

Optimizing GMAW Process Parameters Improving Your Applications

Eliás Esquicha-Larico Dr¹, José Esquicha-Tejada Mg²

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, eesquicha@unsa.edu.pe

³Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, jesquichat@unsa.edu.pe

Abstract- The present research will apply the Statgraphics Centurion Software Program and Hexagonal Design Planning to analyze the incidence and effect of the following parameters: voltage and welding speed that determine the shape of the bead and welding hardness that are inherent in the GMAW-MIG process, therefore the control of each of them is crucial to optimize the result of the welding in the manufacturing or ASTM A36 recovery equipment parts.

Then the main objective of the present study is to contribute with specific statistical models through different applications of the weld bead, such as penetration, recharge, bead width, and hardness, improving productivity.

Keywords: *Incidence of parameters, cord shape, optimize welding GMAW.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.415>

ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Optimización de los Parámetros del Proceso GMAW Mejorando sus Aplicaciones

Elías Esquicha-Larico Dr¹, José Esquicha-Tejada Mg²

¹Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, eesquicha@unsa.edu.pe

³Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, jesquichat@unsa.edu.pe

Resumen— En la presente investigación aplicará el Software Centurion Statgraphics y un Planeamiento de Diseño Hexagonal para analizar la incidencia y efecto de los siguientes parámetros: voltaje y velocidad de soldeo que determina la forma del cordón y su dureza de soldadura que son inherentes en el proceso GMAW-MIG, porque es crucial el control de cada uno de ellos para optimizar el resultado de la soldadura en la elaboración o recuperación de las piezas de acero A-36.

Entonces, el objetivo principal del presente estudio es contribuir con modelos estadísticos específicos, para sus diferentes aplicaciones del cordón de soldadura como es la penetración, recargue, ancho de cordón y dureza, mejorando la productividad.

Palabras Claves: Incidencia de parámetros, forma de cordón, optimizar soldadura GMAW.

Abstract- The present research will apply the Statgraphics Centurion Software Program and Hexagonal Design Planning to analyze the incidence and effect of the following parameters: voltage and welding speed that determine the shape of the bead and welding hardness that are inherent in the GMAW-MIG process, therefore the control of each of them is crucial to optimize the result of the welding in the manufacturing or ASTM A36 recovery equipment parts.

Then the main objective of the present study is to contribute with specific statistical models through different applications of the weld bead, such as penetration, recharge, bead width, and hardness, improving productivity.

Keywords: Incidence of parameters, cord shape, optimize welding GMAW.

I. INTRODUCCIÓN

La gran demanda del sector minero e industrial requiere constantemente el uso de las nuevas tecnologías para obtener mayor productividad y calidad de los productos fabricados o reconstruidos. Pero con las actuales tecnologías se puede conseguir buenos resultados si se selecciona bien los parámetros de los procesos de soldadura y se reconoce las propiedades de los materiales metálicos utilizados.

Además, con un buen dominio de los procesos de fabricación, se evita defectos que promueven la elevación de costos de fabricación. La experimentación desarrollada en el proceso GMAW, apoyándose en la estadística nos permite la aplicación adecuada de los parámetros, obteniéndose buenos resultados.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando se aplican los procesos de soldadura por arco en las diversas labores productivas, nos generan la necesidad de realizar cambios de sus parámetros de acuerdo con una producción específica, a veces se originan cambios por lo calentamientos irregulares, generando tensiones y por lo tanto variaciones dimensionales que no son adecuados en montajes; o quizás, nos encontramos con una reducción de sus propiedades mecánicas; todo esto, obliga mejorar la aplicación de los procedimientos a corto plazo [4].

Actualmente se realizan investigaciones aplicándose la robótica o prototipos mecanizados usando simuladores. Con el apoyo de las herramientas estadísticas, se logran diseños experimentales optimizados en los procesos de fabricación.

III. SITUACIÓN ACTUAL

Se dispone de herramientas adecuadas y sustentadas, para el control de parámetros en procesos de fabricación. Se debe:

- Mejorar la calidad del producto por el uso de procedimientos apropiados.
- Evitar retrabajos, que elevan los costos de fabricación y se debe garantizar las tolerancias dimensionales.
- Generar diseños experimentales optimizados, aplicado para distintos materiales de diversos espesores.

IV. PROPUESTA DE MEJORA

- A. Controlar los parámetros del proceso GMAW, por medio del software CENTURION STATGRAPHICS y el Diseño Hexagonal, aumentando su confiabilidad y calidad.[19]
- B. Conseguir diseños experimentales optimizados, para cordones de soldadura en su: penetración, altura, ancho y dureza, en su zona afectada por el calor y la de fusión.
- C. Optimizar fabricaciones y/o reparaciones, determinando sus medidas geométricas del cordón de soldadura aplicada.

V. MARCO TEÓRICO DEL GMAW

El proceso (GMAW), representados por: el metal inerte gas (MIG) y el metal activo gas (MAG), son procesos que permiten la manufactura de los metales, por acción de un arco plasmático que produce el calentamiento de un electrodo metálico sólido

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.415>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

que es alimentado en forma continua (consumible) generando depósitos de soldadura.[7]

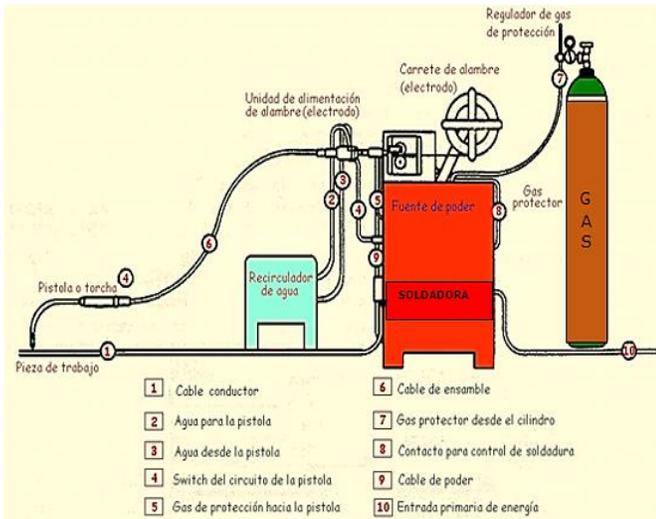


Fig. 1. Proceso GMAW, sus partes operativas

A. Equipo GMAW

- a) **Fuente de Poder**, en energía eléctrica:
- Produce salidas de baja tensión y alto amperaje.
 - Dispone de reguladores de tensión y de corriente;
 - Flexibilidad calibrando la corriente y/o tensión;
 - Sujeto a normas y códigos de funcionamiento;
 - Cuenta con instalaciones y operaciones seguras.

b) Parámetros de Control del Equipo

El proceso GMAW dispone de voltaje constante, un sistema de alimentación de alambre (amperaje), la antorcha o pistola y el suministro de gas de protección. Siendo sus variables esenciales [11]:

- **Voltaje**, Permanece constante al desarrollar una soldadura; el voltaje influye en el ancho del cordón; o sea, tendrá un cordón ancho cuando se incrementa el voltaje.

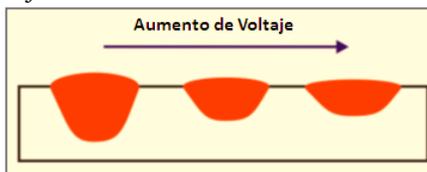


Fig. 2 Influencia del aumento del voltaje en la forma de los depósitos

Ver en la fig. 2 si se aumenta el voltaje:

- El Ancho del cordón, aumenta.
- La Penetración, disminuye.
- El Sobre espesor disminuye.
- El Tamaño del cordón, se mantiene.

Tipos de transferencias de metal, [3y11] se tiene:

- Para la transferencia por corto circuito requiere tensiones relativamente bajas,
- Para la transferencia globular sus tensiones mayores
- La de rocío (spray o aerosol) requiere de más voltaje.

Se requiere de mezclas de gases para lograr estas transferencias

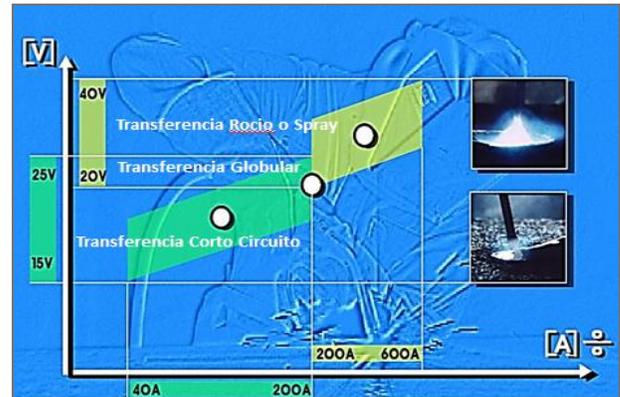


Fig. 3. Transferencia metálica, voltaje vs amperaje

En el montaje de este equipo, se calibra el Voltaje a través del Stick Out (Extensión de Electrodo), ver fig. 4; variando esta longitud varía su voltaje, en dependencia de la alimentación de alambre (amperaje), se tendrá una velocidad de fusión.

Los rangos de extensión de electrodo están entre 6.4 mm a 12.7 mm (1/4" a 1/2") para una transferencia corto circuito, y de 12.7 mm a 25.4 mm (1/2" a 1") para otras transferencias.

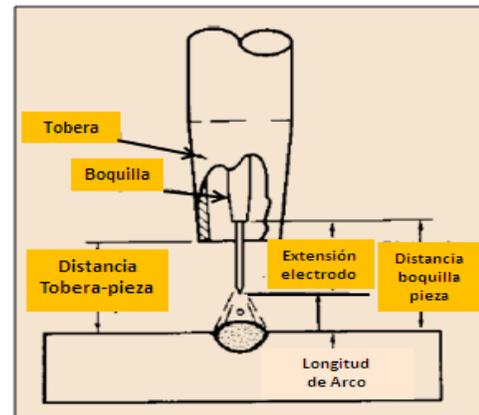


Fig.4. Partes esenciales de una tobera en funcionamiento [20]

- **Velocidad de Alimentación de Alambre o Amperaje**, tiene influencia en la penetración y la altura del cordón.

Con un aumento de la velocidad de alambre, y los parámetros constantes nos presenta (ver fig.5) [8 y10]:

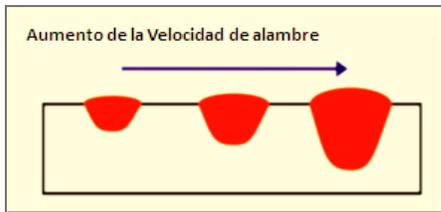


Fig.5. La alimentación de alambre: Incrementa la forma del cordón

- Un Incremento del Ancho de cordón.
 - Se Incrementa la Penetración.
 - Se Incrementa el Sobre - espesor.
 - Aumenta el Tamaño del cordón
- *Velocidad de Avance de la Soldadura*, es la velocidad lineal donde el arco se mueve realizando la soldadura. Manteniéndose las otras variables constantes, una penetración adecuada se consigue con velocidades intermedias (fig.6). Así se tiene:



Fig. 6. Aumentando la velocidad de avance disminuye el cordón.

- El Ancho del cordón, es de menor medida.
 - La Penetración, menor.
 - El Sobre espesor, disminuye.
 - El Tamaño del cordón, disminuye.
- *Diámetro y Composición del Metal de Aporte*. La AWS clasifica los materiales de aporte, por su proceso. El diámetro de alambre se selecciona de acuerdo con el espesor del metal base, de la posición de la soldadura y otros factores que afectan al cordón de soldadura. [2] [8].
 - *Gases de Protección*. Son aquellos que evitan la contaminación del metal fundido, forman una atmósfera ionizada que estabiliza el arco de soldadura. Los gases de acuerdo a su composición tienen influencia en la forma de transferencia del metal de aporte, como su tipo de penetración y en la forma del cordón. Así mismo el gas influye en las pérdidas de elementos químicos, en la temperatura de fusión y promueve casos de fisuración y porosidades [12].

Mezclas con alto Argón y CO₂ y/o O₂. se obtiene, ver fig.7:

- Un aislamiento normal del arco plasmático.
- El gas activo genera una buena humectación.
- Mejora la transferencia globular.
- Buena Penetración en el perfil de soldadura

- Da estabilidad, en el desarrollo la soldadura.
- Permite cordones limpios
- Se mejoran las propiedades mecánicas del cordón.

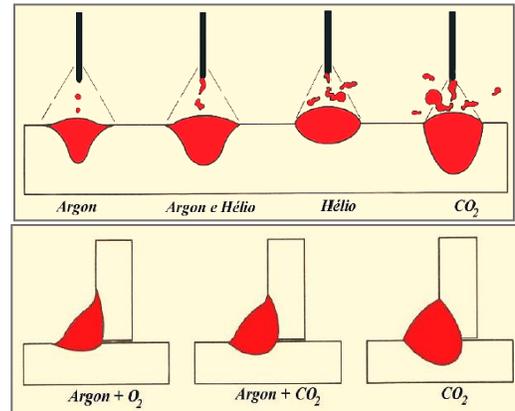


Fig.7. Formas de cordón según el gas aplicado

B. Soldabilidad

Es la capacidad de un material de unirse con otro, bajo las condiciones impuestas por códigos y normas de soldadura para un producto específico, que será aceptable con desempeño satisfactorio para los servicios de fabricación [6].

Para determinar la soldabilidad es necesario el conocer el material, el proceso, el procedimiento aplicado, además del proyecto de soldadura, los requerimientos de servicio, como cargas, ambiente, etc. [10].

La soldabilidad de los aceros al carbono, dependen sus porcentajes de aleación como el C y Mn, de sus niveles de impurezas; con porcentajes de carbono de 0,15% son de excelente soldabilidad, mientras los aceros de > 0,30% de carbono son soldables, pero se templean; por lo tanto, se debe tomar precauciones al soldarse.[11].

C. Dilución

Formación aleada entre el metal base y el de aporte, formándose el cordón de soldadura. En algunas aplicaciones especiales, la dilución es determinante, por encontrarse fallas durante el proceso de soldeo. [13].

D. Metalurgia de la Soldadura

En una soldadura existen las zonas: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y la zona fundida (ZF).

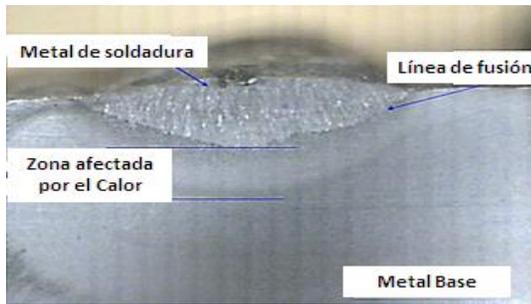


Fig. 8. Regiones de un cordón de soldadura

Las características microestructurales de estas regiones dependen de las composiciones químicas, y las condiciones térmicas y metalúrgicas generadas en la soldadura. [14][17].

La distribución térmica de una soldadura representada en la figura 9, nos muestra la temperatura pico (T_p), temperatura de fusión (T_f), y la temperatura de la chapa (T_c).

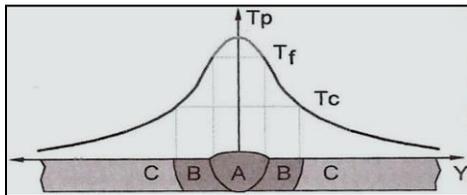


Fig.9. Regiones de una soldadura, A- zona fundida (ZF), B- zona afectada por el calor (ZAC), y C- metal base (MB). [15].

La energía térmica de los procesos de soldadura produce notables alteraciones en las propiedades del metal base debido a sus cambios alotrópicos generando discontinuidades. [16 y 21].

Todo esto nos indica que el ciclo térmico en la ZAC influye directamente en su microestructura, y por lo tanto en sus propiedades finales de la soldadura, siendo que la microestructura formada sea dependiente de los siguientes factores:

- Temperatura máxima del ciclo térmico;
- Velocidad de enfriamiento;
- Composición química del material a soldarse.

En los procesos de soldadura por arco eléctrico, el ciclo térmico consiste en el calentamiento rápido (centenas de grados por segundo), seguido de un enfriamiento relativamente rápido (decenas de grados por segundo) hasta llegar a la temperatura ambiente. [17 y 18].

Modos de Enfriamiento

Se da de acuerdo con la penetración del cordón de soldadura tal como muestra la figura 10. [16]

Así el primer cordón tiene una penetración completa, el calor se disipa en dos direcciones y las isotermas son casi paralelas a la línea de fusión, siendo del tipo bidimensional (2D).

El segundo caso presenta una penetración incompleta, con calentamiento inferior, se disipa el calor en forma intermedia (2,5D).

Cuando la superficie inferior no es calentada, luego el régimen es tridimensional (3D).

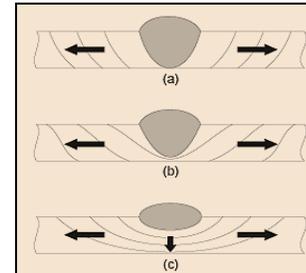


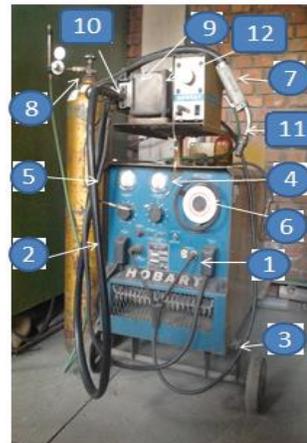
Fig. 10. La disipación de calor (a) 2D; (b) 2,5D; (c) 3D [16][17]

VI. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El experimento del proceso GMAW se divide en dos partes:

- Verificar y seleccionar los parámetros incidentes en las respuestas: *penetración, altura del cordón, ancho del cordón y la dureza* en las zonas de fusión y la ZAC.
- Análisis de la de la incidencia en la región experimentada, donde los parámetros más influyentes han generado resultados (respuestas) y estos se someten a una optimización con su validación [9].

A) Equipos y Herramientas en la Experimentación



1. Pinza a tierra
2. Borne para pistola
3. Energía 110 V
- 4.- Voltímetro
- 5.- Amperímetro
- 6.- Regulador de voltaje
- 7.- Fuente primaria de 380 trifásica
- 8.- Gas de protección: 75% Ar, 25% CO₂
- 9.- Control alimentador alambre de 110 V
- 10.- Salida de alambre y gas
- 11.- Pistola de soldar
- 12.- Perilla de regulación alimentación alambre

Fig. 11: Máquina soldadora HOBART GMAW (MIG-MAG) Modelo RC-300. [20]

B) Equipo e Instrumentos Complementarios

- 1.- Sistema de avance del equipo SAW.
- 2.- Cronómetro.
- 3.- Sierra sin fin para corte de metales.
- 4.- Equipo de desbaste.

- 5.- Equipo de Lijado y pulido.
- 6.- Microscopio óptico.
- 7.- Kit de inspección de soldadura
- 8.- Durómetro Empax modelo epx300.
- 9.- Laptop Mini note 10 pulgadas, Windows 7.
- 10.- Software Statgraphics/Centurion.

Equipos utilizados en la experimentación [2] ver figura 12.



Fig.12. Implementación de la pistola GMAW al sistema de velocidad del proceso SAW.

C) Parámetros del Proceso GMAW (MIG-MAG)

Por experiencias previas se determinaron los parámetros más incidentes como es el caso del voltaje calibrado con el amperaje (velocidad de alimentación de alambre) y la velocidad de soldeo.

Son variables:

- Voltaje: 18 – 22 voltios calibrado con su Velocidad de alimentación de alambre: 0.41 mm/s.
- Velocidad de soldeo: 2.51 - 51 mm/s.

Parámetros considerados fijos:

- Diámetro del electrodo: 0.9 mm
- Alimentación de gas: 18 l/min.
- Distancia tubo de contacto con la boquilla: 5 mm.
- Material base acero A-36
- La distancia tubo de contacto y la pieza: 25 mm
- Ángulo de inclinación de la torcha 65°.

Se consideró una mezcla de gases de 75%Ar + 25% de CO₂.

Las probetas para las pruebas se realizaron en chapas de acero laminadas en caliente A-36, cuyas dimensiones son: 200 mm x 100 mm x 9 mm. [1]

La soldadura es de recargue, con el que se obtendrán respuestas geométricas como es: la penetración, el ancho, alto del cordón y la dureza de las zonas de fusión y la ZAC.

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL BASE [22]

Composición Química del Acero A-36									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Al	Mo	V	Cu
0,17	0,62	0,23	<0,027	<0,018	0,01	<0,1	0,013	<0,1	<0,3

Como metal de aporte se utiliza el AWS, ER 70S-6, con un diámetro de 0.9 mm fabricado por la firma SOLDEXA, tabla II.

TABLA II
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL DE APORTE

Composición Química del Alambre AWS ER70S-6									
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5

D) Rangos de los Parámetros Incidentes

Los parámetros aplicados son: *voltaje* calibrada con la alimentación de alambre y *la velocidad de soldeo*, con una formación de transferencia metálica del tipo spray o de rocío. Además, se debe tener en cuenta, una buena calibración, del gas de protección, distancia del tubo de contacto con la superficie y el ángulo de inclinación de la pistola.[20]

TABLA III
RANGOS DE LOS PARÁMETROS EN LAS PRUEBAS

Parámetros	Mínimo	Máximo
Voltaje	21	24
Velocidad de alimentación (mm/s)	0.41	0.41
Flujo de Gas 75% de Ar + 25% de CO ₂ en l/min	18	18
Extensión de alambre tubo de contacto/pieza (mm)	25	25
Velocidad de soldadura (mm/s)	2.51	5.10
Ángulo de inclinación de la pistola (°)	65	65

E) Planeamiento Diseño Hexagonal (3puntos centrales)

Se consideró el Factorial Fraccionario (de tres puntos centrales), con la finalidad de verificar la linealidad de sus resultados, bajo un ordenamiento padrón estadístico.[19]

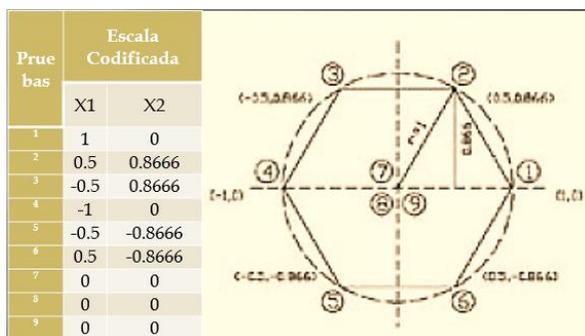


Fig.13 Diseño Hexagonal de tres puntos centrales.

F) Elaboración de Probetas (Fig.14 y 15)



Fig.14 Elaboración de cordones en las probetas [20]



Fig.15. Probetas con sus muestras para su análisis.

G) Determinación Analítica de Respuestas

Considerando la sección transversal de la Fig.16 y 17 se realizó las mediciones de penetración (p), alto (a), ancho (b), del cordón y las durezas respectivas en la zona de fusión, y ZAC.

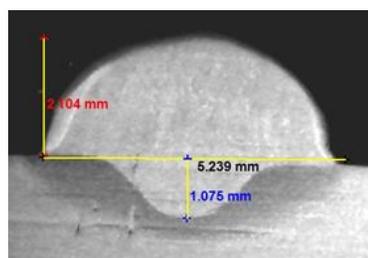


Fig. 16. Metrología de un cordón de soldadura.

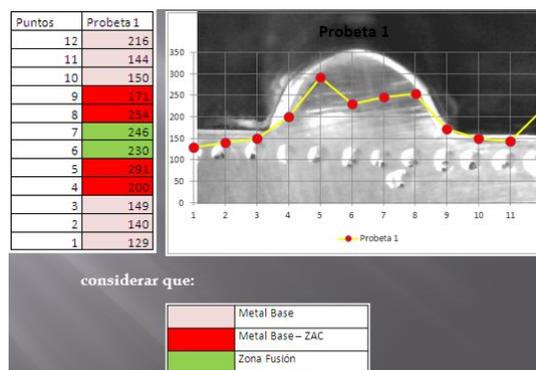


Fig.17. Toma de durezas en una muestra [20]

TABLA IV

RESULTADOS A LA METODOLOGÍA SUPERFICIE RESPUESTA RSM

Pruebas	Escala Codificada		Escala Decodificada		Variable de Respuesta			
	X1	X2	Velocidad soldeo (m/s)	Voltaje (V)	Penetración (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Dureza (mm) (mínimo)
1	1	0	5.10	20	0.627	4.571	1.866	105
2	0.5	0.8666	4.45	21.73	0.841	5.806	2.239	99
3	-0.5	0.8666	3.15	21.73	0.861	5.791	1.985	100
4	-1	0	2.51	20	0.91	5.39	2.158	145
5	-0.5	-0.8666	3.15	18.26	1.075	5.242	2.109	106
6	0.5	-0.8666	4.45	18.26	1.06	5.568	2.164	100
7	0	0	3.80	20	1.205	6.099	2.493	86
8	0	0	3.80	20	1.269	5.903	2.483	88
9	0	0	3.80	20	1.284	6.06	2.489	84

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los parámetros influyentes y sus respuestas obtenidas se generó un modelo para cada respuesta, donde en cada una de ellas también se analizó separadamente en función de sus parámetros e interacciones utilizando un planeamiento 2².

TABLA V

VARIABLES DEL DISEÑO HEXAGONAL

Variables	Nivel(-)	Nivel(+)
V_Soldeo	10	14
Voltaje	18	22

TABLA VI

DISEÑO HEXAGONAL 22 DE LAS DOS VARIABLES

Nro	Escala Codificada		Escala Decodificada	
	x1	X2	Soldeo	Voltaje
1	1	0	14	20
2	0.5	0.8666	13	21.7332
3	-0.5	0.8666	11	21.7332
4	-1	0	10	20
5	-0.5	-0.8666	11	18.2668
6	0.5	-0.8666	13	18.2668
7	0	0	12	20
8	0	0	12	20
9	0	0	12	20

Se obtiene un total de 6 evaluaciones más 3 réplicas en el centro, como respuesta (y) será tanto para: la Penetración, Ancho de Cordón, Altura de Cordón y Dureza Promedio a través del análisis de varianza, con significancia del 5%.

A) Evaluación Respuesta para la Penetración del Cordón

TABLA VII

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA PENETRACIÓN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad_soldeo	0.0301001	1	0.0301001	6.56	0.0832
B:Voltaje	0.0468723	1	0.0468723	10.21	0.0495
AA	0.281301	1	0.281301	61.28	0.0043
AB	0.00000625	1	0.00000625	0.00	0.9729
BB	0.063388	1	0.063388	13.81	0.0339
Error total	0.0137713	3	0.00459044		
Total (corr.)	0.394162	8			

Se obtiene el valor de significancia:

R-cuadrada = 96.5062 por ciento (se acepta)

TABLA VIII

COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA PENETRACIÓN

Constante	-37.4532
A:Velocidad_soldeo	2.86934
B:Voltaje	2.24148
AA	-0.121042
AB	-0.000721209
BB	-0.0573822

Luego el MODELO ESTADÍSTICO PARA LA PENETRACIÓN es:

$$\text{PENETRACIÓN} = -37.4532 + 2.86934 * \text{Velocidad_soldeo} + 2.24148 * \text{Voltaje} - 0.121042 * \text{Velocidad_soldeo}^2 - 0.000721209 * \text{Velocidad_soldeo} * \text{Voltaje} - 0.0573822 * \text{Voltaje}^2$$

Efectos de los Parámetros en la Penetración.

En la figura existe una penetración de 1.265 cuando la velocidad de soldeo es:12 y con un voltaje aproximado de 19.5

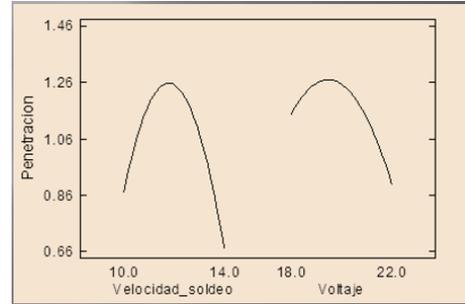


Fig.18. Efectos de la velocidad de soldeo y voltaje en la penetración.

Superficie Respuesta Estimada para la Penetración, se verifica en la figura la incidencia y la respuesta penetración.

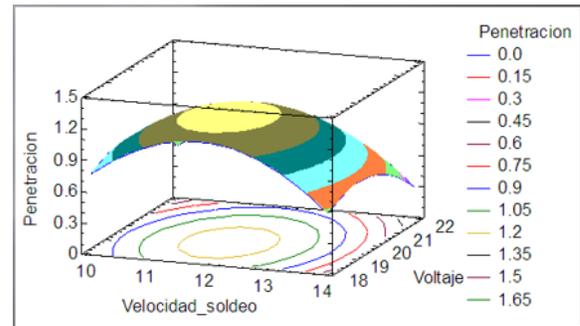


Fig.19. Se corrobora que la velocidad de soldeo es 12 y voltaje 19 generando mayor penetración.

Gráfica de Contorno para verificar la Penetración

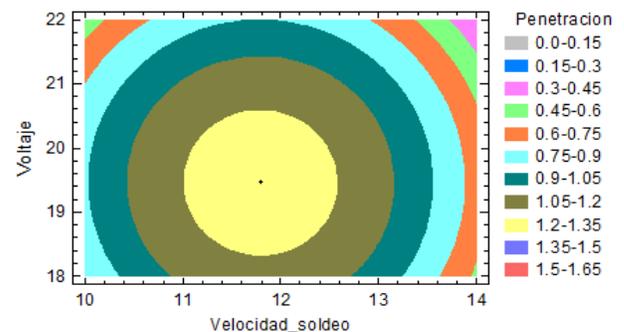


Fig.20. Velocidad de soldeo 11.8 y voltaje 19.5

Respuesta Meta: Maximizar Penetración

Por lo tanto, Valor óptimo en la Penetración es = 1.27476

TABLA IX

PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LA PENETRACIÓN

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad_soldeo	10.0	14.0	11.7949
Voltaje	18.2668	21.7332	19.4573

B) Evaluación Respuesta para la Altura del Cordón

TABLA X
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA ALTURA DEL CORDÓN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad_soldeo	0.140184	1	0.140184	1.71	0.2821
B:Voltaje	0.154842	1	0.154842	1.89	0.2629
AA	1.29834	1	1.29834	15.85	0.0284
AB	0.0241802	1	0.0241802	0.30	0.6247
BB	0.053848	1	0.053848	0.66	0.4769
Error total	0.245795	3	0.0819318		
Total (corr.)	1.86336	8			

R-cuadrada = 85.5256 por ciento (Se Acepta).

TABLA XI
COEFICIENTES DE REGRESIÓN: ALTURA DEL CORDÓN

Coefficiente	Recargue
constante	-39.9777
A:Velocidad_soldeo	2.261
B:Voltaje	2.91082
AA	-0.119083
AB	-0.0815584
BB	0.0287041

El MODELO Estadístico para la ALTURA DEL CORDÓN de Soldadura es:

$$\text{ALTURA_CORDÓN (RECARGUE)} = -39.9777 + 2.261 * \text{Velocidad soldeo} + 2.91082 * \text{Voltaje} - 0.119083 * \text{Velocidad_soldeo}^2 + 0.0287041 * \text{Velocidad soldeo} * \text{Voltaje} - 0.0815584 * \text{Voltaje}^2$$

Efectos de los Parámetros en la Altura del Cordón de Soldadura de 2.48 se tiene 12 de velocidad y 20 de voltaje

Superficie respuesta estimada para la Altura de Cordón y Efectos de los Parámetros

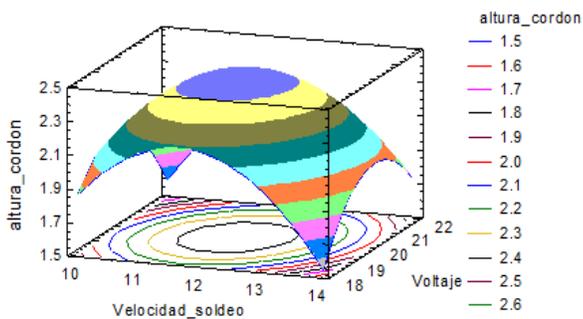


Fig.21. Velocidad de soldeo 12 y voltaje 20 semejantes.

Respuesta Meta: Maximizar Altura del Cordón
Valor óptimo para la Altura del Cordón = 2.48974

TABLA XII
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE ALTURAS DE CORDÓN

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad_soldeo	10.0	14.0	11.8967
Voltaje	18.2668	21.7332	19.9382

C) Evaluación Respuesta para el Ancho Del Cordón

TABLA XIII
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ANCHO DEL CORDÓN

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad_soldeo	0.00630208	1	0.00630208	0.31	0.6145
B:Voltaje	0.00060025	1	0.00060025	0.03	0.8738
AA	0.272272	1	0.272272	13.56	0.0347
AB	0.00990025	1	0.00990025	0.49	0.5332
BB	0.128053	1	0.128053	6.38	0.0858
Error total	0.0602508	3	0.0200836		
Total (corr.)	0.416258	8			

R-cuadrada para el Ancho del Cordón = 86.809 por ciento

TABLA XIV
COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA ANCHO DEL CORDÓN

Coefficiente	Ancho Cordón
Constante	-64.3202
A:Velocidad_soldeo	7.0301
B:Voltaje	2.76735
AA	-0.260042
BB	-0.0528881
AB	-0.0448592

El MODELO Estadístico para la ANCHO DEL CORDÓN es:

$$\text{ANCHO_CORDÓN} = -64.3202 + 7.0301 * \text{Velocidad_soldeo} + 2.76735 * \text{Voltaje} - 0.260042 * \text{Velocidad_soldeo}^2 - 0.0448592 * \text{Velocidad_soldeo} * \text{Voltaje} - 0.0528881 * \text{Voltaje}^2$$

Superficie Respuesta estimada para el Ancho de Cordón Efectos de los Parámetros es coincidente.

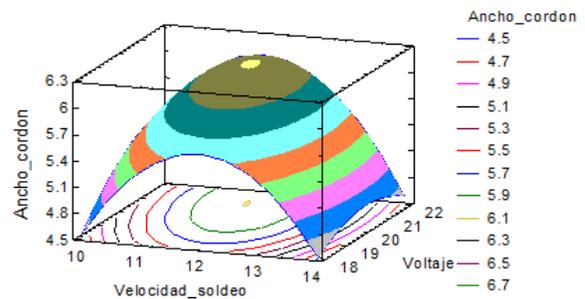


Fig.22. Superficie Respuesta del Ancho del Cordón

Respuesta Meta: Maximizar Ancho del cordón
Valor óptimo = 6.1059

TABLA XV
PARÁMETROS ÓPTIMOS EN LA ANCHO DEL CORDÓN

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad soldeo	10.0	14.0	11.6879
Voltaje	18.2668	21.7332	21.2054

- D) *Evaluación para la Respuesta en la Dureza.*
Dureza Mínima valor: 100 HB (Para que el metal de aporte sea similar al metal base).

TABLA XVI
ANÁLISIS VARIANZA PARA LA DUREZA

Fuente	Suma de Cuadrados	G.l.	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad_soldeo	630.75	1	630.75	9.99	0.0509
B:Voltaje	12.25	1	12.25	0.19	0.6895
AA	1825.2	1	1825.2	28.89	0.0126
AB	6.25	1	6.25	0.10	0.7737
BB	64.5333	1	64.5333	1.02	0.3866
Error total	189.5	3	63.1667		
Total (corr.)	2664.22	8			

R-cuadrada = 92.8872 por ciento

TABLA XVII
COEFICIENTE DE REGRESIÓN DE LA DUREZA MÍNIMA

Coficiente	Estimado
Constante	2502.65
A:Velocidad_soldeo	-255.674
B:Voltaje	-82.9003
AA	9.75
AB	0.721209
BB	1.8309

EL MODELO Estadístico para la DUREZA es:

$$DUREZA_MIN = 2502.65 - 255.674 * Velocidad_soldeo - 82.9003 * Voltaje + 9.75 * Velocidad_soldeo^2 + 0.721209 * Velocidad_soldeo * Voltaje + 1.8309 * Voltaje^2$$

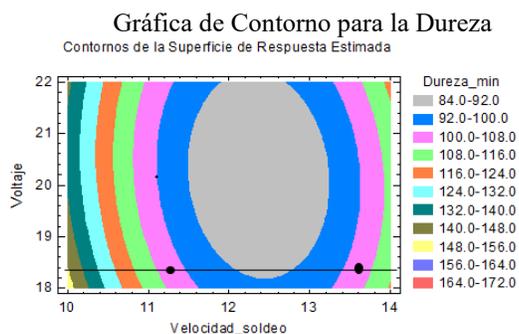


Figura 23. Contorno de la superficie de respuesta de la dureza mínima 100

Respuesta Meta: Para Mantener Dureza

Meta: mantener Dureza mínima en 100.0

Se tiene el óptimo de 11 de velocidad de soldeo y de 20 voltios como muestra la tabla XVIII.

TABLA XVIII
PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA LA DUREZA

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad_soldeo	10.0	14.0	11.108
Voltaje	18.2668	21.7332	20.1672

VIII. CONCLUSIONES

- Se optimizó los parámetros del proceso GMAW, para que se puedan aplicar en la fabricación de uniones de productos y/o recargues, al obtenerse medidas geométricas de acuerdo a la necesidad de una soldadura, mejorando por lo tanto su productividad.
- Con la utilización del software CENTURION STATGRAPHICS y el Diseño Hexagonal, se lograron acercamientos adecuados de los parámetros incidentes, disminuyendo las discontinuidades en los productos soldados, con ahorro de tiempo y aumentando la confiabilidad y calidad, en procesos semiautomáticos y mecanizados.
- Las medidas geométricas del cordón experimentado se controlaron a través de las variaciones de los parámetros significativos, voltaje y velocidad de avance.
- Los modelos estadísticos optimizados también permiten mejorar la calibración de los equipos y por lo tanto su rendimiento en la productividad.

IX. TRABAJO FUTURO

En trabajos constructivos y o de mantenimiento se requiere el uso de diferentes aceros el cual implica considerar otros parámetros respuesta como es la temperatura y su difusión los cuales tienen incidencia en las propiedades de los materiales metálicos; es aquí donde también se pueden realizarse la aplicación de estos acercamientos estadísticos, en mejora de la calidad de sus producciones.

RECONOCIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, por dar las facilidades en la obtención de datos a través de los Laboratorios de Soldadura y Conformado de Metales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

REFERENCIAS

- [1] ASTM A36 / 36M, Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards. USA: [s.n.]. 2008. 4p.
- [2] C. Marques, “Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional”, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.
- [3] P. Dias, J. Lang, R. Zelir and S. Costa, “A nonlinear coupled-variables model for mass transfer modes in MIGMAG processes with experimental validation”. *International Journal of Modelling, Identification and Control (IJMIC)*, Vol. 31, No. 4, 2019.
- [4] S. Soares Queiroz. Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Metal de Solda de Aço de Alta Resistência Obtido pelo Processo GMAW. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro Maio de 2016.
- [5] C. Hsu, P. Soltis, J. Hearn, Optimum Arc Length and Arc Voltage in GMAW. The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio. Pág. 357. Callaway Gardens Resort Phoenix, Arizona USA, April 2002
- [6] AWS. “Welding Handbook”. Miami, FL 33126. 2001
- [7] Yu, R., Han, J., Zhao, Z., & Bai, L. (2020). “Real-Time Prediction of Welding Penetration Mode and Depth Based on Visual Characteristics of Weld Pool in GMAW Process”. *IEEE Access*, 8, 81564–81573. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990902>.
- [8] P.V. Marques; P.J. Modenesi; A.Q. Bracarense, “Soldagem –fundamentos e tecnologia”. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [9] Marques, 1991). MIG/MAG Welding, Svetsaren, vol. 58, nº 2, 2003
- [10] F. Silva, “Simulação física de zona termicamente afetada por soldagem em aço microligado com alto nióbio e baixo manganês” Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.
- [11] P.J. Modenesi; M.C.M.S. Costa, Estudo de alguns parâmetros básicos de soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. *Revista Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v.16, n.1, p. 012-021. Jan/mar 2011.
- [12] A.F. Moreira, “Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW”. 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- [13] Zainul Huda, “Metallurgy for Physicists and Engineers. Fundamentals, Applications, and Calculations”. by Taylor & Francis Group, LLC. London-New York. 2020.
- [14] J.F. Lancaster, Metallurgy of welding Abington. William Andrew, 1999. 446 p.
- [15] A.Q. Bracarense, P.J. Modonesi, p. Marques, “Soldagem – Fundamentos E Tecnologia”. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p.
- [16] H. dos Santos, A. Gabriel Wiedenhof, e G. Fuhr Santiago, “Avaliação de Juntas Soldadas pelo Processo Gmaw”, *Siepe*, vol. 9, nº 2, mar. 2020.
- [17] J. Martinez; S. Zappa; H. Svoboda, H. “Efecto del calor aportado y la cantidad de capas sobre la evolución microestructural en recargues de acero inoxidable dúplex”. *Soldagem & Inspeção*. 2019; 25: e2510. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.10>
- [18] K. Poorhaydari; B.M. Patchett; D.G. Ivey; “Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness”, *Welding Journal*, 84(10): 149s-155s, october 2005.
- [19] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments. New York: John Wiley & Sons, 1991. 680 p.
- [20] E. Esquicha, “Control de Parámetros del Proceso GMAW-MIG en Soldaduras del Acero A-36 para Optimizar la Recuperación de Piezas”. Universidad Nacional de San Agustín. 2017.
- [21] E. Silva, Z. Aguila and V. Lima, “Avaliação da suscetibilidade à sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos”, *Proc. of LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 2018.
- [22] Corporación Aceros Arequipa S.A. – Perú. www.acerosarequipa.com. 2017.