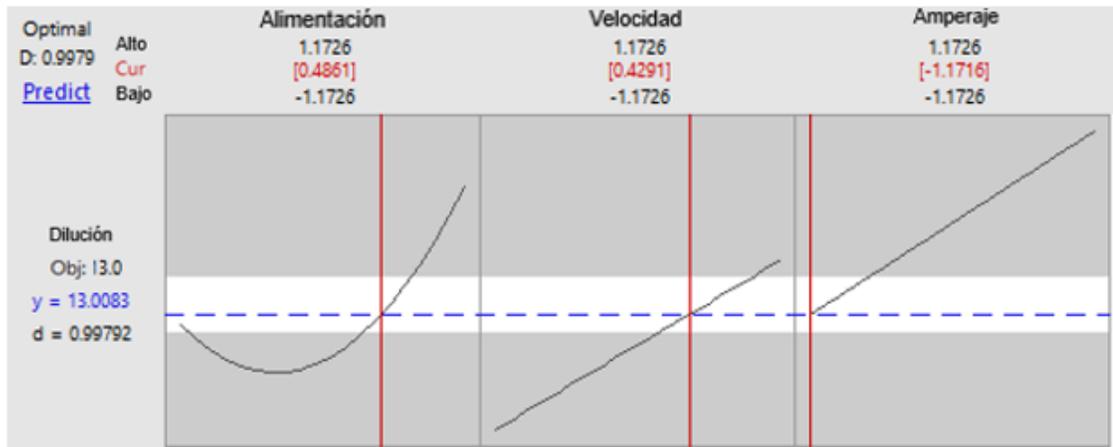


Figura 7.12 Gráfica de optimización 88PTA (1)

Se utilizaron los valores de la gráfica y se regresaron a su estado original (sin codificar), se crea la Tabla 7.14 que arroja una idea más clara del valor de los parámetros del proceso, sin embargo, se puede apreciar que el resultado de la dilución obtenida durante la experimentación es nula y se considera como un mal recubrimiento.

Tabla 7.14 Resultado de optimización 1

Alimentación (gr/min)	Velocidad de soldadura (cm/min)	Amperaje (A)	Dilución %	
			Real	Predicción
29	18	140	.86	13

2° Modelo

Un segundo modelo es obtenido, tiene la misma varianza y la misma predicción que el modelo anterior, con la diferencia de que los términos del modelo tendrán diferente valor.

$$D = 17.115 + 2.877 F + 3.331 S + 9.829 C + 8.182 F^2 + 4.288 FS - 1.370 FC - 1.938 SC \quad (13)$$

Esta segunda combinación de parámetros, arrojo que el valor objetivo es igualmente de 13%, se aplicó nuevamente la función de deseabilidad y se utilizaron las mismas restricciones, y la gráfica de optimización está dada por:

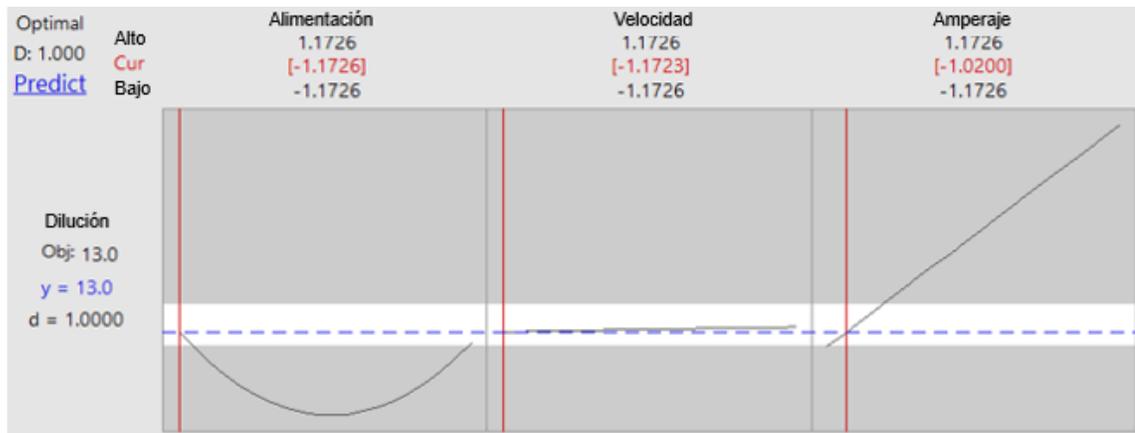


Figura 7.13 Gráfica de optimización 88PTA (2)

Igualmente, los valores fueron codificados y se pueden apreciar los valores originales en la siguiente tabla:

Tabla 7.15 Resultado de optimización 2

Alimentación (gr/min)	Velocidad de soldadura (cm/min)	Amperaje (A)	Dilución %	
			Real	Predicción
20	15	142	12.71	12.99

Ya obtenidos los valores de la optimización, se realizaron los recubrimientos correspondientes, para posteriormente preparar las probetas que fueron utilizadas en las pruebas de desgaste. Las pruebas se realizaron en condiciones similares, estuvieron sometidas a cargas de 5 y 10 N, a 3 y 6 mm de radio respectivamente y restringidas ambas pruebas a un cierto número de vueltas (3000 vueltas) para percibir el efecto de mejor manera. Los resultados de la prueba de desgaste se pueden observar en la Tabla 7.16

Tabla 7.16 Resultados de la prueba de desgaste 88PTA

Muestra	Condición	Radio de esfera (mm)	Carga (N)	Radio de huella (mm)	Ancho promedio de huella (mm)	Volumen perdido en muestra (mm ³)	Tasa de desgaste (mm ³ /Nm)	Coefficiente de Fricción promedio (μk)
Modelo 1	Seco	3	5	3	0.108 ± 0.076	0.000664432	0.000002352	0.607 ± 0.11
		3	10	6	0.112 ± 0.011	0.00147451	0.000002639	0.505 ± 0.08
Modelo 2	Seco	3	5	3	0.198 ± 0.012	0.004061916	0.000014323	0.345 ± 0.10
		3	10	6	0.192 ± 0.041	0.007467327	0.000006605	0.323 ± 0.09

La Fig. 7.14 muestra la gráfica del coeficiente de fricción respecto a cada vuelta que se dio durante la prueba, se pudo determinar que el modelo 2 obtuvo mayor resistencia al desgaste, ya que entre menor sea el coeficiente de fricción aumentara la resistencia al desgaste.

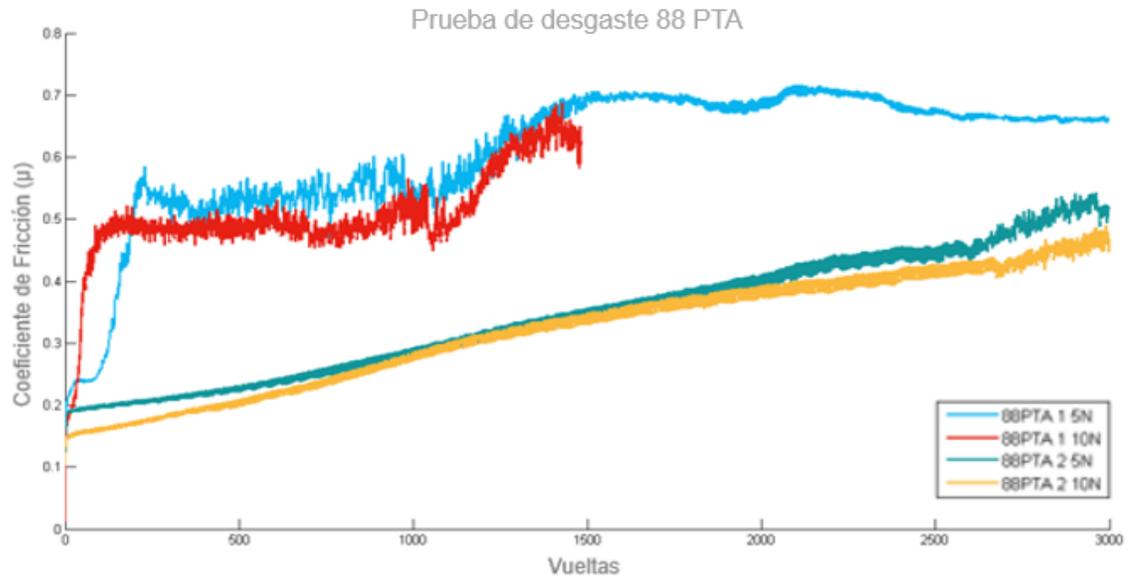


Figura 7.14 Gráfica coeficiente de fricción 88PTA

Al analizar el efecto que tiene la tasa de desgaste (k) en la Fig. 7.15, se observó que el modelo 1 tiene mayor resistencia al desgaste, entre menor sea la tasa de desgaste se aumentara la resistencia al desgaste del material.

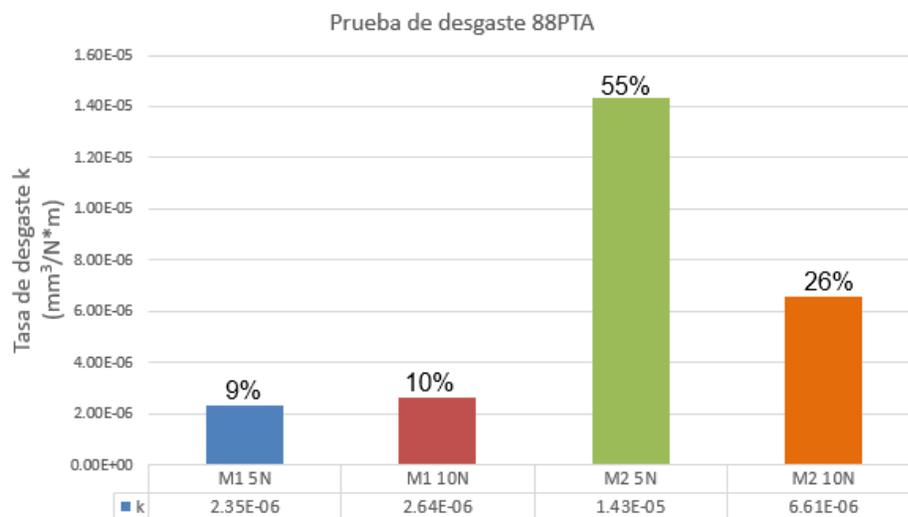


Figura 7.15 Gráfica tasa de desgaste 88PTA

Sin embargo, aunque el modelo 1 presenta menor tasa de desgaste (0.000002352 y 0.000002639 mm^3/Nm), se descarta el recubrimiento debido a la poca dilución (0.86 %) que presentó y al gran número de grietas que presentó la superficie del recubrimiento. Si se toma en cuenta el menor coeficiente de fricción (0.345 y 0.323 μk) alcanzado durante la prueba de desgaste, el mejor recubrimiento sería el del modelo 2, obteniendo mayor resistencia al desgaste. Se puede apreciar en la figura 7.16 las huellas de desgaste generadas después del ensayo pin on disk, y con ello se comprueba lo anteriormente mencionado.

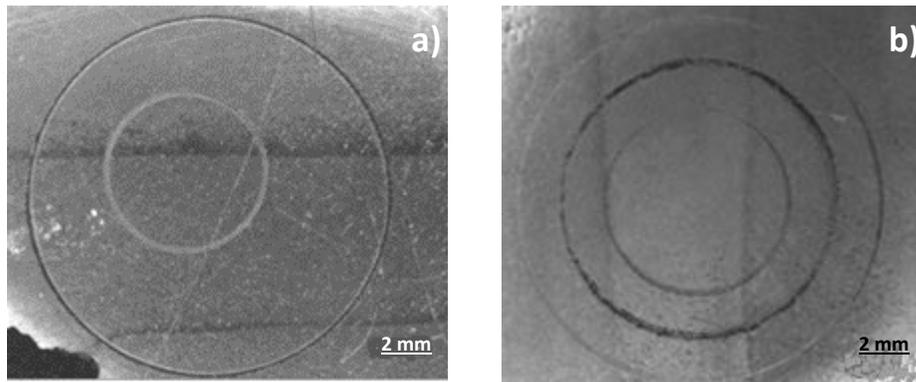


Figura 7.16 Huella de desgaste a) Modelo 1, b) Modelo 2

Capítulo 8

Conclusiones

- Los parámetros con mayor influencia en el proceso de PTA basado en el estado del arte son: Tasa de alimentación, velocidad de soldadura, amperaje y la distancia tobera-pieza.
- Si no se tiene un grado de dilución adecuado, se corre el peligro de que el recubrimiento realizado se desprenda con facilidad
- Mediante una metodología de superficies de respuesta aplicada a un diseño 2^3 con 4 puntos centrales y utilizando como restricción una función objetivo fue posible optimizar los parámetros utilizados en el proceso de PTA en función de la dilución.
- El efecto que tienen los valores de los parámetros respecto al porcentaje de dilución obtenido es:
 - El porcentaje de dilución incrementa con el aumento del amperaje debido a que la entrada de calor es mayor.
 - El porcentaje de dilución disminuye con el aumento de la velocidad de soldadura, ya que esta determina el ancho y profundidad del cordón de soldadura.
 - El porcentaje de dilución incrementa si la distancia tobera-pieza es mayor
- Se considera la tasa de alimentación como un factor importante en el proceso por PTA debido a la relación que tiene entre el amperaje y la velocidad de soldadura, si la alimentación es alta se necesita mayor amperaje y velocidad, y viceversa.

- Las condiciones óptimas para obtener un buen recubrimiento en función de un bajo porcentaje de dilución, alta dureza y mejor resistencia al desgaste son:
 - Para el recubrimiento con N625: Amperaje (140 A), Tasa de alimentación (20 gr/min), Velocidad de soldadura (19 cm/min).
 - Para el recubrimiento con 88PTA: Amperaje (142 A), Tasa de alimentación (20 gr/min), Velocidad de soldadura (19 cm/min).

9. Referencias

1. Singh H., Jain P. K. (2015) Past, present and future - the characterization of surface topography of plasma transferred arc coatings. INCAM 321-326
2. Balamurugan S, Murugan N (2013) Simulation of plasma transferred arc (PTA) hardfaced on structural steel with titanium carbide. J Eng Comput Appl Sci 2; 10-14
3. Macías López F. Soldadura robótica automatizada COMIMSA centrosconacyt.mx/objeto/soldadura
4. <http://www.stellite.com/Portals/0/HARDFACING%20ALLOYS%20-%20SPANISH.pdf>
5. <http://usuarios.fceia.unr.edu.ar/~adruker/Clasificaci%F3n%20de%20aceros%20Mat%20y%20Pro.pdf>
6. WallColmonoy Properties of colmonoy 88 fused thermal spray coatings
7. Lucas W (1990) TIG and PLASMA Welding, Abington Publishing, Cambridge
8. Box, G. E. P., Wilson, K. G. (1951), On the experimental attainment of optimum conditions, Journal of the Royal Statistical Society, B 13, 1-45
9. Statpoint Inc. (2006) Optimización de múltiples respuestas, Statgraphics, 1-16
10. Montgomery, D. C. (2002), Diseño y Análisis de Experimentos, Editorial Limusa, Segunda Edición.
11. ASTM. G 99-90. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin on Disk Apparatus. ASTM. 1990.
12. Silva Prasad K, Srinivasa Ch, Nageswara D (2011) Prediction of weld bead geometry in plasma arc welding using factorial design approach. J Miner Mater Charact Eng 10;875-886

13. Wu C, Wang L, Ren W, Zhang X (2014) Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling Journal of Manufacturing Processes, Volume 16, Issue 1, pp. 74–85
14. Shane F, Mushtaq K, Syed I (2015) Optimization of process parameters for plasma arc welding of austenitic stainless steel (304 L) with low carbon steel (A-36) J Materials: Design and Applications 0(0) 1–14
15. Vergara V, Dutra J, Climaco S (2011) Hardfacing by plasma transferred arc process, InTech, Croatia
16. Mohan, K, Muragan, N (2009) Effects of Plasma Transferred Arc Welding Parameters on Bead Geometry in Tungsten Carbide Hardfacing, Journal for Manufacturing Science and Production, 10(3–4), 155–168
17. Jivrag A, Pople S, (2010) Erosion Wear Behavior of Inconel 625 Plasma Transferred ArcWeld (PTAW) Deposits using Air Jet Erosion Tester, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, Vol II, WCECS 2010, 2010, 20–22
18. Jiang Z, Li, Zeng J, Liao X, Yang D, (2011) On the Hardfacing Performance Optimization after Plasma Transfer Arc Experiments, Advanced Materials Research, 189–193, 3640–3646
19. Srimanth N, Murugan N, (2011) Prediction and Optimisation of Weld Bead Geometry of Plasma Transferred Arc Hardfaced Valve Seat Rings, European Journal of Scientific Research, 51(2), 285–298
20. Siva K, Srinivasa Ch, Nageswara R (2012) Review on application of response surface method based design of experiments to welding processes J. Manuf. Sci. Prod., Vol. 12, pp. 17–24
21. Balamurugan S, Murugan N (2014) Design of experiment and optimization of plasma transferred arc hardfacing on structural steel with titanium carbide Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(11): 2362-2370
22. Balamurugan S, Murugan N (2014) A wear study on plasma transferred arc hardfaced structural steel with titanium carbide. World Journal of Modelling and Simulation Vol. 10 (2014) No. 2, pp. 108-115
23. Dasgupta B, Mukherjee S (2013) Optimization of Weld Bead Parameters of Nickel Based Overlay Deposited By Plasma Transferred Arc Surfacing

International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vol.3,
Issue.3, pp-1330-1335

24. Mohan K, Murugan N, Kannan T, Krishna G (2013) Modeling of dilution in plasma transferred arc hardfacing International. Journal of Information Technology & Computer Sciences Perspectives Volume 2, Number 1 pp. 263-266
25. Ravichandran M, Sabarirajan N, Sathish T (2016) Effect of welding parameters on mechanical properties of plasma transferred arc welded SS 202 plates. Applied mechanics and materials, Vol. 852, pp. 324-330
26. Guoqing Ch, Xuesong F, Yanhui W, Shan L, Wenlong Z (2013) Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding Surface and Coatings Technology Volume 228, Supplement 1, pp. 276–282
27. Zikin A , Ilo S, Kulu P, Hussainova I, Katsich Ch, Badisch E (2012) Plasma Transferred ARC (PTA) Hardfacing of Recycled Hardmetal Reinforced Nickel-matrix Surface Composites Materials Science (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 18, No. 1. pp. 12-17
28. Fisher G, Wolfe T, Meszaros K (2013) The Effects of Carbide Characteristics on the Performance of Tungsten Carbide-Based Composite Overlays, Deposited by Plasma-Transferred Arc Welding Journal of Thermal Spray Technology, Volume 22, Issue 5, pp 764–771
29. Tosun G (2014) Coating of AISI 1010 Steel by Ni–WC Using Plasma Transferred Arc Process Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 39, Issue 4, pp 3271–3277
30. Deng D , Xia H, Ge Y (2013) Influence of Welding Currents on Microstructure and Microhardness of Ni45 Alloy Reinforced with Spherical Tungsten Carbides (40 mass%) by Plasma Transferred Arc Welding Materials Transactions, Vol. 54, No. 11 pp. 2144-2150
31. Scheid A, Oliveira A (2013) Analysis of PTA hardfacing with CoCrWC and CoCrMoSi alloys Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 18, N^o. 04, p.322-328
32. García F, Aguirre A, Arizmendi A, Hernández H, Santiago L (2013) Analysis of weld bead parameters of overlay deposited on D2 steel components by

plasma transferred arc (PTA) process Materials Science Forum Vol. 755 pp 39-45

33. Ferreira L, Graf K, Scheid A (2015) Microstructure and Properties of Nickel-based C276 Alloy Coatings by PTA on AISI 316L and API 5L X70 Steel Substrates Materials Research. 18(1): 212-221
34. Dewei D, Rui Ch, Qi S, Xiaona L (2015) Microstructural study of 17-4PH stainless steel after plasma transferred arc welding MDPI, 8, pp. 424-434
35. Antoszczyszyn T, Gabriel R, Oliveira A, Scheid A (2014) Impact of dilution on the microstructure and properties of Ni-based 625 alloy coatings Soldag. Insp, vol.19 no.2 São Paulo
36. Fernandes F, Lopes B, Cavaleiro A, Ramalho A, Loureiro A (2011) Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. Journal of Surface & Coatings Technology, 205, 4094-4106
37. Dewei D , Jun L, Xiaona L (2013) The Effect of Arc Current on the Microstructure and Wear Characteristics of Stellite12 Coatings Deposited by PTA on Duplex Stainless Steel Materials Transactions, Vol. 54, No. 9, pp. 1851-1856
38. Feng J, Pan Ch, Lu L, Huang Q (2016) Plasma transferred arc surface alloying of Cr-Ni-Mo powders on compacted graphite iron. Journal of iron and steel research, international Vol. 23 pp. 618- 624
39. Eschnauer H (1980) Hard material powders and hard alloy powders for plasma surface coating, Thin Solid Films 73 1-17
40. Das CR, Albert SK, Bhaduri AK, Kempulraj G (2003) A novel procedure for fabrication of wear-resistant bushes for high-temperature application. J Mater Process Technol 141; 60-66
41. Gunaraj V, Murugan N (1999) Prediction and comparison of the area of the heat -affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes. J Mater Process Technol 95; 246-261
42. Kou S (2002) Welding Metallurgy, 2nd edn. Wiley, Hoboken, NJ.
43. Siva K, Murugan N, Raghupathy VP (2009) Modeling, analysis and optimization of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing. Int Sci J 1; 174-182

44. Balasubramian V, Babu S, Lakashminarayanan AK (2008) Understanding the parameters controlling plasma transferred arc hardfacing using response surface methodology. Mater Manuf Process 23; 674-682 (Taylor and Francis group)
45. Wilden J, Bergmann JP, Frank H (2006) Plasma transferred arc welding modeling and experimental optimization. J Therm Spray Technol 15(4); 779-784 (ASM International)