

**MODELACION DEL AREA DE REFUERZO DEL CORDON DE SOLDADURA
APLICANDO EL PROCESO DE PLASMA TRASFERIDO POR ARCO PTA**

**MODELLING REINFORCEMENT AREA OF THE WELD BEAD USING PLASMA
TRANSFERRED ARC PROCESS**

A. Aguirre¹, F. García-Vázquez¹, A. Arizmendi², R. Praga¹

¹Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), Calle ciencia y tecnología No. 790, Col. Saltillo 400, cp. 25290, Coahuila, México.

aaquirre@comimsa.com

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Alianza Norte 202. Parque de Investigación e Innovación Tecnológica. Apodaca, Nuevo León, México. C.P. 66600

RESUMEN

En la actualidad la recuperación de componentes de acero grado herramienta es una necesidad del sector industrial en constante crecimiento, ya que debido a la presencia de empresas de nivel mundial, se cuentan con equipos y maquinaria extranjera la cual requiere de constante mantenimiento de componentes desgastados. El proceso de plasma trasferido por arco PTA es un proceso muy versátil con una calidad metalúrgica alta y un bajo costo. El PTA permite una medición precisa de material de aporte en forma de polvo metálico. Dando como resultado una menor cantidad de material utilizado en comparación con otros procesos de soldadura tradicionales, en este trabajo se presenta la optimización del área de refuerzo del cordón de soldadura aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA.

ABSTRACT

Nowadays the refurbishment of tool steel components is a requirement of the industrial sector due to the presence of global companies there are foreign machinery and equipment which require constant maintenance of components subjected to wear. Plasma transferred arc (PTA) hardfacing is a versatile process of depositing high quality metallurgically fused deposits on low cost surfaces. PTA allows precise metering of metallic powder feedstocks. As a result a lesser quantity of material is used when compared to other traditional welding processes. This paper presents the optimization of the reinforcement of the weld bead area applying plasma transferred arc PTA process on D2 tool steel.

1. INTRODUCCIÓN

La siguiente investigación se realizó sobre un acero grado herramienta D2 con aporte base Fe con Cr, Nb, aplicando en proceso de Plasma transferido por arco PTA el cual presenta características de dilución mejores que las de otros procesos [1]. En el sector industrial global existe en la actualidad una creciente demanda en la recuperación de componentes de acero grado herramienta los cuales tienen un alto costo ya que generalmente son componentes de origen extranjero esto genera la necesidad de ofrecer como alternativa de recuperación de componentes de acero grado herramienta, uno de los procesos que presenta una dilución más baja es el proceso de plasma trasferido por arco PTA [2]. Cuando se realiza un traslape de cordones de soldadura para una recuperación de un componente es importante controlar y conocer el área de refuerzo del cordón de soldadura, ya que depende de la característica del área de refuerzo el porcentaje de traslape de los cordones de soldadura [3] y en consecuencia el rendimiento y la optimización de los mismos al evaluar el volumen depositado en el sustrato [4]. Por lo que en este trabajo se muestran los parámetros recomendados para tener las mejores características del área de refuerzo.

2. EXPERIMENTACIÓN

Mediante un estudio preliminar se obtuvieron los parámetros adecuados para la soldabilidad de este acero grado herramienta utilizando los parámetros que causan mayor impacto en la soldadura. Se generó una superficie de respuesta que proviene de un diseño central compuesto dando como resultado 11 pruebas a realizar sin replicas, donde la experimentación consiste en un sustrato D2 con aporte base Fe en forma de polvo con el equipo de PTA. Estas pruebas se realizaron con un equipo automatizado.

En la tabal 1 se muestra la composición química del metal base y del aporte.

Tabla 1. Composición química del aporte y del metal base.

Composición química (% e.p.)										
C	B	W	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe	V
Metal base										
1.55	—	—	0.35	0.35	11.5	—	0.8	—	—	0.8
Aporte base Fe										
—	—	—	—	—	10.4	—	—	4.8	—	—

Después del estudio previo para evaluar cuales son las variables que causan mayor impacto en el proceso de plasma trasferido por arco PTA se encontraron que son al amperaje y la velocidad de avance de deposición del aporte en forma de polvo, las variables utilizadas como constantes se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros fijos utilizados para la experimentación.

Parámetros	Valores
Corriente pulsada piloto	15 A
Flujo de gas de protección	13 lpm
Flujo de gas de arrastre	3.0 lpm
corriente inicial	5A
Bajada (slope)	2
Corriente externa limite	200A
Pregas y pos gas	2 seg
Altura de la antorcha	10 mm
Velocidad alimentación de polvo	40%
Refrigerante agua	1.9 L/min
Pre calentamiento	350 grados

En la tabla 3 se observan las variables de estudio y los rangos de las variables planteados para su análisis.

Tabla 3. Parámetros de estudio.

variables	Parámetros	
amperaje (A)	75	95
Velocidad (m/min)	0.6	1

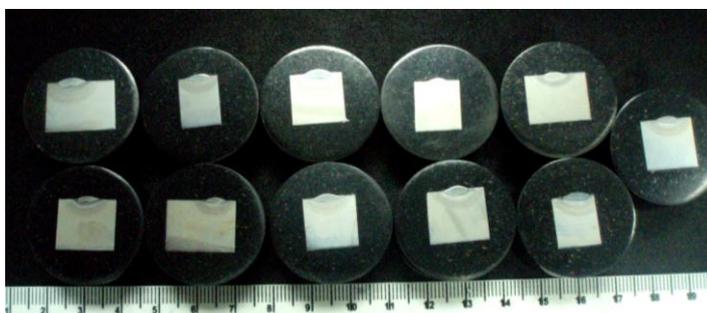


Figura 1. Cordones de soldadura cortados y montados para su análisis.

En la figura 1 se observan las muestras las cuales fueron cortadas mecánicamente y se montaron en baquelita y se atacaron con vilellas para su análisis en el estereoscopio donde fueron medidas las características del cordón del soldadura área de refuerzo ancho y alto del cordón [5].

En el laboratorio de metalografía se realizó la caracterización, para poder medir las características del cordón de soldadura área de refuerzo como se muestra en la figura 2, para realizar la medición se utilizó el estereoscopio marca olympus szx10 equipado con una cámara olympus LG-PS2-5 (yahata) y un software infinity 2 para hacer las mediciones del cordón de soldadura área de refuerzo.

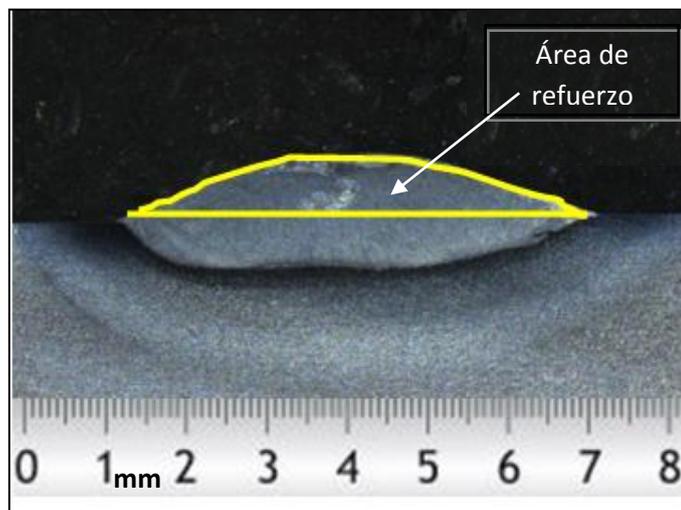


Figura 2. Área de refuerzo medida para la experimentación.

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de las pruebas, en las cuales se evaluó el área de refuerzo del cordón de las 11 pruebas, utilizando un software estadístico se graficó para evaluar el impacto de las variables con respecto al área de refuerzo del cordón de soldadura el cual es de vital importancia para un recubrimiento por el porcentaje el traslape de cordones de los recubrimientos.

Tabla 4. Coeficientes de regresión estimados del área de refuerzo_1.

Término	coeficientes	Coeficientes del error	T	P
Constante	27120.8	2546	10.653	0
Amperaje	3584.2	2205	1.626	0.165
Velocidad	-14454.7	2205	-6.556	0.001
Amperaje*Amperaje	105.6	3711	0.028	0.978
Velocidad*Velocidad	12018.1	3711	3.238	0.023
Amperaje*Velocidad	3999.2	4409	0.907	0.406

Estadísticamente las variables que causa mayor efecto en el proceso son la velocidad y la velocidad al cuadrado ya que sus valores de p son menores a 0.05.

Modelo del área de refuerzo

Donde A= Área y V= Velocidad

$$\text{Área de refuerzo} = 27120.8 + 3584.2A - 14454.7V + 105.6A^2 + 12018.1V^2 + 3999.2A*V$$

El modelo del área de refuerzo presento una R² ajustada de 84% lo que representa su similitud con la realidad o con sus valores reales arrojados en cada experimentación

En la tabla 5 se muestra el análisis de varianza del área de refuerzo donde los valores de P no exceden el valor de 0.05 lo cual hace que el modelo sea aceptable, la falta de ajuste está por encima de 0.05 por lo que el modelo se considera estadísticamente aceptable para poder predecir y optimizar [2].

Tabla 5. Análisis de varianza del área de refuerzo del cordón de soldadura.

Fuente	GL	SC Sec.	MC Ajustada	F	P
Regresión	5	1125036561	225007312	11.57	0.009
Lineal	2	886966112	443557535	22.81	0.003
Cuadrado	2	222077849	111038924	5.71	0.051
interacción	1	15992601	15992601	0.82	0.406
Error residual	5	97212991	19442598		
Falta de ajuste	3	27901624	9300541	0.27	0.846
Error puro	2	69311367	34655684		

En la figura 3 de contornos se trazan las curvas de los niveles de las respuestas constantes del plano X1, X2. Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta [7].

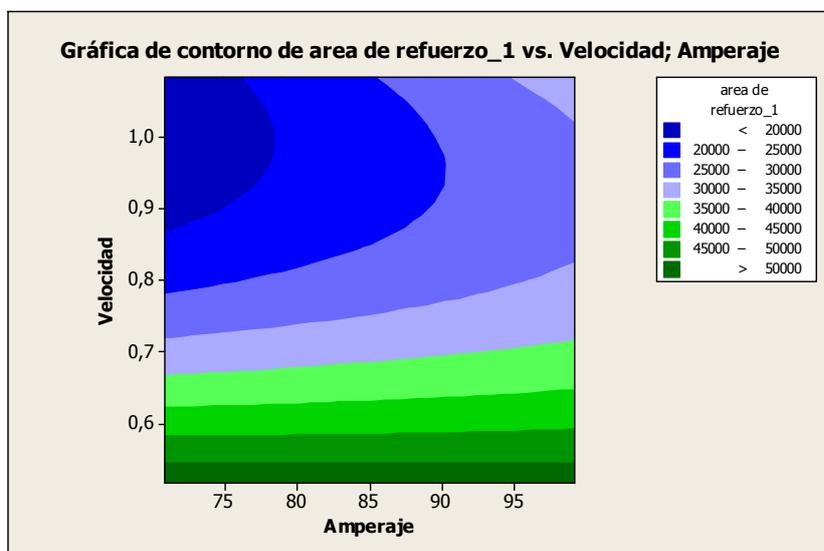


Figura 3. Gráfica de contornos del área de refuerzo vs velocidad y amperaje.

En la figura 4. Se presenta el impacto que tiene el amperaje y velocidad en el área de refuerzo, lo cual representa el área de refuerzo del cordón de soldadura que tenga las mejores características microestructurales y mecánicas mostrando como resultado del análisis del modelo una $S = 4409,38$, un $PRESS = 354374081$ y con una $R^2 = 92,05\%$ la cual se obtiene de ssr (suma de cuadrados del regresión) entre sst (suma de cuadrados totales) y una R^2 ajustada de $84,09\%$, lo cual genera que el modelo sea representativo con una buena similitud de los valores reales de amperaje y velocidad que se utilizaran si se realizaran las pruebas.

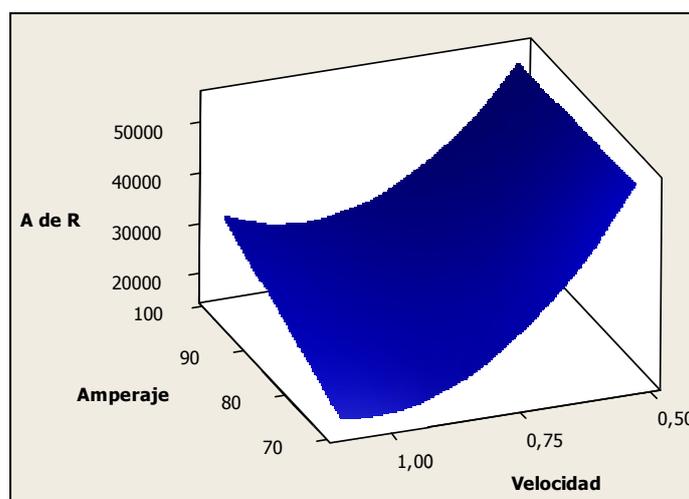


Figura 4. Gráfica de superficie del área de refuerzo vs velocidad y amperaje.

Conforme a la grafica de contornos mostrada en la figura 3 donde se muestra que para una velocidad de 0,6 el valor del amperaje casi no importa, pero basado en la caracterización de las muestras se encontró que las características de la muestra 11 presentaron mejores características mecánicas y microestructurales [7].

En la tabla 6 se muestran los parámetros utilizados para la optimización del área de refuerzo del cordón de soldadura los cuales fueron sacados de la muestra 11 que presento un área de 42127,0 y las mejores características metalúrgicas y mecánicas.

Utilizando un software estadístico para realizar la optimización aplicando la técnica de la función de deseabilidad la cual se enfoca en una respuesta objetivo captada durante la experimentación donde:

Área de refuerzo objetivo =42127,0

Esta técnica está sujeta a la siguiente condición.

$$\begin{aligned}
 1) \quad d_i &= ((\hat{y}_i - L_i)/(T_i - L_i))^{r_i} & L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \\
 2) \quad d_i &= (H_i - \hat{y}_i)/(H_i - T_i)^{r_i} & T_i \leq \hat{y}_i \leq H_i \\
 3) \quad d_i &= 0 & \hat{y}_i < L_i \\
 4) \quad d_i &= 0 & \hat{y}_i > H_i
 \end{aligned}$$

Donde la ecuación 2 cumple con la condición $42127,0 \leq 42342,0 \leq 56038,1$

Tabla 6. Parámetros planteados para la optimización.

Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importar
Área de refuerzo	40977.1	42127.0	56038.1	1	1

El valor objetivo de 42127.0 fue sacado de la muestra que no presento fractura y que sus características mecánicas y metalúrgicas fueron las mejores, el valor inferior de 40977.1 el cual se tomo como límite inferior de las muestras aceptables, el valor superior de 56038.1 se obtuvo del límite superior en donde las muestras que no fracturaron.

Los parámetros obtenidos mostraron como resultado una solución global con un valor de amperaje de 70,8578 A y una velocidad de avance de 0,602812 m/min, con una respuesta pronosticada del área de refuerzo de 42342,0 y una valor de conveniencia $d_i = 0.984544$ lo cual indica que la optimización es aceptable ya que los valores de aceptabilidad son 0-1 donde $d_i = 0$ no es aceptable y un d_i cercano a 1 o 1 es un modelo aceptable.

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Después de la evaluación del área de refuerzo se caracterizó el aporte del cordón de soldadura. En la figura 5a tomada a 500x se observa la composición microestructural la cual está formada típicamente por partículas angulares de carburos (Cr, Nb), dentro de una matriz aglutinante relativamente blanda (a base de Fe), donde se puede observar más a detalle la distribución de los carburos en la figura 5b.

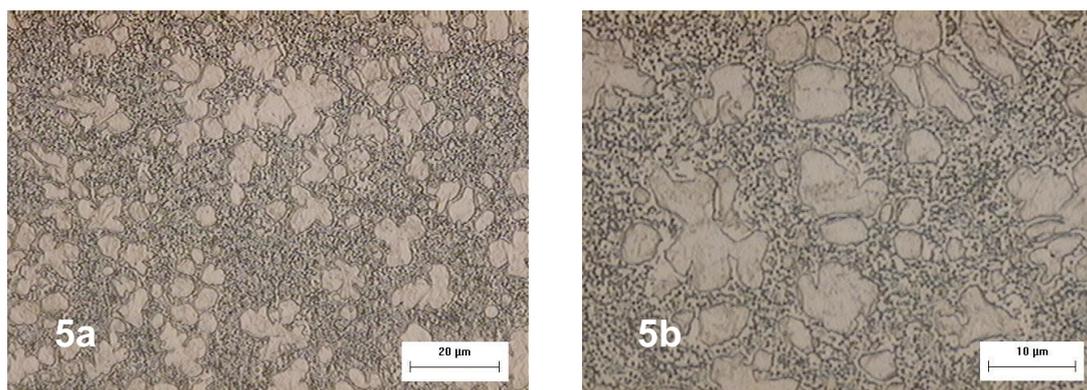


Figura 5. a) microestructura del aporte a 500x, b) microestructura a 1000x.

En la figura 6 se puede apreciar el análisis del MEB realizado al recubrimiento donde se encuentran los carburos de Cr y Nb los cuales generan el incremento de su resistencia a la fricción [8].

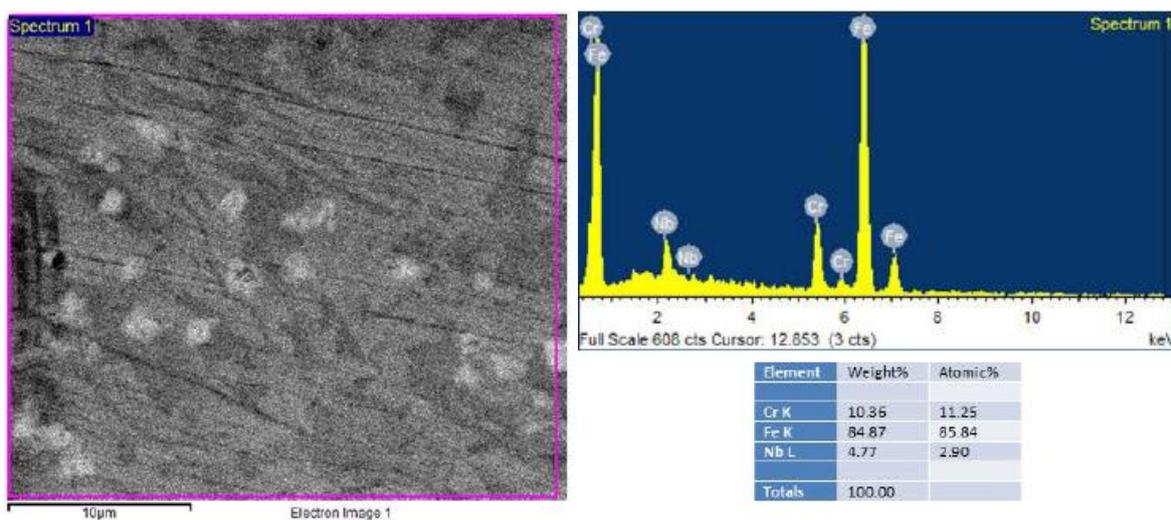


Figura 6. Análisis del MEB realizado en la matriz del aporte base Fe.

4. CONCLUSIONES

- Al realizar el análisis para obtener los mejores parámetros del proceso de la variable del área de refuerzo, se obtuvieron valores que determinan que el modelo tiene un buen rango de confiabilidad del proceso de recubrimientos realizado al acero grado herramienta D2 con aporte base Fe aplicando el proceso de plasma trasferido por arco PTA.
- Planteando un resultado objetivo y aplicando el optimizador del programa estadístico generó como resultado una solución global con un valor de amperaje de 70.8578 A y una velocidad de avance de 0.602812 m/min, con una respuesta pronosticada del área de refuerzo de 42342.0.
- La evaluación del aporte por medio del MEB presento una matriz ferrifica con una distribución homogénea de carburos de Cr y Nb la cual hace que su superficie presente alta resistencia al desgaste.

BIBLIOGRAFIA

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

[2] Jen Ting Wang-Ming Der Jean (2006). Optimization of the cobalt-based hardfacing in carbon steel using the fuzzy analysis of the robust design Springer-Verlag London Limited.

[3] Kong FanRong^{1,2}, ZHANG HaiOu^{1†} & WANG GuiLan³ (2009) Numerical simulation of the transient multiphase field during plasma deposition manufacturing composite materials Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy

[4] S. M. Aithal,¹ V. V. Subramaniam,¹ and V. Babu^{2,3} (1998) Comparisons Between Numerical Model and Experiments for a Direct Current Plasma Flow Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 19, No. 4, 1999.

[5] R. Bini Æ M. Monno Æ M. I. Boulos (2007). Effect of Cathode Nozzle Geometry and Process Parameters on the Energy Distribution for an Argon Transferred Arc Plasma Chem Plasma Process (2007) 27:359–380.

[6] Shu-Yi Tu · Ming-Der Jean Jen-TingWang · Chun-SenWu (2006) A robust design in hardfacing using a plasma transfer arc Int J Adv Manuf Technol 27: 889–896.

[7] Douglas c. Montgomery Diseño y análisis de experimentos (2004) segunda edición universidad estatal de Arizona limuza wiley.

[8] A. Gatto, E. Bassoli*, M. Fornari (2004) Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration Surface & Coatings Technology 187 265– 271.