

# **Maestría en Ciencias de la Ingeniería**

Estudio de la optimización de soldadura robotizada GTAW-P  
en acero inoxidable ferrítico AISI 430.

*Autora* Ing. Graciela Rosel Palacios

® Ing. Graciela Rosel Palacios

Deseo agradecer a todas las personas que intervinieron en este proyecto y su apoyo invaluable cuyos aportes, compañía, capitales y confianza, cimentaron la concreción de este proyecto.

En particular quiero agradecer al Dr. Hugo Gámez mi Co-director y a todo el personal del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industria (CIDESI) sede Estado de México, bajo su digno cargo, quienes me acompañaron paciente y amigablemente durante mi estancia en el Centro.

Agradezco y reconozco con orgullo el gran apoyo de mi sinodal la Dra. María Verónica Estrella Suarez cuyo soporte invaluable junto con el de mi Co-director hicieron posible la obtención de este grado.

Mi más profundo reconocimiento a la Dra. Eva Cervantes Rojas por su honorabilidad, compañía y generosidad, así como al Dr. Jaime Taja Tijerina por hacer posible la realización de la experimentación. Agradezco el apoyo de CONACyT, METALSA, Lincoln Electric y Emco Test por sus aportaciones que fueron sustantivas en el resultado obtenido.

Al posgrado *“Gracias por la ventura y por el daño, por la espina y por la flor;(...) Gracias por qué la fragua de tus fuegos, templó en acero el corazón de estaño”* [1].

México, 2020

***Tetikayotl amo uala tlen ipan se itlakayo  
uala tle ipan tochikanejneuil***

“La fuerza no proviene de la capacidad física,  
sino de la voluntad indomable”

Proverbio Náhuatl.





*Pour la lumière de ma vie ... ma mère,*

*Per te, il fiore del mio cuore  ∩,*

*Para você minha amada irmã, meu guia e companheiro,*

*por miaj fratinoj, tiuj, kiuj for iris,*

*tiuj, kiujla ĉeestantoj, tiuj,*

*kiuj venas kaj egalitara estonteco...*

# EDITORIAL



Estudio de la optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P en acero inoxidable AISI 430

Ing. Graciela Rosel Palacios

Revisores: Dra. Maria V. Estrella Suárez,  
Mtra. Lizbeth M. Rosel Palacios,  
Dra. Graciela Palacios Ríos,  
Dr. Hugo Gámez Cuatzin,  
Dr. Irineo P. Zaragoza,  
Mtra. Nancy Zamora Flores.

© Graciela Rosel Palacios, 2020 Diseño,  
diagramación, investigación y programación.

Se prohíbe la reproducción de cualquier  
ilustración y contenido sin permiso de la autora.

Jefa de arte y Editora: Mtra. Beatríz Sáenz  
Diseño de cubierta: Graciela Rosel  
© Ilustraciones: Graciela Rosel

Impreso en:

Arquitectura # 56, Local 4, Copilco Universidad,  
Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México  
Registros en trámite



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIO DE LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA  
ROBOTIZADA GTAW-P  
EN ACERO INOXIDABLE FERRÍTICO AISI 430”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ING. GRACIELA ROSEL PALACIOS**

DIRECTOR DE TESIS: DR. BENJAMÍN VARGAS ARISTA  
CO DIRECTOR: DR. HUGO GÁMEZ CUATZIN

TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO, 2020.



# Índice general

<b>Índice de tablas</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Listado de símbolos y nomenclaturas</b>	<b>xvi</b>
<b>Resumen</b>	<b>xxii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xxiv</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Preámbulo</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Estado del arte</b>	<b>2</b>
1.2.1 Estudio experimental de la soldabilidad en el acero inoxidable ferrítico AISI 430 con material de aporte austenítico mediante el proceso de soldadura GTAW.	2
1.2.2 Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura y grados de sensibilización del metal base y soldadura en acero inoxidable AISI 430.	4
1.2.3 Estudios comparativos en la soldabilidad, microestructura y propiedades de tracción autógena de soldadura TIG en acero inoxidable AISI 430 con y sin flujo de gas.	5
1.2.4 Influencia de la adición de Cobre y Aluminio en las propiedades mecánicas y comportamiento de la corrosión en acero inoxidable ferrítico AISI 430 con GTAW.	7
1.2.5 Influencia de la adición de Aluminio y Titanio en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable ferrítico AISI 430 con soldadura GTA.	8
1.2.6 Una revisión en la optimización de procesos de soldadura.	9
1.2.7 Optimización de parámetros en el proceso de soldadura GTA para la soldadura de una chapa de acero inoxidable AISI 304L.	12
1.2.8 Predicción de delta ferrita en acero inoxidable usando red neuronal, análisis y comparación con otros métodos predictivos.	14
1.2.9 Simulación de la recristalización en aceros BCC	15

<b>1.3 Planteamiento del problema</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Justificación</b>	<b>17</b>
<b>1.5 Objetivos</b>	<b>18</b>
<b>1.6 Alcances</b>	<b>19</b>
<b>1.7 Limitaciones</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Metalurgia de los aceros inoxidable.</b>	<b>21</b>
2.1.1 Historia	21
2.1.2 Aceros inoxidables	25
2.1.2.1 Capa pasiva	26
2.1.2.2 Soldabilidad general de aceros inoxidables	27
2.1.3 Aceros inoxidables ferríticos	28
2.1.3.1 Acero inoxidable ferrítico 430	29
<b>2.2 Diagramas de constitución</b>	<b>31</b>
2.2.1 Diagrama de equilibrio Cr-Fe	31
2.2.2 Diagrama de ternario Fe-Cr-C	32
2.2.3 Diagrama de Schaeffler	33
2.2.4 Soldabilidad del Acero inoxidable 430	34
<b>2.3 Procesos de soldadura por arco</b>	<b>35</b>
2.3.1 Principales tecnologías de soldadura por arco	35
2.3.1.1 Generalidades de la soldadura	39
2.3.2 Soldadura por arco con electrodo de tungsteno con protección a gas (GTAW)	39
2.3.2.1 Parámetros de soldadura	42
2.3.2.2 Corriente eléctrica	43
2.3.2.3 Corriente pulsada	45
2.3.2.5 Diferencia de potencial (V)	46
2.3.2.6 Velocidad de avance de soldadura	46
2.3.2.7 Calor de entrada	47
2.3.2.8 Gas de protección	48
2.3.2.9 Posiciones de soldadura	48
2.3.3 Soldadura robotizada	49
2.3.3.1 Robots industriales	49

2.3.3.2 Soldadura por arco robotizada	50
<b>2.4 Caracterización mecánica y microestructural</b>	<b>52</b>
2.4.1 Pruebas de tensión	53
2.4.2 Metalografía	53
2.4.3 Microscopía óptica	55
2.4.4 Dureza Vickers	56
<b>Capítulo 3. Desarrollo experimental</b>	<b>59</b>
<b>3.1 Materiales</b>	<b>62</b>
3.1.1 Propiedades originales del acero	62
<b>3.2 Proceso de soldadura GTAW-P robotizado</b>	<b>63</b>
3.2.1 Maquinado y preparación de cupones	63
3.2.2 Diseño de la unión	65
3.2.3 Diseño de experimentos (DOE)	65
3.2.4 Corridas experimentales robotizadas	67
3.2.5 Calor de entrada	69
<b>3.3 Caracterización macro y microestructural</b>	<b>69</b>
3.3.1 Metalografía	70
3.3.2 Análisis macroestructural	71
3.3.2.1 Fusión de cupones y penetración de la soldadura	72
3.3.3 Caracterización microestructural	72
3.3.4 Panorámicas de micrografías transversales	74
3.3.4.1 Tamaño de grano promedio y número de tamaño de grano G ASTM	76
3.3.4.2 Ancho de la ZAC	79
3.3.4.3 Altura de la corona y respaldo	80
3.3.4.4 Fracción volumétrica de martensita intergranular (MI)	81
<b>3.4 Caracterización mecánica</b>	<b>85</b>
3.4.1 Pruebas de tensión	85
3.4.2 Dureza Vickers	87
<b>3.5 Optimización y simulación</b>	<b>88</b>
3.5.1 Regresión lineal múltiple y análisis estadístico	89
3.5.2 Superficie de respuesta	90

3.5.3 Redes neuronales	92
3.5.4 Simulación de respuestas optimizadas	96
3.5.4.1 Desarrollo de software y base de datos	96
3.5.4.2 Simulación de propiedades mecánicas	100
3.5.4.3 Simulación de microestructura	102
<b>Capítulo 4. Análisis de resultados y discusión</b>	<b>107</b>
<b>4.1 Proceso de soldadura GTAW-P robotizada</b>	<b>107</b>
4.1.1 Diseño de experimentos	107
4.1.2 Calor de entrada	108
<b>4.2 Análisis macro y microestructural</b>	<b>112</b>
4.2.1 Análisis químico por emisión óptica	112
4.2.2 Análisis macroestructural	113
4.2.2.1 Fusión de cupones y penetración de la soldadura	113
4.2.2.2 Ancho de ZAC desde la macroestructura	116
4.2.3 Análisis microestructural	119
4.2.3.1 Panorámicas de micrografías transversales	119
4.2.3.2 Evolución microestructural	125
4.2.3.3 Número de tamaño de grano G ASTM en la ZAC y tamaño de grano promedio en la ZAC	129
4.2.3.4 Ancho de ZAC desde la microestructura	131
4.2.3.5 Diferencia Ancho de ZAC macro y micro	133
4.2.3.6 Fracción volumétrica de martensita intergranular	134
<b>4.3 Análisis mecánico</b>	<b>136</b>
4.3.1 Resistencia mecánica bajo tensión	136
4.3.1.1 Curvas esfuerzo- deformación ingenieril del metal base.	136
4.3.1.2 Curvas esfuerzo- deformación ingenieril de las uniones soldadas.	137
4.3.2 Resistencia a la indentación Vickers	140
<b>4.4 Optimización y simulación</b>	<b>143</b>
4.4.1 Análisis estadístico	143
4.4.1.1 Análisis de Varianza de la Resistencia máxima a la tensión (UTS) con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	143
4.4.1.2 Análisis de Varianza de la Ys con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	145
4.4.1.3 Análisis de Varianza de la Elongación con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	146



4.4.1.4 Análisis de Varianza de la ZAC con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	147
4.4.1.5 Análisis de Varianza de la Tamaño de grano (Gz) con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	148
4.4.1.6 Análisis de Varianza del número G ASTM (Ng) con Corriente de soldadura (Cw), Velocidad de soldadura (Sw) y Pulsos del arco (Ps)	150
4.4.2 Superficie de respuesta	151
4.4.3 Redes neuronales	158
4.4.4 Simulación de respuestas optimizadas	162
4.4.4.1 Simulación de propiedades mecánicas	162
4.4.4.2 Simulación de microestructural	165
<b>4.5 Correlación de resultados</b>	<b>172</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>175</b>
<b>5.1 Conclusiones</b>	<b>175</b>
<b>5.2 Recomendaciones</b>	<b>177</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>179</b>

# Índice de tablas

Tabla	Página
1.1 Parámetros de las probetas de acero inoxidable AISI430 [10, p. 53].	2
1.2 Parámetros y valores aplicados en la experimentación de [14, p. 239].	7
1.3 Parámetros GTAW aplicados por [15, p. 482].	8
1.4 Niveles y parámetros para el Diseño Central Compuesto de [17, p. 481].	14
2.1 Composición química general del acero inoxidable ferrítico AISI 430, cuyos valores son en porcentaje y corresponden al máximo según AWS [26, pp. 6-11]	29
2.2 Propiedades mecánicas generales del acero inoxidable ferrítico 430 [30, p. 369]	30
2.3 Tipo de electrodos de tungsteno para el proceso GTAW. Tomado de [26, pp. 3-17]	42
2.4 Polaridad de corriente para soldadura. Basado en [26, pp. 62,63], [35].	43
2.5 Ejemplo de tolerancia para la aplicación de corriente de acuerdo a [26]	45
2.6 Ejemplo de tolerancia para la aplicación de velocidad de desplazamiento con base en [26].	47
3.1 Composición química del acero inoxidable ferrítico para experimentación AISI 430 (Wt.%)	62
3.2 Propiedades mecánicas bajo tensión del acero original	63
3.3 Niveles del diseño experimental con variables codificadas y naturales [57].	66
3.4 Diseño del experimento y orden de las corridas que se experimentaron.	67
3.5 Aumentos y número de campos utilizados en las veinte uniones soldadas GTAW-P transversales y longitudinales para la caracterización microestructural.	74
3.6 Delimitación de la región experimental determinada por el DOE	91
3.7 Objetivos de la optimización de respuestas para soldadura GTAW-P robotizada en acero inoxidable ferrítico 430.	93
4.1 Resultados promedio de las salidas del sistema para cada corrida experimental	108
4.2 Variables de entrada para las 20 corridas experimentales, su respectivo calor de entrada y la distancia real del arco eléctrico entre la pieza y el electrodo del robot.	109
4.3 Propiedades mecánicas bajo tensión de juntas soldadas robóticas GTAW-P para acero inoxidable 430 más representativas.	137
4.4 Análisis de varianza de la regresión $UTS$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	144
4.5 Análisis de varianza de la regresión $Y_s$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	145
4.6 Análisis de varianza de la regresión $Elongación$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	146
4.7 Análisis de varianza de la regresión $ZAC$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	147
4.8 Análisis de varianza de la regresión $G_z$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	149
4.9 Análisis de varianza de la regresión $Ng$ vs $C_w$ , $Sw$ , $Ps$	150

4.10 Combinaciones optimizadas de parámetros para soldadura robotizada GTAW entregadas por las redes neuronales	158
4.11 Predicciones iniciales de respuestas de la combinación de parámetros, entregadas por las redes neuronales con selección teórica	158
4.12 Combinaciones de parámetros explicitando la corriente de soldadura y predicciones de las redes neuronales optimizadas	160
4.13 Respuestas optimizadas obtenidas de las predicciones de las redes neuronales	160
4.14 Combinación óptima de parámetros, obtenida de ANN para modelar y simular unión soldada	162
4.15 Resumen de los datos entregados por el software desarrollado para la simulación de resistencia mecánica optimizada.	163

# Índice de figuras

Figura	Página
1.1 a) Micrografía del metal base a 500x con reactivo Marble. b) Micrografía de la interface metal base -ZAC a 500x con reactivo Marble. c) Micrografía del cordón de soldadura a 500x con reactivo Marble [10, pp. 66,67,69].	3
1.2 Microestructura de unión soldada en acero AISI 430 a) crecimiento de grano en la ZAC y b) martensita intergranular en la soldadura [12, p. 6]	5
1.3 Microestructuras de la zona de fusión de unión en acero AISI 430 a) sin gas, b) con gas activo SiO <sub>2</sub> y c) gas Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Tomado de [13, p. 57].	6
1.4 Siete pasos para un DOE. Elaboración propia con información de [16, p. 545].	10
1.5 Mapa mental de las técnicas de optimización que se han utilizado para procesos de soldadura. Elaboración propia basada en [16, pp. 544-554].	11
1.6 Desarrollo de red neuronal. Tomado de [16, p. 551], traducción propia.	12
1.7 Parámetros evaluados para la optimización de soldadura en chapas de acero inoxidable AISI 304L	13
1.8 Modelo de la Red denominada FNN-1999 por [12, p. 37s], traducción propia.	15
1.9 Aumento del precio en USD por tonelada del Ni en la década 1997 a 2007. Tomado de [3, p. 13].	17
2.1 Línea de tiempo de la historia del acero inoxidable. Elaboración propia.	24
2.2 Mapa mental de aceros inoxidables de acuerdo a la clasificación de la AISI. Elaboración propia basada en [11].	26
2.3 Auto pasivación del acero inoxidable. Tomado de [31, p. 2].	27
2.4 Diagrama de aceros inoxidables ferríticos. Elaboración propia, basada en [30, pp. 366,367].	28
2.5 Mapa mental de acero inoxidable ferrítico. Elaboración propia.	29
2.6 Diagrama de equilibrio Fe-Cr. Tomado de [21, p. 9], traducción propia.	32
2.7 Diagrama Fe-Cr-C. Tomado de [21, p. 10], traducción propia.	32
2.8 Diagrama original de Anton Schaeffler para predecir los cambios de en la microestructura del acero inoxidable [37, p. 5]	34
2.9 Cambio de estructura cristalina del acero inoxidable ferrítico 430. Elaboración propia ®	35
2.10 Física del arco eléctrico en polaridad DCEP (Corriente Directa con Electrodo Positivo). Traducción y modificación propia de [38, p. 29].	37

2.11 Técnicas de soldadura por arco eléctrico como mapa mental. Elaboración propia.....	38
2.12 Diagrama esquemático de equipo de soldadura. Tomado de [40, p. 11] .....	39
2.13 Soldador utilizando técnica GTAW (TIG), haciendo unión con material de aporte. Elaboración propia®.....	40
2.14 Vista esquemática del proceso de soldadura GTAW que muestra la antorcha, el metal de aporte y el metal base. Traducción propia de [40, p. 15]. .....	41
2.15 Efecto de la corriente y calor de entrada en la fusión del metal de soldadura. Elaboración propia ®.....	44
2.16 Corriente pulsada de soldadura de onda cuadrada y sinusoidal. Elaboración propia®.....	46
2.17 Posiciones de soldadura en Filetes. Tomado de [42, p. 7] .....	48
2.18 Mapa mental de generación de robots industriales. Elaboración propia ® basado en [45]. .....	49
2.19 Vista general de los elementos que conforman un robot industrial. Elaboración propia ®.....	51
2.20 a) Vista esquemática de un brazo robótico FANUC© modelo arc mate, b) cabezal para soldadura GTAW o GTAW-P con alimentador para el micro alambre, para modelos Fronius. Elaboración propia ®.....	52
2.21 a) Diagrama esfuerzo-deformación obtenida del análisis de un material sometido a cargas en máquina universal de pruebas, b) Probeta con longitud inicial y probeta fracturada. Tomadas de [30, pp. 52,54] .....	53
2.22 Pasos para preparar muestra metalográfica. Elaboración propia ®.....	55
2.23 Lente objetivo del microscopio óptico. Tomado de [50, p. 144] .....	56
2.24 Esquema del ensayo Vickers. Elaboración propia basada en [30, p. 45], [53]. .....	58
3.1 Diagrama de bloques del proceso de experimentación cuyo objetivo es la optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P en acero inoxidable 430. ....	61
3.2 Cupones de soldadura robotizada: a) Diseño de cupones para soldadura robotizada GTAW-P, b) Vista esquemática de cupón con preparación, desbaste e identificación y c) Fotografía del cupón TIG2 con limpieza previa a soldadura. Elaboración propia ®.....	64

3.3 a) Diseño de la soldadura en lámina de acero inoxidable ferrítico elaboración propia ®) y b) Vista esquemática del ángulo de la antorcha a 90° aplicado en la soldadura robotizada GTAW-P [55, p. 66] .....	65
3.4 a) Diseño y programación de la trayectoria del robot FANUC® para soldadura GTAW-P en acero inoxidable ferrítico AISI 430, y b) Vista esquemática de los cupones de soldadura. Elaboración propia ® .....	69
3.5 a) Unión soldada cortada para metalografía, b) probeta transversal y c) espécimen longitudinal montada en baquelita. ....	71
3.6 Macrografías a 6.5x de las uniones soldadas GTAW-P antes de maquinarse: a) Anverso del cupón longitudinal TIG1, b) Vista macroscópica de la unión TIG1 por el reverso con falta de fusión, c) Anverso de la unión soldada TIG 10 en vista longitudinal y d) Reverso del cupón TIG10 con fusión completa del material.....	71
3.7 a) Vista esquemática de la evaluación de fusión de las chapas de acero inoxidable y b) Medición por estereoscopía transversal a 16x del metal recristalizado del espécimen TIG3. Elaboración propia ® .....	72
3.8 Vista esquemática del procedimiento para obtener micrografías panorámicas, por medio de PDI. Elaboración propia ®.....	75
3.9 a) Plantilla de tres círculos de Abrams ASTM E-112 [66, p. 11] sobre micrografía a 200x de la ZAC del espécimen TIG 8 para determinar el tamaño de grano y número G ASTM y b) Relación de tamaño de grano para granos uniformes, equiaxiales y orientación aleatoria ASTM E-112 [66, p. 8] .....	78
3.10 Metodología para medir el ancho de ZAC en soldadura robotizada GTAW- P con fusión completa: a) Vista esquemática del procedimiento y b) Micrografía panorámica del espécimen TIG 1 que ilustra estas mediciones en caso de fusión incompleta. Elaboración propia ®.....	79
3.11 Mediciones de ancho de ZAC: a) Macrografía TIG1 con fusión incompleta, b) Sección transversal TIG6, c) ZAC izquierda longitudinal a 50x de TIG14 y d) ZAC derecha de la unión TIG4. Elaboración propia®.....	80

3.12 a) Vista esquemática de obtención de la altura de corona y respaldo de uniones soldadas de acero inoxidable ferrítico, micrografías panorámicas a 50x de uniones soldadas robotizadas: b) TIG2 donde se observa la medición de corona y c) TIG 10 indicando la medición del respaldo. Elaboración propia ®.....	81
3.13 Mapa mental de la metodología para obtener la fracción volumétrica y porcentaje de martensita intergranular de uniones soldadas robotizadas GTAW-P en acero inoxidable ferrítico AISI 430 sin metal de aporte. Elaboración propia ®.....	82
3.14 PDI para obtener fracción volumétrica de MI: a) Micrografía a 200x de la muestra TIG10, b) Determinación de área por campo, c) y d) separación de canales y bits, e) y f) Análisis tridimensional de fases de difícil identificación. Elaboración propia ®.....	83
3.15 PDI de microestructura del espécimen TIG10: a) Martensita intergranular gruesa en color rojo, b) Extrusión de bordes para identificación de MI fina y c) Identificación de fase de interés en verde y gris. Elaboración propia ®.....	84
3.16 Planos de probeta de tensión (medidas en mm): a) Probeta estándar de 12.5 mm de ancho para caracterización inicial y b) Probeta reducida (6 mm) de la unión soldada. Elaboración propia ®.....	86
3.17 Fotografías de las probetas de tensión de unión soldada en acero 430. ....	86
3.18 Prueba de dureza Vickers: a) Distribución de indentaciones (elaboración propia ®), b) Distribución de probetas sobre porta-muestras y c) Huella de micro-indentación de la ZAC en muestra TIG10.....	87
3.19 Diagrama de flujo para el proceso de optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®.....	89
3.20 Modelo experimental de red neuronal para optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®.....	94
3.21 Proceso de entrenamiento de la red neuronal para optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®.....	95
3.22 Diagrama de Venn para el desarrollo de simulación del proyecto de optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia.....	96
3.23 Modelo para el desarrollo de la base de datos®. Elaboración propia ®.....	98
3.24 Captura de pantalla del desarrollo y creación de tablas relaciones de la base de datos®. ....	99

3.25 Desarrollo de cuatro clases® para software Simu430® que permite realizar simulación de curvas S-e y microestructura optimizadas. Elaboración propia ®.....	100
3.26 Resumen gráfico para la simulación de propiedades mecánicas curva S-e .....	101
3.27 Cuatro puntos para generación de curvas esfuerzo-desplazamiento optimizadas, de acuerdo con software desarrollado en C#. Elaboración propia ®.....	102
3.28 Síntesis de pasos para la simulación de microestructura optimizada de granos en la ZAC.....	103
3.29 a) Puntos de nucleación para creación de una región de Voronoi para simulación de microestructura y b) Desarrollo de código en JS para segmentación PDI. ....	104
3.30 Extracción de colores para simulación de microestructura: a) micrografía TIG8 matriz de granos gruesos, b) micrografía TIG10 coloración de segundas fases, c) color para granos gruesos, d) gama para ferrita poligonal e) y f) identificación del código hexadecimal .....	106
4.1 Calor de entrada para cada corrida experimental de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ® .....	111
4.2 a) Relación del calor de entrada con la distancia real de trabajo entre la pieza y electrodo en cada corrida experimental y b) Tendencia del calor de entrada. ....	112
4.3 Microestructuras predichas de acuerdo al diagrama de Schaeffler, tomado y modificado de [37, p. 5]. ....	113
4.4 Evaluación de la fusión del metal y la penetración de la soldadura. a) Porcentaje de fusión de las uniones soldadas GTAW-P robotizadas y b) Evaluación de los cupones de soldadura con base en penetración de soldadura. ....	114
4.5 Macrografías obtenidas a través de la estereoscopía a 16x de la sección transversal de las uniones soldadas robotizadas GTAW-P: a) TIG8 que muestra una penetración completa, b) TIG10 con distorsión térmica, c) TIG14 sin defectos y d) TIG3 con mínima penetración de la soldadura.....	116
4.6 Ancho promedio de ZAC en mm de las mediciones hechas a la macroestructura.....	117



4.7 Análisis macroscópico de los cupones de soldadura longitudinales a 6.5x y transversales a 16 x a) Condición TIG 8 imagen longitudinal a 6.5 x b) Condición TIG 8 imagen transversal a 16 x, donde se observa fusión completa .....	118
4.8 Partes de la unión soldada, ilustradas de forma idealizada. Elaboración propia ®.....	119
4.9 Panorámica con las zonas de análisis identificadas. Elaboración propia ® .....	120
4.10 a) Micrografía panorámica transversal de la unión TIG 8 con fusión completa corona y respaldo de 115µm b) Micrografía panorámica transversal de la unión TIG 14 que muestra una adecuada fusión. ....	121
4.11 Micrografía panorámica transversal a 50x de la unión TIG 10, con socavado. ....	123
4.12 Micrografía en amplio formato a 50x del espécimen TIG 1 en corte transversal... 124	
4.13 Micrografía en amplio formato a 50x del espécimen TIG 20 en corte transversal .....	125
4.14 Probetas transversales obtenidas a través de microscopía óptica de la junta soldada robotizada GTAW-P TIG8: a) dos zonas microestructurales de la unión, b) ferrita alotriomórfica en la ZAC, c) ferrita de placa lateral Widmanstätten dentro de metal fundido, d) matriz ferrítica en metal base.....	126
4.15 Probetas transversales obtenidas por estereoscopia y microscopía óptica de una junta soldada robotizada GTAW-P TIG10: a) Macroscopía a 16x granos columnares en el metal fundido, b) martensita intergranular dentro del ZAC, c) placas laterales de ferrita Widmanstätten de metal fundido, y d) granos ferríticos en el metal base. ....	128
4.16 Imágenes transversales obtenidas por estereoscopia y microscopía óptica de la unión soldada robotizada GTAW-P TIG14: a) granos gruesos en la ZAC, b) ferrita alotriomórfica en la ZAC, c) ferrita acicular de metal fundido, d) matriz ferrítica para la base metal.....	129
4.17 Curva continua entre los valores del tamaño de grano y el número ASTM G con respecto al calor de entrada para soldaduras robotizadas GTAW-P.....	130
4.18 Evaluación del ancho de la ZAC de las uniones soldadas robotizadas GTAW-P, donde las muestras TIG10, TIG14 y TIG8 exhibieron valores más bajos, como se puede ver en las imágenes vectorizadas de elaboración propia ®. ....	132

4.19 Comparativa de mediciones ancho de ZAC, a) macrografía transversal a 16x de la muestra TIG 1, b) micrografía panorámica a 50x de la muestra TIG 1.....	133
4.20 Gráfica de diferencial en $\mu\text{m}$ del ancho de ZAC en mediciones por estereoscopia (16x) y micrografías panorámicas (50x).....	134
4.21 Curva continua de la evaluación de la fracción volumétrica de martensita intergranular en relación al calor de entrada en uniones soldadas GTAW-P robotizadas.....	135
4.22 Gráfica esfuerzo- deformación de las probetas de caracterización inicial del metal AISI 430.....	136
4.23 Gráfica S-e para las tres condiciones de soldadura con mejor desempeño en la prueba de tensión.....	139
4.24 Resistencia máxima a la tensión, esfuerzo a la cedencia y curva continua del porcentaje de elongación en las veinte corridas experimentales de soldadura robotizada GTAW-P sin metal de aporte.....	140
4.25 Tipos de endurecimiento en soldadura de acero inoxidable AISI 430 sin metal de aporte.....	141
4.26 Perfil de micro-dureza, donde se observa que la probeta TIG11 tuvo el mejor desempeño en la distribución de dureza.....	142
4.27 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de la resistencia máxima a la tensión: a) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, b) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, c) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.....	152
4.28 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de esfuerzo de cedencia: d) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, e) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, f) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.....	153
4.29 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de elongación: g) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, h) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, i) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.....	154
4.30 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho de la ZAC: j) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, k) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, l) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.....	155

4.31 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho del tamaño de grano en la ZAC: m) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, n) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, o) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos. ....	156
4.32 Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho del número G ASTM: p) Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, q) Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, r) Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos. ....	157
4.33 Representación gráfica de las redes neuronales y selección de predicciones. Elaboración propia ®.....	160
4.34 Pares de datos obtenidos del software desarrollado® para simulación de curva S-e. Elaboración propia ® .....	163
4.35 Gráfica S-e de la probeta experimental TIG 8 y las simulaciones Sm1 y Sm2 de parámetros optimizados. Elaboración propia ®.....	164
4.36 Gráficas esfuerzo deformación del metal original, mejor probeta experimental y mejor combinación optimizada por redes neuronales. Elaboración propia ®.....	165
4.37 Evolución geométrica de la región de Voronoi para la simulación de estructura ferrítica optimizada. Elaboración propia ® .....	166
4.38 Evolución de los algoritmos aplicados para procesamiento digital de la región de Voronoi. Elaboración propia ® .....	168
4.39 Evolución de los algoritmos aplicados para procesamiento digital de la región de Voronoi. Elaboración propia ® .....	169
4.40 Comparativa de micrografía del espécimen TIG 8 experimental contra la imagen obtenida por medio de simulación. Elaboración propia ®.....	170
4.41 Test en 3D por PDI de la micrografía simulada en 2D, donde se logró el relieve propio de la ZAC de una unión soldada, con un defecto de borde. ....	171
4.42 Micrografía de la ZAC simulada que muestra granos ferríticos gruesos y en color rojos aquellos que emulan estar más cercanos al metal de soldadura.....	172

## Listado de símbolos y nomenclaturas

$\alpha$	Valor estadístico
°C	Grado Celsius conocido como grado centígrado
E%	Porcentaje de elongación
°F	Grados Fahrenheit
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\mu\text{m}^2$	Micra cuadrada
C#	<i>C Sharp</i> . Lenguaje de programación de código cerrado, desarrollado por Microsoft©
r	Lenguaje de programación de código abierto
R	Coeficiente de correlación
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinación al cuadrado
A	Amperaje
AC	Corriente Alterna
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Aluminio
ANN	Red Neuronal Artificial
AQ	Análisis químico
Ar	Argón
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BCC	Cúbica centrada en cuerpo
BCT	Centrada en Cuerpo Tetragonal

C	Carbono
CA	Corriente alterna
CD	Corriente Directa
CDPD	Corriente Directa Polaridad Directa
CDPI	Corriente Directa Polaridad Invertida
CIDESI	Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
CJP	Complete Joint Penetration, se refiere a la penetración completa de la soldadura.
Cm	Centímetros
Cr	Cromo
C <sub>req</sub>	Cromo equivalente
CVS	<i>Comma-separated values</i> , tipo de documento abierto con terminación .cvs
Cw	Corriente de soldadura
DCEN	Corriente Directa con Electrodo Negativo
DCEP	Corriente Directa con Electrodo Positivo
DCSP	Corriente Continua Polaridad Directa
Desv. St.	Desviación estándar
DOE	Diseño de experimentos
EGW	<i>Electrogas Welding</i>
ESTK	<i>Adobe ExtendedScript Toolkit</i> . Herramienta de programación extendida para Adobe.
EWCe-2	Electrodo de Tungsteno con 2% de Cerio
EWLa-1	Electrodo de Tungsteno con 1% de Lantano

EWLa1.5	Electrodo de Tungsteno con 1.5% de Lantano
EWLa-2	Electrodo de Tungsteno con 2% de Lantano
EWP	Electrodo de Tungsteno puro (99.5 2% de W)
EWTh-1	Electrodo de Tungsteno con 1% de Thorio
EWTh-2	Electrodo de Tungsteno con 2% de Thorio
EWZr	Electrodo de Tungsteno con Zirconio
FANUC	Marca de productos y servicios de automatización
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
FCC	Estructura Cristalina Cúbica Centrada en Caras
Fe	Hierro
Fv	Fracción Volumétrica
G ASTM	Número estandarizado por ASTM denominado tamaño de grano G.
GL	Grados de libertad
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GMAW-P	<i>Gas Metal Arc Welding- Pulsed</i>
GMAW-S	<i>Gas Metal Arc Welding- Short</i>
GPa	Giga Pascales
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
GTAW-P	<i>Gas Tungsten Arc Welding-Pulsed</i>
Gz	Tamaño de Grano
He	Helio
HSLA	Aceros de baja aleación y alta resistencia.
Hz	Hertz o Hercio

IA	Inteligencia Artificial
Id	Identificador
JS	JavaScript. Lenguaje de programación.
$Q_{net}$	Calor de entrada neto
macOS	Sistema operativo de Macintosh
Max	Máximo
Mg	Magnesio
MI	Martensita Intergranular
Mm	Milímetros
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
MPa	Mega Pascales
Ms	Milisegundos
MSR	Metodología de superficie de respuesta
MySQL	Sistema de gestión de Base de Datos de Oracle, en código abierto
N/A	No aplica
Nb	Niobio
Ng	Número G
Ni	Níquel
$Ni_{eq}$	Níquel equivalente
NN	Red neuronal
ODBC	Estándar abierto de conectividad de Base de Datos
P	Fósforo

PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PDI	Procesamiento Digital de Imágenes
PJP	Penetración parcial de la soldadura
POO	Programación orientada a objetos
Ps	Pulsos del arco
Plg	Pulgada
RPM	Revoluciones por Minuto
S	Azufre
SAW	Soldadura por arco sumergido
S-e	Esfuerzo deformación
Se	Selenio
SGDB	Sistemas de Gestión de Bases de Datos relacionales
Si	Silicio
SMAW	Soldadura Manual por arco eléctrico
SQL	Lenguaje de programación de consulta estructurada, utilizado en Sistemas de Gestión de Bases de Datos relacionales (SGDB)
SQL Server	Servidor de Base de datos SQL Microsoft©
SP2	<i>Service Pack 2</i>
Sw	Velocidad de soldadura
Ti	Titanio
TIG	Proceso de soldadura con electrodo de Tungsteno y gas inerte.
TIG-P	Proceso de soldadura pulsado con electrodo de Tungsteno y gas inerte.



Ton	Tonelada
UML	Lenguaje unificado de modelado
USD	United States Dollars
UTS	Resistencia Máxima a la Tensión
V	Voltaje
W	Tungsteno
WPS	Especificación del procedimiento de soldadura, formato estandarizado.
Ys	Esfuerzo de Cedencia
ZAC	Zona Afectada por el Calor

## Resumen

Se estudió el efecto de los parámetros de corriente de soldadura, velocidad de soldadura, pulsos del arco y su relación con el calor de entrada sobre la resistencia mecánica bajo tracción y dureza, la microestructura, el tamaño de grano en la ZAC y su ancho de uniones soldadas por fusión con soldadura robotizada por arco de tungsteno gaseoso pulsado (GTAW-P) en una hoja de acero inoxidable ferrítico 430 de 1,5 mm de espesor. Se usaron pruebas mecánicas de tensión y microdureza Vickers donde se observó el endurecimiento del metal de soldadura y la ZAC, así mismo, se utilizó estereoscopía, microscopía óptica y procesamiento digital de imágenes para la caracterización microestructural (2D y 3D) y determinación de fracción volumétrica de MI.

Los resultados sugirieron que la condición imponderable de las corridas experimentales fue la combinación de 120 A, 15 Hz y 15 plg/ min (TIG8), logró fusión completa, geometría simétrica del cordón de soldadura, así mismo alcanzó una resistencia máxima a la tensión de 457 MPa, baja presencia de martensita en la ZAC y en el metal de soldadura, donde hubo ferrita secundaria Widmanstätten; ancho ZAC moderado (1.43 mm), tamaño de grano medio (10.84  $\mu\text{m}$ ) y ferrita alotriomórfica dentro de la ZAC recristalizada, estructuras que se asociaron al mayor endurecimiento en el metal fundido seguido de la ZAC, derivado de la combinación de parámetros.

La distribución de endurecimiento se vio que la corrida TIG 11 tuvo la distribución de dureza ideal alcanzando 342 Vickers en la zona de soldadura, como consecuencia de las microestructuras en el metal fundido y la combinación de parámetros, mientras que la corrida TIG 4 mostró un perfil no deseado con endurecimiento en la ZAC con un valor de 210 Vickers.

El menor porcentaje de fracción volumétrica de martensita intergranular se encontró en la corrida TIG 8 con un 0.8%, en contraste la condición crítica fue la corrida TIG 16 con 4.3% de martensita intergranular relacionadas al  $Q_{\text{net}}$ .

La optimización de los parámetros se logró utilizando métodos de superficie de respuesta con base en los datos obtenidos de las corridas experimentales y redes neuronales artificiales (ANN) para obtener una combinación óptima con predicciones de resultados que se validaron con mediante simulación, obteniendo la combinación óptima 124.9 A, 15.5 plg/min y 16.4 Hz. El modelamiento y simulación de las respuestas de esa combinación, se realizó mediante el desarrollo de software orientado a objetos para la resistencia mecánica bajo tracción consiguiendo 491 MPa de Resistencia máxima a la tensión (UTS), 335 MPa de Esfuerzo de cedencia y 32% de elongación , mientras que para la microestructura se utilizó una combinación de software orientado a geometría, vectorización, algoritmos de corte gráfico y agrupamiento de pixeles así como otras técnicas de procesamiento digital de imágenes, que en conjunto lograron emular una micrografía optimizada 2D y 3D de la corrida determinada como óptima por las redes neuronales.

## Abstract

*This thesis analyzed the effect of the parameters of welding current, welding speed, arc pulses and its relationship with the input heat on the mechanical resistance under traction and hardness. The microstructure, the grain size in the ZAC and width of fusion welded joints with robotic pulsed tungsten gas arc welding (GTAW-P) on a 430 ferritic stainless steel sheet of 1.5mm thick. In the analysis was used mechanical tests of tension and Vickers microhardness, in order to observe the hardening of the weld metal and the ZAC, likewise I applied stereoscopy, light microscopy and digital image processing for microstructural characterization (2D and 3D) and determination of volumetric fraction from MI.*

*The results suggested that the imponderable condition of the experimental runs (TIG8) was the combination of 120 A, 15 Hz and 15 in / min, achieved complete fusion, good geometry of the melted metal, and also reached a maximum tensile strength of 457Mpa, showing a grain refinement in the ZAC free of martensite in the ZAC and in the weld metal where there was secondary Widmanstätten ferrite; it was observed moderate ZAC width (1.43 mm), medium grain size (10.84  $\mu\text{m}$ ) and alliotromorphic ferrite inside the recrystallized ZAC.*

*The optimization of parameters was carried out using response surface methods, artificial neural networks (ANN), tending 124.9 A, 15.5 in / min and 16.4 Hz as the optimal combination. The modeling and simulation of optimized welded joint was performed using the development of object-oriented software for mechanical resistance under traction achieving 491 MPa of maximum tensile strength (UTS), 335 MPa of yield stress and 32% elongation. While for the microstructure, software oriented to geometry, vectorization, graphic cutting algorithms and pixel clustering as well as other digital image processing techniques, emulating an optimized 2D and 3D micrography.*

# 1

# Introducción

---

## 1.1 Preámbulo

**E**l acero inoxidable ferrítico (FSS) tiene 16 a 18 % Cr, puede laminarse en frío o en caliente, tiene alta ductilidad misma que se obtiene del recocido [2]. Las aplicaciones comerciales de este acero son muy amplias [3], se encuentran en escapes automotrices, acabados arquitectónicos, campanas de cocina, componentes de electrodomésticos, ductos e incluso en piezas de arte [4], [5], [6], [7].

El proceso GTAW en acero inoxidable ferrítico, permite hacer uniones soldadas con metal de aporte o fusión; bajo atmósfera controlada por gases inertes (Ar y He) siendo un proceso eficiente con aceros inoxidables brindando apariencia estética en el acabado de la soldadura [8].

La búsqueda de soluciones para mejorar la soldabilidad en acero inoxidable ferrítico AISI 430 ha sido extensa, costosa y aún es un área vasta de estudio [9]. Existen mínimos trabajos que logren uniones soldadas con sanidad por fusión mediante proceso de soldadura robotizada GTAW de arco pulsado en lámina de 1.5 mm de espesor de acero inoxidable ferrítico 430, controlando únicamente variables del proceso.

## 1.2 Estado del arte

### 1.2.1 Estudio experimental de la soldabilidad en el acero inoxidable ferrítico AISI 430 con material de aporte austenítico mediante el proceso de soldadura GTAW.

Gallo, se dio a la tarea de hacer experimentación en un acero AISI 430 con técnica GTAW manual, sobre especímenes de 3 mm con soldadura a tope con aporte de alambre inoxidable ER316L de naturaleza austenítica, evaluando parámetros de precalentamiento, voltaje del arco, corriente de soldadura y velocidad de avance para mejorar la soldabilidad de este tipo de acero [10].

También utilizó multipase en las probetas, así como oscilación para la técnica de soldadura. Para evaluar los resultados de su experimentación ejecutó ensayos de microscopía (figura 1.1) tracción, dobléz, microscopías, ensayo de Houldcroft, radiografía industrial y por supuesto, inspección visual.

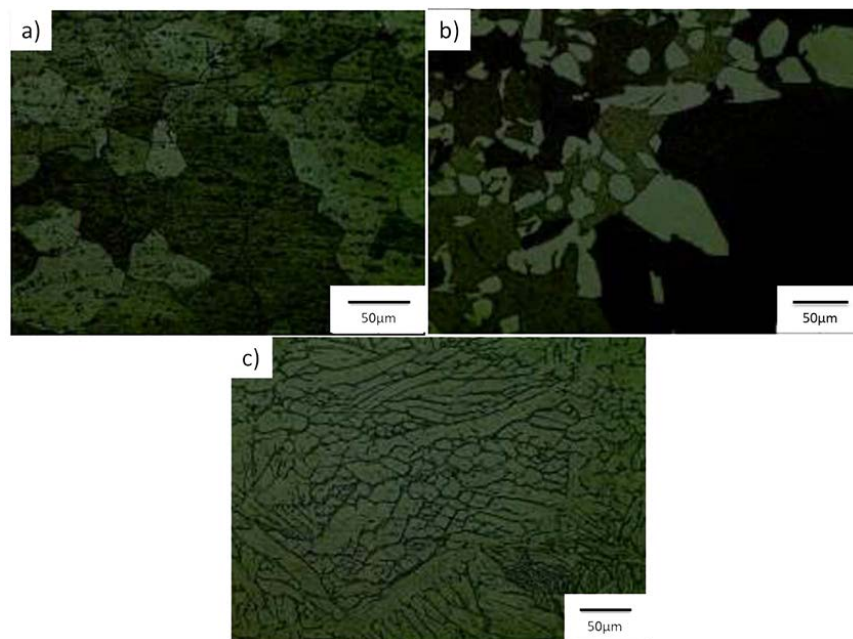
**Tabla 1.1** Parámetros de las probetas de acero inoxidable AISI430 [10, p. 53].

No. Probeta	Temperatura de precalentamiento (°C)	Temperatura entre pases (°C)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Velocidad de avance (mm/s)
1	NA	NA	10.5	91	1.60
2	NA	NA	12	109	1.05
3	190	NA	10	94	2.23
4	200	NA	11	100	1.03

De las cuatro probetas, sólo dos fueron sometidas a ensayos de tracción, en virtud de que fueron aquellas que cumplieron con los requisitos mínimos establecidos en la norma AWS D1.6 [11]. En ellos los estudios se presentaron fractura en el metal base,

teniendo valores de 507.45 y 476.42 MPa respectivamente, con lo cual se dedujo que ambas probetas tienen buena resistencia a la tracción.

Los resultados resultaron interesantes, dado que logró determinar que el precalentamiento es un factor de suma importancia. Una de sus probetas donde no existió precalentamiento, se usó corriente y voltaje del arco con valores bajos, no hubo penetración de la soldadura y fue desechada. En el caso de la probeta que de igual manera no tubo precalentamiento arrojó discontinuidades y falta de fusión en la raíz de la soldadura, presentando fracturas en el material base durante los ensayos de tracción.



**Figura 1.1** a) Micrografía del metal base a 500x con reactivo Marble. b) Micrografía de la interface metal base -ZAC a 500x con reactivo Marble. c) Micrografía del cordón de soldadura a 500x con reactivo Marble [10, pp. 66,67,69].

La combinación óptima de su experimentación se obtuvo en la probeta 4, con precalentamiento de 200°, dos pases de soldadura a 104 y 114 A, 12 V, oscilado, con una distancia de trabajo entre la pieza y electrodo de 2.4 mm, velocidad de avance de 5 y 7.6 cm/min y polaridad DC. En esta probeta, se obtuvo microestructura ferrítica

uniforme con crecimiento de grano menor en comparación a las otras, con menor presencia de martensita.

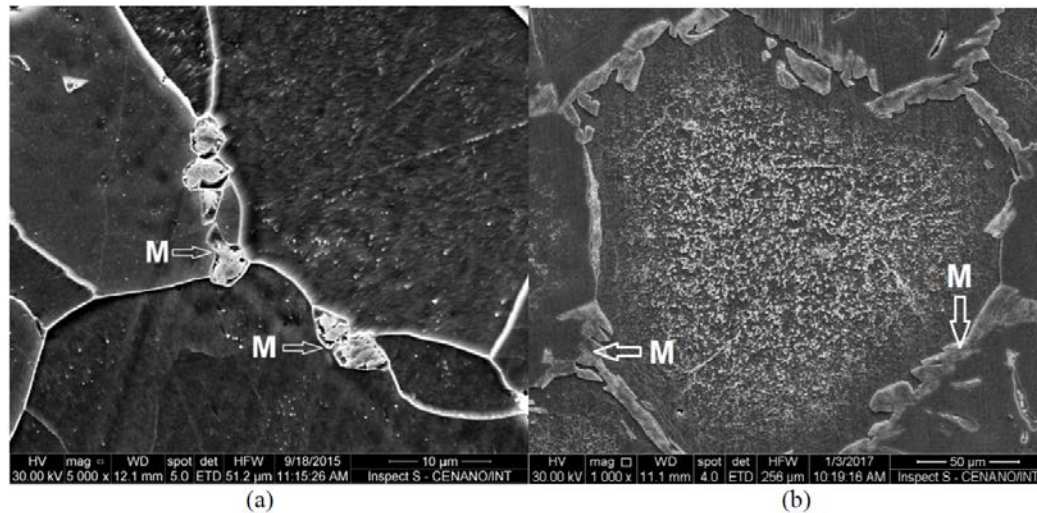
Concluye su estudio determinando que el voltaje del arco no es un factor fundamental como sí lo es el precalentamiento logrando su óptimo entre 190 y 200°C, recomendando en este sentido elevar en 20-30°C el precalentamiento a fin de que se mantenga el valor deseado al momento de iniciar la soldadura. En cuanto a la intensidad de la corriente y la velocidad de avance, también resultan en fundamentales, así como la preparación de la junta a tope, ya que la falta de bisel en junta a tope resulta en falta de penetración en la raíz.

### **1.2.2 Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura y grados de sensibilización del metal base y soldadura en acero inoxidable AISI 430.**

Tavares et al [12], enfocaron su investigación en la influencia de tratamiento posterior a la soldadura. En su investigación utilizó el proceso automatizado GTAW para producir uniones soldadas de acero inoxidable ferrítico AISI 430 con especímenes de 15x10x3 mm, variando los parámetros para alcanzar 0.8 kJ/mm de calor de entrada y usando argón al 99.9% como gas de protección. Hizo tratamientos térmicos antes de entre 900- 1000°C y después de la soldadura de 700°C por 1 h, enfriando con agua. Otro más fue de 600-800°C después del enfriamiento, se encontraron granos ferríticos gruesos con martensita intergranular.

Logró con ello descomponer la martensita en ferrita y carburos, aplicando tratamiento térmico posterior a la soldadura a 700°C, mejorando con ello la resistencia a la corrosión. Llegando a la conclusión de que un calentamiento posterior a la soldadura, *“promueve el templado de la martensita intergranular y aumenta la resistencia a la corrosión (sic)”* [12, p. 8].



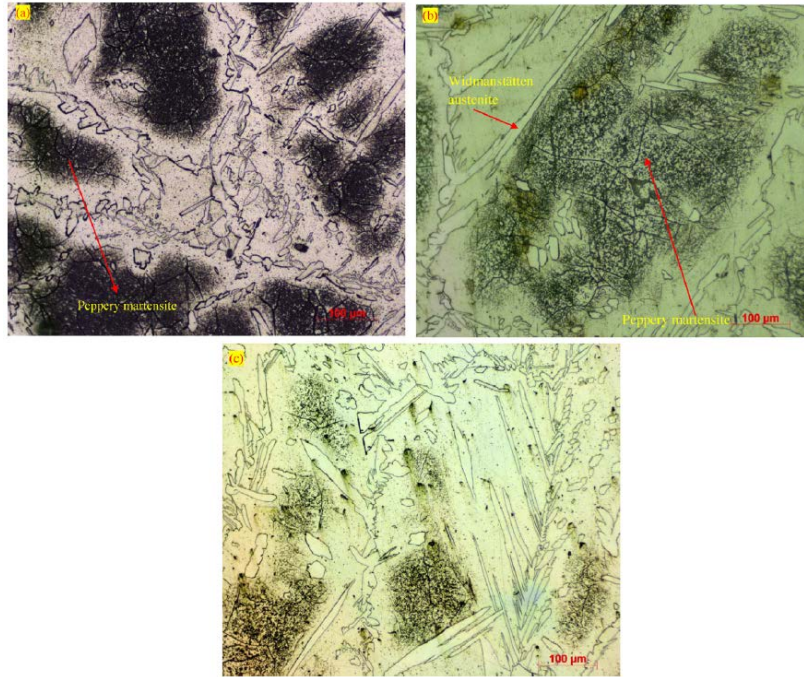


**Figura 1.2** Microestructura de unión soldada en acero AISI 430 a) crecimiento de grano en la ZAC y b) martensita intergranular en la soldadura [12, p. 6]

### 1.2.3 Estudios comparativos en la soldabilidad, microestructura y propiedades de tracción autógena de soldadura TIG en acero inoxidable AISI 430 con y sin flujo de gas.

En este artículo [13] se estudió la soldabilidad del acero AISI 430 sin material de aporte, utilizando proceso TIG con gases activos ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y sin ningún gas de protección a fin de estudiar efectos de estos en la soldadura por fusión. Utilizaron corrientes de 180, 200 y 220 A.

En sus micrografías encontraron presencia de ferrita-martensita intergranular libre de precipitado en la ZAC y en la zona fusión apareció martensita, presentado fallas a la tracción. En todos los casos se encontró martensita en la zona de fusión (figura 1.3). También se encontró que el uso de gases activos mejoró la penetración de la soldadura, pero proliferó el cambio de fases. La eficacia en la soldadura sin material de aporte en acero inoxidable AISI 430 se obtuvo utilizando Dióxido de Silicio, mejorando la resistencia de la junta en un 87%.



**Figura 1.3** Microestructuras de la zona de fusión de unión en acero AISI 430 a) sin gas, b) con gas activo  $\text{SiO}_2$  y c) gas  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Tomado de [13, p. 57].

Los autores retoman el trabajo de Lippold y Kotecki a fin de justificar la presencia útil de martensita en su experimentación, argumentando que, la presencia de martensita en aceros inoxidables no solo es perjudicial, si no, de manera ambivalente también resulta benéfica, y está siempre estará presente en la soldadura en aceros inoxidables ya que *“cualquier austenita que se forme a temperatura elevada se transformará en martensita al enfriarse a temperatura ambiente sin dejar carbono disponible para la formación de carburos (sic)”* [13, p. 65].

Para los casos de soldadura sin material de aporte y sin flujo de gas, las experimentaciones resultaron no favorables, ya que las muestras tenían defectos importantes de tracción, en la microestructura, pérdida de ductilidad y presencia de poros. Se encontró que los respaldos de cobre, ocasionaron un enfriamiento rápido de las muestras, generando un efecto de cambio de la austenita generado en la unión a martensita.

## 1.2.4 Influencia de la adición de Cobre y Aluminio en las propiedades mecánicas y comportamiento de la corrosión en acero inoxidable ferrítico AISI 430 con GTAW.

En esa tesitura es que se ha buscado la manera lograr que las propiedades mecánicas se vean lo menos afectadas o sean favorecidas con la adición de algunos metales, tal como lo plantea [14] en su estudio sobre el efecto de la adición de cobre y aluminio en mecánica de un acero inoxidable ferrítico AISI 430.

En dicho estudio se hicieron uniones soldadas a tope en placa de 5mm de espesor con proceso GTAW con cinco pases, utilizando metal de aporte de la misma categoría que el metal base y adicionándoles Cu en forma de lámina y polvo de Al a razón de 100µm. Los parámetros evaluados fueron Corriente de soldadura (A), Voltaje del arco (V), Velocidad de avance (mm/min) y la polaridad, mismos que se detallan en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2** Parámetros y valores aplicados en la experimentación de [14, p. 239].

Parámetro	Valor
Corriente (A)	120
Voltaje del arco (V)	10-13
Velocidad de avance	50mm/min
Polaridad	DCSP
Número de pasos	3

Se aplicó post calentamiento a 830°C con un enfriamiento con agua de 30 minutos. Resultando que al aplicar 2.4% de Aluminio mejoramiento en las propiedades de tracción, fuerza y elongación, por el refinamiento del grano y presencia de carburos

de aluminio, finalmente con la adición de 0.18% de Cu en la unión soldada y recocidas se obtuvo mejor resistencia a la corrosión.

### 1.2.5 Influencia de la adición de Aluminio y Titanio en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable ferrítico AISI 430 con soldadura GTA.

Es así que se esboza el mejoramiento en las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. El mismo autor ya había planteado adiciones de metales en experimentación anterior, tal como lo muestra su estudio sobre la influencia del aluminio y titanio en especímenes AISI 430 por medio de GTAW [15].

Para su investigación utilizó especímenes de 5mm de espesor, aplicando precalentamiento de 100°C, utilizando proceso GTAW con metal de aporte de 1.6 mm de espesor AISI430 en uniones a tope con los valores en los parámetros de experimentación que se muestran en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3** Parámetros GTAW aplicados por [15, p. 482].

Parámetro	Valor
Corriente (A)	120
Voltaje del arco (V)	10-13
Velocidad de avance	50mm/min
Polaridad	DCSP
Número de pasos	3

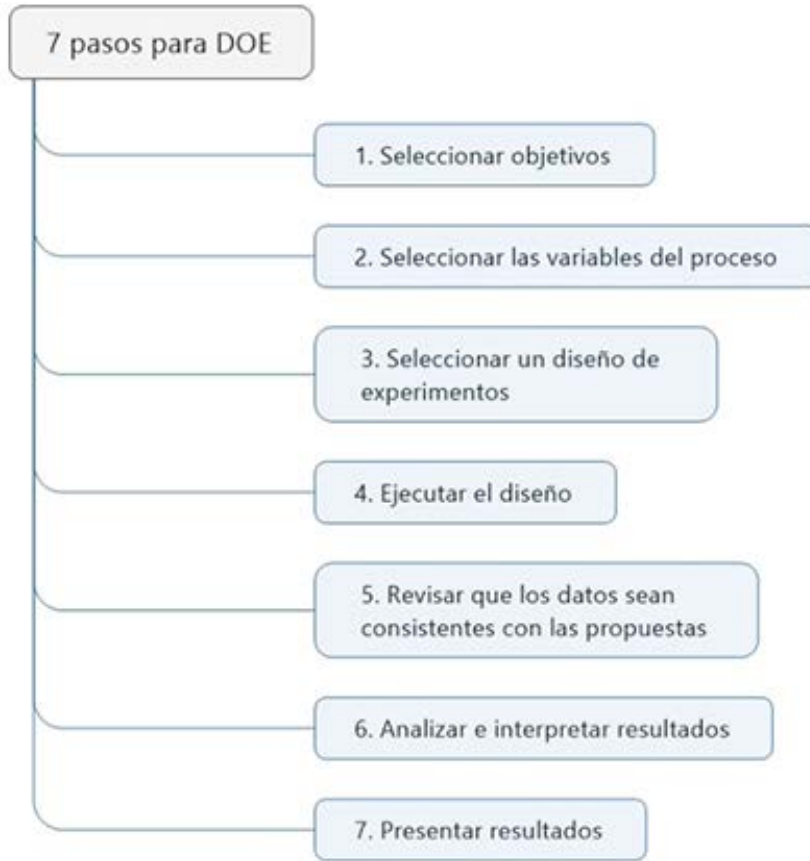
Durante el proceso de soldadura, se agregó polvo de Aluminio y Titanio de malla de 100µm, logrando mejoramiento en las propiedades mecánicas como la de resistencia última a la tracción, resistencia al rendimiento y el porcentaje, logrando también un refinamiento del grano y formación de carburos de aluminio y carburos de Titanio, esto, gracias a la adición de 2.4% de Al y 0.7%de Ti, favoreciendo también la ductilidad del material.

## **1.2.6 Una revisión en la optimización de procesos de soldadura.**

Raja-Dhas et al [16], hicieron una exploración sobre diversas investigaciones de optimización de procesos de soldadura a fin de hacer una diferenciación de metodologías y comentar su análisis.

Parten de la premisa de identificar que en los procesos de soldadura existen variables que pueden ser controladas y optimizadas para tener las respuestas de salida deseadas, tendiendo como base cuáles son las variables que controlan el aspecto que se desea optimizar identificándose claramente, para posteriormente poder hacer una revisión sobre las técnicas de optimización aplicables a la soldadura.

El diseño de experimentos ha sido una de las técnicas más utilizadas y que ha sentado las bases para los experimentos de soldadura, debido a que es muy flexible y resulta en beneficios económicos ya que reduce el número de experimentos posibles. Se basa en siete pasos estructurados, que van desde la selección de objetivos hasta la presentación de resultados, tal como se muestra en la figura 1.4 Esta estructura permite llevar a cabo un diseño de experimentos exitoso y de bajo costo.

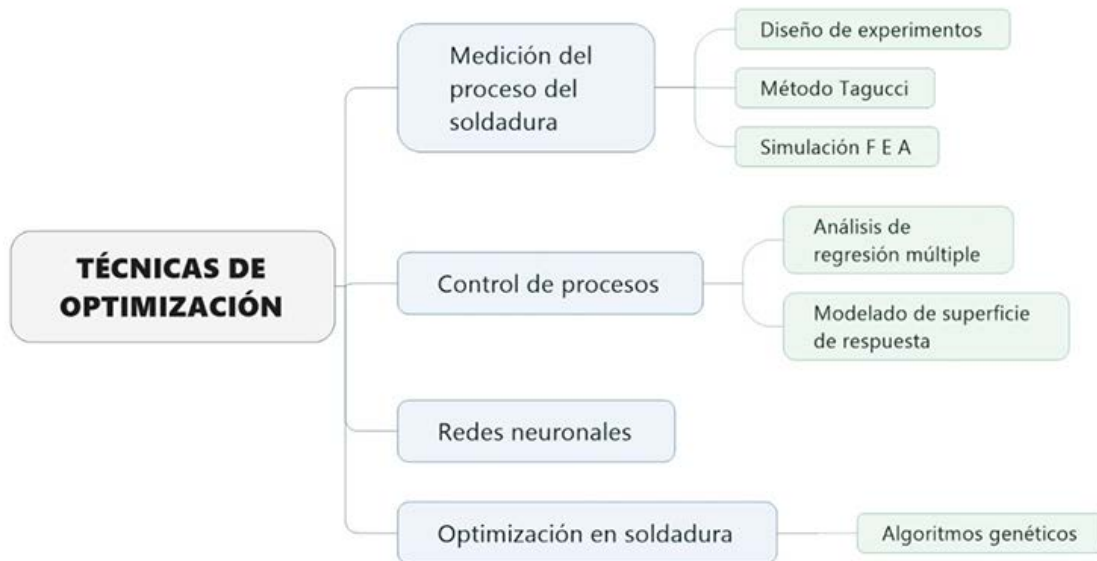


**Figura 1.4** Siete pasos para un DOE. Elaboración propia con información de [16, p. 545].

Ahora bien, es de suma importancia utilizar estas técnicas para optimizar procesos de soldadura, ya que esto aporta beneficios económicos y de calidad en las uniones soldadas con alta repetibilidad, atributos que, son ampliamente solicitados por la industria.

Esta revisión divide las técnicas de optimización en cuatro, la primera es para los procesos de medición de soldadura en ellos se ha empleado, Taguchi, diseño de experimentos y simulación por elementos finitos como lo es para la simulación de uniones soldadas con alta ductilidad, como el caso del aluminio y el acero inoxidable.

El segundo punto análisis trata sobre los procesos de control en la soldadura, y su eficiencia, donde se han aplicado métodos como regresión múltiple, redes neuronales artificiales y superficie de respuesta para la optimización de uniones soldadas.

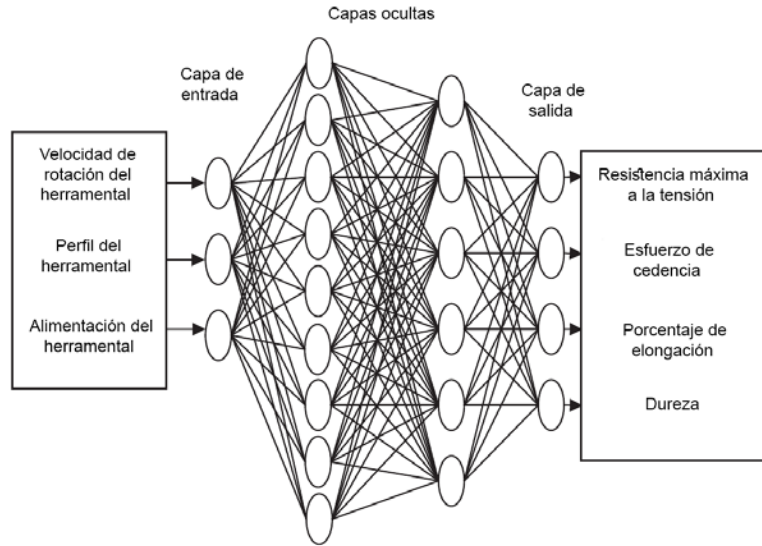


**Figura 1.5** Mapa mental de las técnicas de optimización que se han utilizado para procesos de soldadura. Elaboración propia basada en [16, pp. 544-554].

En tercer punto refiere las redes neuronales artificiales, ya que puede ser utilizada para cualquier evento de soldadura, ya que tiene la capacidad de predecir comportamientos no lineales y de múltiples respuestas, cuyo desarrollo se puede observar gráficamente en la figura 1.6.

Esta revisión hecha por [16] fue de relevante importancia para la presente tesis, ya que los pasos descritos en la figura 1.4 fueron el eje medular de la experimentación de la soldabilidad del acero inoxidable ferrítico con GTAW-P.





**Figura 1.6** Desarrollo de red neuronal. Tomado de [16, p. 551], traducción propia.

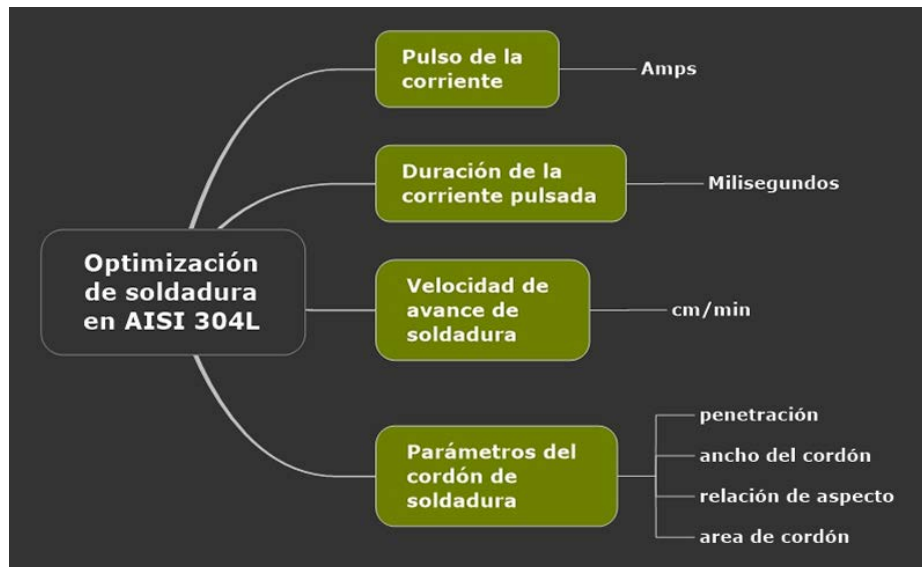
### **1.2.7 Optimización de parámetros en el proceso de soldadura GTA para la soldadura de una chapa de acero inoxidable AISI 304L.**

Giridharan y sus colaboradores [17] hicieron un estudio para optimizar el cordón de soldadura en chapa de acero inoxidable austenítico de tipo AISI 304L con 3 mm de espesor. Se utilizó proceso GTAW pulsado a 1Hz al que no se le aplicó material de aporte, que se describe como un proceso de soldadura por superposición de puntos cuya proximidad depende de la frecuencia de los pulsos de la corriente eléctrica y la velocidad de avance de la soldadura [17].

Para llevar a cabo este estudio de optimización se inició con valores estudiados con antelación por los autores y posteriormente optimizarlo con metodología de superficie de respuesta (figura 1.7)

Uno de los problemas que trataron de resolver con su experimentación es la variación en la penetración de la soldadura, que es un problema recurrente en chapas de acero inoxidable y que se ha tratado de solucionar hasta ahora con el uso de material de aporte, es por eso que este estudio resulta importante.





**Figura 1.7** Parámetros evaluados para la optimización de soldadura en chapas de acero inoxidable AISI 304L

Se prepararon cupones de soldadura de 100x50x3 mm sin preparación del filo y se soldaron a tope sin aporte, con un ángulo de 60° usando gas comercial de Argón tanto para protección con un flujo de 10 litros/min, así como para respaldo de 5 litros por minuto. El diseño del experimento fue Diseño Central Compuesto.

Como se observa en la figura 1.7 los parámetros evaluados para el proceso de soldadura automatizada GTAW fueron Corriente pulsada, duración de la corriente pulsada y velocidad de soldadura, a fin de evaluar como respuesta la geometría del cordón de soldadura, penetración, ancho del cordón y la relación de aspecto. Las corridas experimentales, se muestran en la tabla 1.4 donde se observa que se eligieron tres variables en cinco niveles, con valores de 180 a 220 A de corriente pulsada, 450 a 650 milisegundos de duración del pulso de la corriente y velocidad de soldadura de 11 a 19 cm/ min.

**Tabla 1.4** Niveles y parámetros para el Diseño Central Compuesto de [17, p. 481].

Parámetro	Unidad	Niveles				
		-1.628	-1	0	1	1.628
Corriente pulsada	Amp	180	188	200	212	220
Duración de la corriente pulsada	ms	450	490	550	610	650
Velocidad de soldadura	Cm/min	11	12.6	15	17.4	19

Dos parámetros que también fueron tomados en cuenta dada su importancia son: el calor de entrada y la eficiencia del arco (calculado al 60%). La primera por ser determinante en las uniones soldadas de acero inoxidable, ya que como hemos referido con anterioridad, el aumento en la temperatura provoca cambio de fase cristalina de ferrita a austenita y el enfriamiento rápido de esta genera presencia de martensita, que causa daño en las propiedades mecánicas y de ductilidad en estos aceros.

El calor de entrada es el inverso proporcional de la velocidad de soldadura y se evaluó ya que “*afecta la geometría del talón, mecánica, metalurgia y corrosión (sic)*” [17, p. 480]

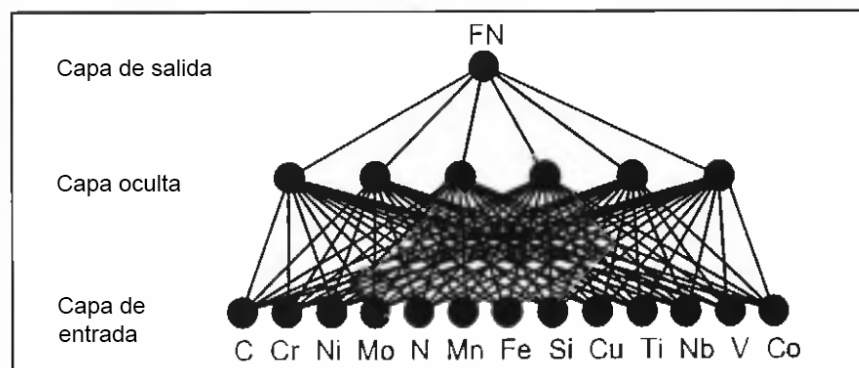
### **1.2.8 Predicción de delta ferrita en acero inoxidable usando red neuronal, análisis y comparación con otros métodos predictivos.**

Vitek et al [18], [19] en una amplia investigación desarrollaron un modelo de redes neuronales utilizando los elementos de aleación de acero inoxidable a fin de predecir el número ferrita presente en la soldaduras por arco en los metales referidos.

Este logró predecir con mayor exactitud el número de ferrita que con la aplicación llana del  $Cr_{eq}$  y  $Ni_{eq}$  y los diagramas relativos. La red fue denominada FNN-1999, utilizaron como referencias paramétricas del modelado y arquitectura de la red, el diagrama de constitución WRC-1992 y modelo de función fit [18]. Las variables de

entrada fueron los elementos C, Cr, Ni, Mo, N, Mn, Fe, Si, Cu, Ti, Nb, V y Co, se inyectaron 265 datos de punto para la prueba de las redes el test independiente, provenientes del diagrama de constitución WRC-1988. Los datos se dividieron en dos partes: de entrenamiento y prueba.

Diferentes arquitecturas fueron empleadas con distintos nodos ocultos, la capacidad de aprendizaje fue medida con media cuadrática (RMS). El modelo general de las redes neuronales desarrolladas por Vitek et al, se muestra en la figura 1. 8



**Figura 1.8** Modelo de la Red denominada FNN-1999 por [12, p. 37s], traducción propia.

De los modelos computados, resultaron 80 posibles redes, de ellas se acotaron cinco, seleccionadas fueron aquellas que predecían mejor el número de ferrita (FN).

Los resultados lograron predecir el número de ferrita presente en uniones soldadas de acero inoxidable, de manera más certera que el diagrama CMR-1992, logrando como aporte notable determinar que *“la contribución de cada elemento al número de ferrita es constante, independientemente de la composición general (sic)”* [19].

### 1.2.9 Simulación de la recristalización en aceros BCC

Montayo [20] utilizó técnicas como simulación de Monte Carlo, Polígonos de Voronoi y ecuaciones de Avrami para lograr la simulación de la recristalización con formas equiaxiales, así como su orientación y energía de las estructuras cristalinas

en aceros cúbicos centrados en el cuerpo (BCC) y determinar el exponente  $n$  en los aceros ferríticos.

Su trabajo es notable debido al desarrollo de metodología numérica vertida un modelo metalúrgico y un algoritmo para el proceso de recristalización de aceros ferríticos a forma de modelado. Utilizó programación lineal en lenguaje .m, de forma sustitutiva a POO, desarrollo librerías lineales dependientes a su vez de las que ofrece el lenguaje. Logrando prodigiosamente trazar los puntos de nucleación de polígonos de Voronoi, que permitieron simular la microestructura de aceros ferríticos y las orientaciones de sus estructuras cristalinas.

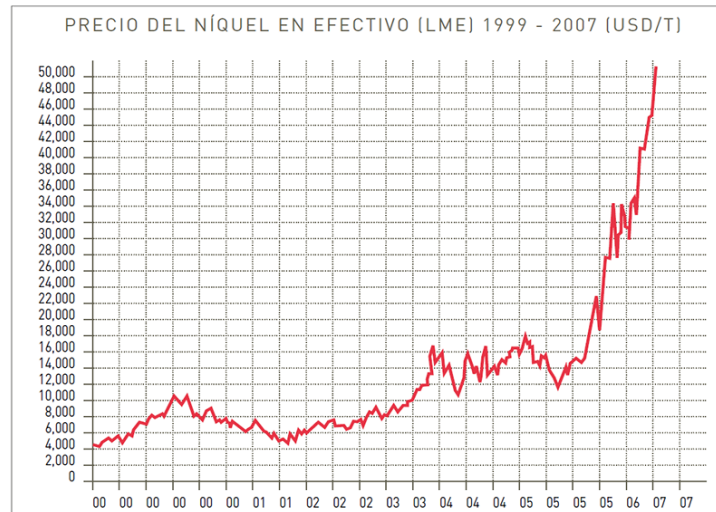
Las figuras para explicitar lo anterior, no pueden ser reproducidas **al no existir permiso escrito del autor** al momento de entrega de la presente Tesis. El trabajo de Montayo, fue de gran relevancia para el modelamiento y simulación de la microestructura de optimizada de la presente tesis, por lo cual agradezco a Montayo Zuñiga Ixchel su aporte significativo y al Instituto Politécnico Nacional por el acceso para la lectura su tesis doctoral [20].

### 1.3 Planteamiento del problema

En los últimos años, el costo del acero inoxidable austenítico ha aumentado debido la volatilidad en costo del Ni (en 1997 costo Ni 4,000 USD.ton<sup>-1</sup> y en 2007 50,000 USD.ton<sup>-1</sup>) presente en su composición, como puede observarse en la gráfica 1.9 por ello los ferríticos han tomado fuerza [3] en diversas aplicaciones que eran asignadas a los Austeníticos, ampliando sus aplicaciones incluso en ramo automotriz.

El problema es que su soldabilidad está limitada, debido a que tiende al crecimiento de grano de ferrita (a los 927 °C aprox.) [21]; Lo anterior, debilita sus propiedades mecánicas a la tracción y dureza [22].

El enfriamiento, también resulta de gran impacto, toda vez que, durante la recristalización, se promueve la generación de martensita intergranular o islas de martensita en la soldadura, así como en la zona afectada por el calor (ZAC) [13].



**Figura 1.9** Aumento del precio en USD por tonelada del Ni en la década 1997 a 2007. Tomado de [3, p. 13].

Otro reto de los inoxidables, es la falta de penetración [17] debido a la capa pasivada que se forma en la superficie. Dichos fenómenos, afectan sus propiedades de resistencia a la tensión y disminuyen la elongación [17], [23].

## 1.4 Justificación

Debido a los retos que presenta la soldabilidad en el acero inoxidable ferrítico, se requiere de integrar distintas técnicas eficientes y eficaces que permitan abatir el costo de soldadura en este acero sin comprometer la seguridad y sanidad de las uniones en componentes soldados.

El presente trabajo, se centra en hacer una optimización de la corriente de soldadura, pulsos del arco y velocidad de avance del proceso GTAW pulsado

robotizado sin metal de aporte en láminas de acero inoxidable ferrítico AISI 430 de 1.5 mm de espesor.

Lo anterior, integrando metodología de superficie de respuesta y aplicar redes neuronales para obtener la combinación óptima de parámetros de soldadura que mejoren las propiedades mecánicas bajo tensión de las uniones soldadas. Así reducir, el tamaño de grano en la ZAC y el ancho de esta última, para ampliar sus aplicaciones industriales de forma segura y poder sustituir el acero inoxidable austenítico disminuyendo costos en manufactura de manera significativa.

Tal acotamiento y especificidad en el presente trabajo, representa una gran oportunidad, ya que el trabajo conjunto del Tecnológico y el centro de investigación (CIDESI) representan una oportunidad importante para sentar precedentes en nuestro país que aporte beneficio a la industria manufacturera.

## **1.5 Objetivos**

Para lograrlo la optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P en acero inoxidable ferrítico, se tiene como objetivo principal: analizar y determinar los parámetros críticos de soldadura mediante GTAW pulsado para la obtener la combinación óptima de parámetros esenciales que derivan en sanidad y calidad del proceso de unión soldada a tope sin material de aporte en acero inoxidable ferrítico AISI 430.

Siendo los objetivos específicos:

1. Determinar los parámetros esenciales y críticos para soldadura robotizada GTAW pulsado en lámina 1.5 mm de acero inoxidable AISI 430;
2. Generar un diseño de experimentos (DOE) con variables exógenas y establecer la cantidad de corridas experimentales;
3. Realizar las corridas experimentales, utilizando un brazo robótico con base en el diseño de experimentos, para la optimización de proceso GTAW-P robotizado en especímenes de 1.5 mm AISI 430;

4. Realizar la caracterización de uniones soldadas a fin de determinar propiedades macro y micro-estructurales mediante estereoscopía y microscopía óptica;
5. Determinar las propiedades mecánicas de uniones soldadas, mediante pruebas de tensión y dureza *Vickers*;
6. Determinar combinación óptima de parámetros del proceso de soldadura;
7. GTAW-P con brazo robótico FANUC, para uniones a tope con bisel recto, por fusión (sin metal de aporte) en láminas de acero inoxidable ferrítico AISI 430 de 1.5mm de espesor, con el empleo de Metodología de superficie de respuesta y redes neuronales artificiales;
8. Modelar y simular la resistencia mecánica de la mejor combinación de parámetros obtenida mediante redes neuronales, mediante el desarrollo de base de datos en SQL y desarrollo software orientado a objetos en software de código cerrado;
9. Modelar la microestructura de la mejor combinación de parámetros obtenida mediante redes neuronales, mediante programación orientada a geometría;
10. Simular una microestructura de ZAC, correspondiente a la mejor combinación de parámetros obtenida mediante redes neuronales, mediante programación y Procesamiento Digital de Imágenes;

## 1.6 Alcances

El alcance del presente proyecto se restringe a la ejecución de corridas experimentales en muestras en acero inoxidable ferrítico AISI 430 sin metal de aporte, su caracterización macro y micro estructural, así como optimización y simulación de una unión soldada en condiciones teóricas de optimización.

## 1.7 Limitaciones

Dada la naturaleza del instrumental y maquinaria pueden presentarse problemas técnicos de configuración y programación que llevarían al retraso de la investigación.

No hay presupuesto económico, ni recursos físicos, de infraestructura, superiores a los otorgados por CONACyT para la beca de posgrado mensual, por lo que existe una limitación importante para llevar a cabo el proyecto, descontando de este ingreso, traslados, viáticos y alimentos, material educativo, herramientas, uso y renta de equipos, software, equipos de cómputo, material de limpieza, papelería entre otros.

No existe convenio con otras universidades que favorezcan la concreción de este proyecto.

No existe ningún apoyo adicional por parte de la universidad para la concreción del proyecto ni infraestructura necesaria. Las condiciones de trabajo en general, de salud física y mental en el instituto son insalubres y proclives a todo tipo de abusos y violencias, así como un ambiente sin accesibilidad y marcado por la misoginia normalizada.

Se tienen más limitaciones que facilidades, por lo cual será un reto importante la concreción del proyecto.



Capítulo

# 2

## Marco teórico

---

### 2.1 Proceso de soldadura GTAW-P robotizada

#### 2.1.1 Historia

**E**l acero ha trazado la evolución de la humanidad, la búsqueda su perfeccionamiento y unión camina en el pasado, presente y futuro, junto a nuestra historia.

El acero es una aleación de Hierro y Carbono (Fe+C). Existe un abanico de múltiples aceros, los cuales tienen una característica “la corrosión”.

En el siglo XIX, la necesidad de una aleación que permitiera menor corrosión y mayor resistencia era indispensable, ya que, hasta ese momento de la historia, se contaba con aleaciones que sufrían afectación por múltiples motivos, que reducían la durabilidad de un acero.

Es así que entre los años 1820 y 1821 en Reino Unido y Francia hicieron aleaciones de Fe y Cr encontrando mayor resistencia, pero sin lograr identificar que el porcentaje alto de carbón influía de gran manera, estos aportes se atribuyen a Stoddard, Farady y Pierre Bertier [6].

La primera patente registrada es de Woods y Clark ambos ingleses; su aleación era de Hierro adicionado el 30% de Cromo, 2% de Tungsteno y ácidos.

Para el año de 1875 el francés Brustlein hizo una gran aportación: **el 0.15 % C y mayor contenido de Cr**. Esto significó un gran avance en el estudio de la resistencia a la corrosión, ya que como hoy sabemos, el bajo contenido de carbón es fundamental para esta empresa.

Junto con el cambio de siglo vino el hito en materia de aceros inoxidable, ya que León Guillet investiga los trabajos anteriores, creando aleaciones Hierro y Cromo con muy bajo carbón logrando obtener los que hoy conocemos como 410, 420, 442, 446 y 440 mayoritariamente Martensíticos aunque ya aparecen con estructura ferrítica.

Dos años después logra las aleaciones austeníticas es decir los de la familia 300, que hoy en día son ampliamente utilizados en relojería fina de gama alta y media por su resistencia a la corrosión por no ser magnéticos.

En 1909 fue nuevamente la inspiración francesa quien por medio de Portevin consiguió la aleación del acero inoxidable ferrítico 430, utilizando bajo carbón, y alto contenido de Cr, en 1911 se asocia la relación de este elemento con la corrosión [6], [24].

Para consolidar el acero inoxidable, Brearley entre 1912 y 1913 hizo experimentación con aleaciones de Cr, tejiendo historias míticas, como la que cuenta que tiró a la basura un producto de su propia aleación y al percatarse que seguía sin

oxidación, corrosión o deformidad, lo rescató para estudiarlo y perfeccionarlo. Ciertas o falsas las historias, Brearley nombró su aleación como "*Rustless Steel*" y su amigo Stuart refinó el nombre a Stainless Steel, dando el porcentaje de Cromo de 12.8% y el contenido de carbón 0.24%.

Durante esos años y hasta hoy siguen apareciendo textos y personajes que se atribuyen la propiedad de estos descubrimientos [6], [24].

Con la presencia de las guerras mundiales y el desarrollo de armamento se buscó abatir la presencia de herrumbre en las armas y se han adicionado elementos tales como el níquel, el molibdeno e incluso titanio.

Hoy en día el acero inoxidable no solo es necesario en cualquier ámbito de la vida, arte, diseño, arquitectura, arte objeto, también es indispensable en áreas sustantivas de la humanidad, tales como industria médica, alimentaria, agroalimentaria, petrolera, hidroeléctrica, mecánica, automotriz, de la construcción, eléctrica, electrónica y por supuesto metal-mecánica [25], [7].

La historia del acero inoxidable, se resume en la figura 2.1 a modo de línea de tiempo.

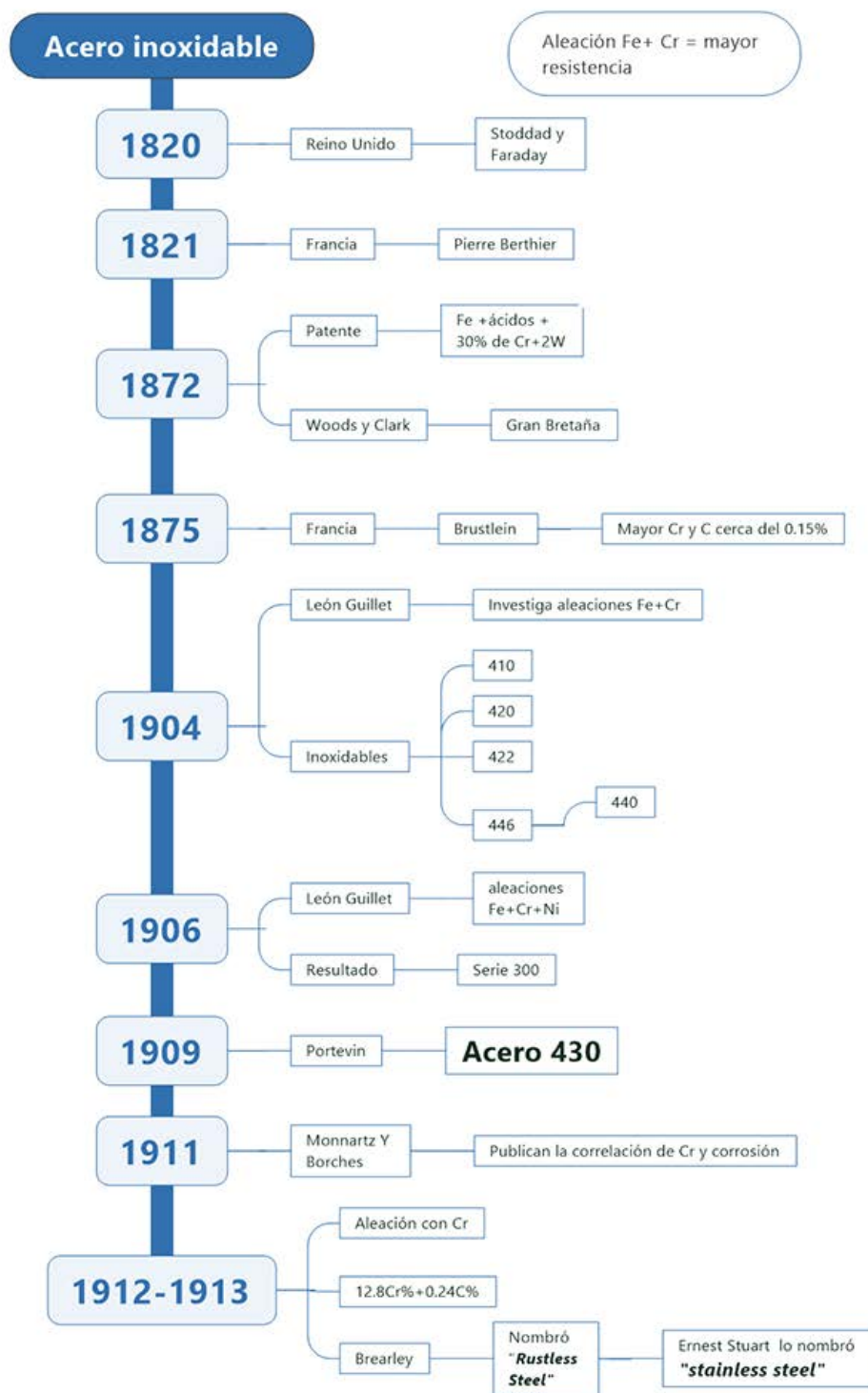


Figura 2.1 Línea de tiempo de la historia del acero inoxidable. Elaboración propia.

## 2.1.2 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se caracterizan por su gran resistencia a la corrosión, por ello son ampliamente usados. El acero inoxidable es una aleación con muy bajo C y alto Fe, la resistencia a la corrosión la adquiere por la presencia de Cr en un porcentaje mayor al 11% (Fe + C + Cr) [11], [26], [27, p. 23].

Hay aleaciones que contienen Ni, Mg, Si, P, S; también se pueden encontrar elementos tales como Mo, W, V y Ti.

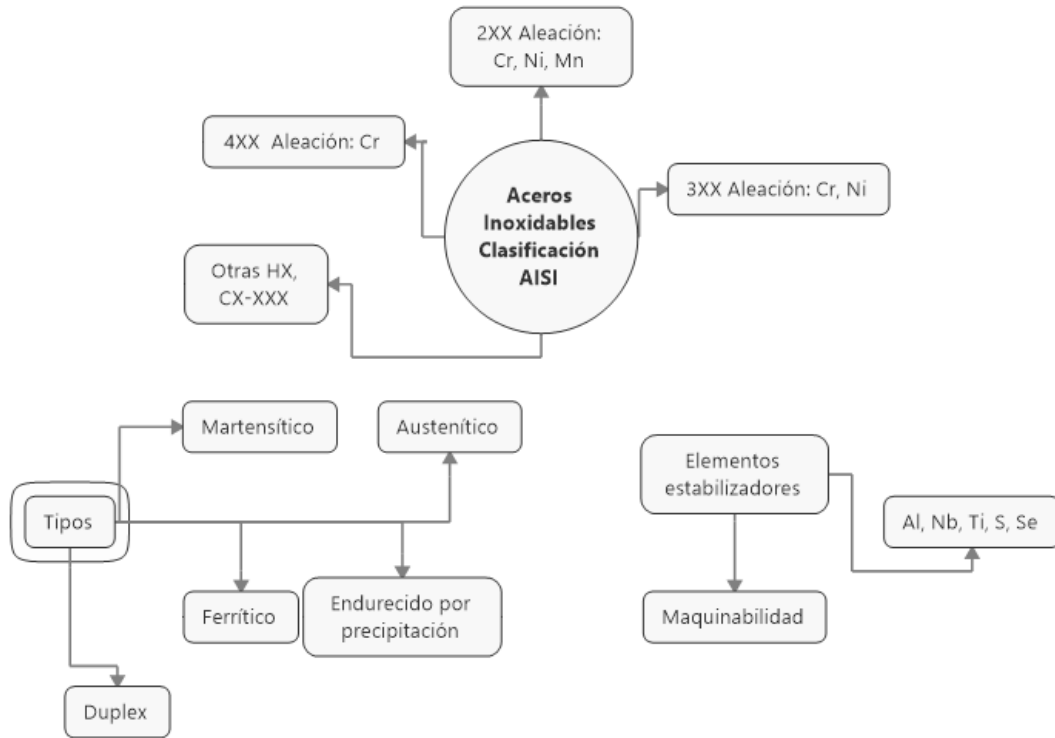
El Al, Nb, Ti, S, Y Se, se utilizan como estabilizadores. Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a su composición química y se agrupan en familias:

**Austenítico:** Tiene una estructura cristalina Cúbica Centrada en Cara (FCC por sus siglas en inglés *Face Center Cubic*), y en su aleación contiene: C, Mn, Si, Cr, Ni, P, S. Se encuentran algunos de la familia 200 y 300 [2].

**Ferrítico:** Tiene una estructura cristalina Cúbica Centrada en Cuerpo (BCC) por sus siglas en inglés *Body Center Cubic*), tiene entre 11% al 30% de Cr, en su aleación se encuentran los elementos: C, Mn, Si, Ni, P, S, Al, Mo, Nb y Ti. Se puede encontrar la mayor parte de la familia 400, así como los CB-30 y CC-50 [2].

**Martensítico:** Tiene una estructura cristalina Centrada en Cuerpo Tetragonal (BCT por sus siglas en inglés *Body Center Tetragonal*) y fue el primer acero inoxidable producido, tiene un porcentaje de Cr de 11.5% al 18% y puede contener los elementos: C, Mn, Si, Ni, P, S, Al, Mo, Nb y Ti. Tiene carburos de Cr. (Fe+Cr). [2].

**Dúplex:** Esta palabra, etimológicamente viene de la palabra en latín “*duplicis*” que significa doble [28, p. 11718]. En este contexto se refiere a que, la aleación crea un acero cuya composición tiene dos fases, una de ferrita y otra de austenita con un porcentaje de la primera, de entre un 40% y un 60% [29]. Todo lo anterior se compendia en un mapa mental de la figura 2.2.



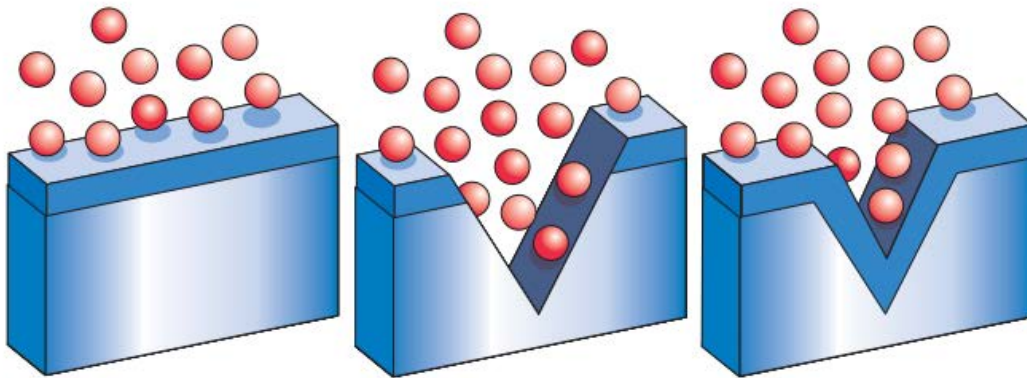
**Figura 2.2** Mapa mental de aceros inoxidables de acuerdo a la clasificación de la AISI. Elaboración propia basada en [11].

### 2.1.2.1 Capa pasiva

El acero inoxidable tiene una característica distintiva que se denomina **auto-pasivación** o **capa pasiva** transparente. Esta es la responsable de su multi-nombrada característica de resistencia a la corrosión [30].

Este fenómeno físico ocurre en la superficie del componente de acero inoxidable donde se forma una capa delgada de óxido de cromo [25], que se reintegra con el oxígeno; es decir se auto regenera, incluso durante exposición a ralladuras (figura 2.3).

La capa pasivante puede engrosarse posteriormente a su formación inicial, que funge como su *“propio sistema autorreparador (sic) [31, p. 2].”*



**Figura 2.3** Auto pasivación del acero inoxidable. Tomado de [31, p. 2]

### **2.1.2.2 Soldabilidad general de aceros inoxidables**

Es interesante dadas las estructuras cristalinas de cada familia y a sus cambios de fase derivados de la exposición a altas temperaturas.

Martensíticos: son propensos a la inducción de hidrógeno durante el enfriamiento.

Ferríticos: son propensos a reducir su ductilidad debido al crecimiento del grano por la ausencia en transformación de fase alotrópica durante el enfriamiento.

Austeníticos: susceptibilidad a la solidificación y al agrietamiento de la licuación.

Se puede usar cualquier proceso de soldadura, siempre considerando las restricciones de cada uno, como aquellos que contienen titanio y/o aluminio en su aleación deberán siempre usar gas de protección.

La eficiencia de la unión soldada dependerá del tipo de proceso, el diseño de unión, la habilidad y la utilización adecuada de parámetros esenciales que permitan obtener propiedades mecánicas uniformes en el metal soldado (cordón), la zona afectada por el calor, y el metal base con o sin pre-calentamiento.

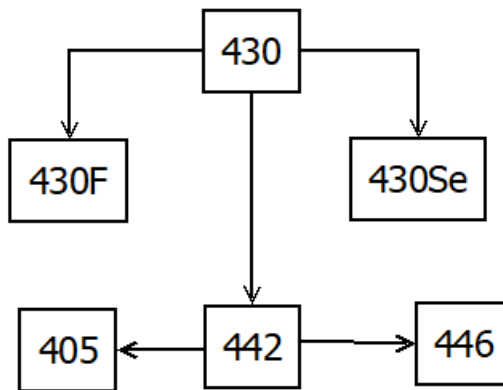
La limpieza antes y después de la soldadura es importante y depende de los requerimientos de calidad para la soldadura. En casos de procesos de soldadura con

gas de protección, es de especial cuidado debido a la capa autopasivante, que tiende a dificultar su unión.

### 2.1.3 Aceros inoxidables ferríticos

Debido a su estructura cristalina, los aceros inoxidables ferríticos no son aptos para trabajo en frío, presentado fragilidad extrema a los 0°C, por ello no son bueno para criogenia. En cambio, tienen una excelente ductilidad, buena resistencia a la corrosión y picaduras. Son ampliamente utilizados en la industria alimenticia, médica, agroalimentaria, automotriz petrolera, y de la construcción. Se puede encontrar en tanques de almacenamiento y transportación de leche, cerveza, petróleo, y más. También se puede encontrar en quirófanos y cocinas.

Su soldabilidad, magnetismo y bajo nivel de níquel lo hace más asequible y por ello es ampliamente utilizado a escala industrial.



**Figura 2.4** Diagrama de aceros inoxidables ferríticos. Elaboración propia, basada en [30, pp. 366,367]

Tienen un porcentaje alto de cromo del 14 al 27%. El carbono tiene un papel importante en estos aceros, ya que el porcentaje presente en la aleación gesta austenita al calentamiento, que al enfriarse se transforma en martensita, que causa corrosión intergranular. Su ductilidad y suavidad la alcanzan al recocido. Pueden formarse en frío o en calor, siempre y cuando no se alcance los 750 -950°F, ya que



una exposición prolongada a esta temperatura provoca fragilidad. Se recuecen a 850°F.

### 2.1.3.1 Acero inoxidable ferrítico 430

Se encuentra dentro la primera generación de los ferríticos, junto con el 442 y 446. Tiene mayor presencia de cromo que funciona como gran estabilizador de ferrita y muy bajo carbón (tabla 2.2). Es una aleación muy básica (Fe+Cr+C) [24].

**Tabla 2.1** Composición química general del acero inoxidable ferrítico AISI 430, cuyos valores son en porcentaje y corresponden al máximo según AWS [26, pp. 6-11]

Designación	Cr	Ni	C	Mn	Si
430	0.12	---	14-18	1.00	1.00

Predomina la fase de ferrita, es un acero no endurecible y magnético. Se ha documentado el crecimiento de grano a los 927 °C y la presencia de martensita a los 760°C. Sus propiedades generales fueron descritas en la literatura por Avner [30] y se transcriben la tabla 2.2



**Figura 2.5** Mapa mental de acero inoxidable ferrítico. Elaboración propia.

**Tabla 2.2** Propiedades mecánicas generales del acero inoxidable ferrítico 430 [30, p. 369]

<b>Densidad</b>	7.8 mg/m <sup>3</sup>	Inicio de la forja	2100°F
<b>Módulo elástico</b>	200 GPa	Intervalos de recocido	1400-1500°F
<b>Coefficiente térmico de expansión</b>	11.2–12.1 μm/(m · °C)	Recocido - enfriamiento	FC
<b>Conductividad térmica</b>	24.4–26.3 W/(m · K)	Intervalos de endurecimiento	No endurecible
<b>Resistencia eléctrica</b>	590–670 nΩ · m	Magnetismo	Si
<b>Rango de fusión</b>	1480–1530 °C		
<b>Propiedades mecánicas de recocido</b>			
<b>Resistencia a la cedencia 1000lb/plg<sup>2</sup> min</b>	45	Reducción en área	40
<b>Resistencia última 1000lb/plg<sup>2</sup> min</b>	75	Módulo de elasticidad en tensión 10 a la 6lb/pulg <sup>2</sup>	29
<b>Elongación (porcentaje en 2 Plg min)</b>	20	Dureza Brinell	200 Max
		Dureza Rockwell	B95max

El acero inoxidable ferrítico AISI 430 es de los más utilizados, ya que al ser una aleación sencilla y potente es requerida para la elaboración de múltiples cosas [7].

Este acero tiene grado alimenticio por ello, es ampliamente usado en cocinas industriales, en implementos tales como tarjas, cucharas, volteadores, campanas, extractores, tanques de almacenamiento. También es visible en acabados arquitectónicos, tales como herrajes, frentes de cocinas, puertas, cubre polvos, elevadores, y basureros [6], [24].

En la industria de electrodomésticos se utiliza en canastas de lavadoras, interiores de lavavajillas, piezas mecánicas y recubrimientos [22], [9], [32].

En la industria petrolera se utiliza en tanques de almacenamiento (todo ellos soldados), se utiliza también en gasolineras [29].

## 2.2 Diagramas de constitución

Los diagramas de constitución para aceros inoxidable se basan en el tipo de aleación Fe + Cr de este tipo de acero, y por lo tanto distinto al diagrama que se utiliza normalmente para aceros, basado en Fe + C. Los aceros inoxidable al contar con alto cromo y bajo carbón requieren de especial cuidado en el proceso de soldadura. Se han desarrollado diagramas de constitución tales como el de Maurer, Schaeffler, Balmforth, De Long, CMR-1992 y diagrama de 1988 [33], teniendo en común la relación del Cr y el Ni, así como la predicción de cambio de fases con aumento de temperatura durante la soldadura.

Se utilizan las ecuaciones de Cromo equivalente ( $Cr_{eq}$ ) y Ni equivalente ( $Ni_{eq}$ ), para obtener las coordenadas en los diagramas citados, donde se localizan las fases microestructurales de acuerdo a su composición química; existe variación en las fórmulas dependiendo el diagrama, pero de manera general se calcula obtiene el porcentaje de Cr y Ni equivalentes a partir de distintos elementos de aleación.

Sudhakaran et al 2013, describen que *“el  $Cr_{eq}$  actúa como estabilizador de la ferrita y el  $Ni_{eq}$  actúa como estabilizador de la austenita, los diagramas de constitución muestran los niveles de ferrita como función de  $Cr_{eq}$  y  $Ni_{eq}$ ”* (sic) [34].

### 2.2.1 Diagrama de equilibrio Cr-Fe

Al igual que resto de los aceros, los inoxidable también se cuenta con la directriz de diagramas de constitución, que se interpretan en función de elementos químicos presentes en su aleación.

En este se encuentran todos los aceros inoxidable, como se puede observar en la figura 2.6, con ayuda de este diagrama podemos determinar las microestructuras en función del Cr con respecto a la temperatura. Un dato relevante de este diagrama es que, indica que en el rango de 912 a 1394° se da el proceso de austenización [21], también permite identificar la fase  $\alpha$  que es proclive a la formación de precipitados.

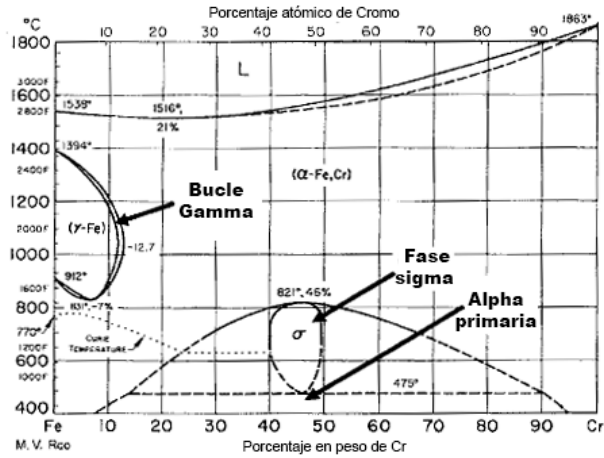


Figura 2.6 Diagrama de equilibrio Fe-Cr. Tomado de [21, p. 9], traducción propia.

### 2.2.2 Diagrama de ternario Fe-Cr-C

Como se ha mencionado con anterioridad el C aparece en bajo porcentaje e influye y complica el diagrama de equilibrio, ya que este elemento es un promotor de la austenita [21], que finalmente se convierte en martensita si hay un enfriamiento acelerado [22], [35]. En la figura 2.7, se observa el efecto del C durante la austenización.

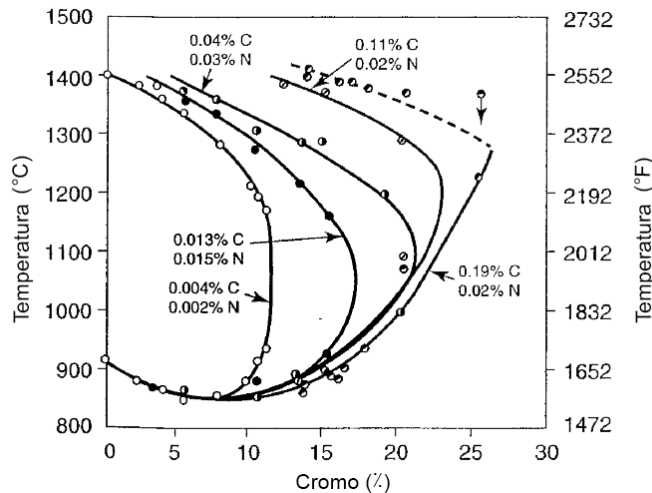


Figura 2.7 Diagrama Fe-Cr-C. Tomado de [21, p. 10], traducción propia.

### 2.2.3 Diagrama de Schaeffler

Es el resultado de estudios dedicados para predecir los de cambios en la microestructura y aparición de defectos.

Anton Schaeffler creó una serie de diagramas basándose en trabajos previos de Maurer, para predecir cambios en aceros inoxidable sujetos a procesos de soldadura, mismo, que fue perfeccionado con los años. La figura 2.8 muestra el diagrama de mayor madurez, mismo que ha sido ampliamente utilizado desde su publicación en 1948 ya que ha resultado de fácil aplicación y buena precisión en predicciones. Hay autores que afirman que el diagrama de Schaeffler, solo se puede utilizar en aceros inoxidables cuyos contenidos sean “*C máx. 0.2%, Mn máx. 1.0%, Si máx. 1.0%, Mo máx. 3.0%, Nb máx. 1.5%*” [36].

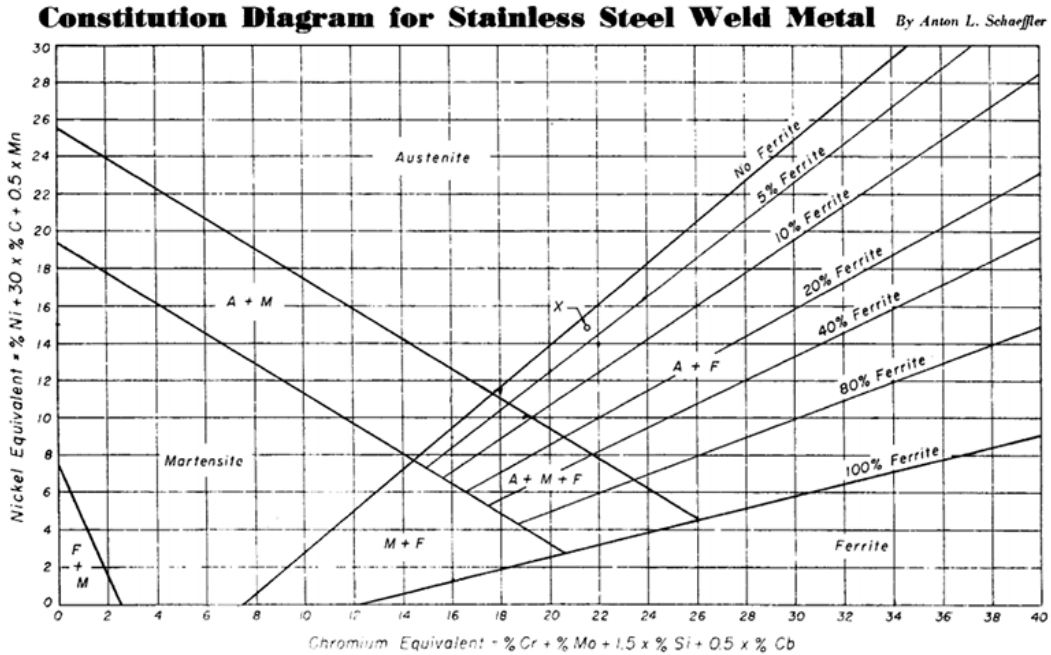
El diagrama posiciona gráficamente las fases cristalinas del acero inoxidable, sustentándose en las fórmulas de Cr y Ni equivalente en relación a la temperatura.

Otros autores como Balmforth han complementado este trabajo, ampliándolo para aceros Martensíticos, otros como De Long han aportado las fases de ferrita con nitrógeno, etc. Para el objetivo de esta tesis, nuestra guía será el diagrama de Schaeffler de la figura 2.8.

Estos diagramas no sólo funcionan en mundo análogo, basándonos en coordenadas cartesianas, si no también han servido de base para la elaboración de modelos matemáticos y hoy en el mundo digital con el desarrollo de sistemas de redes neuronales artificiales para la predicción del contenido de ferrita y cambios de fase durante procesos de soldadura manuales y/o automatizados.

Como lo han hecho Vitek et al [18] [19] y Vasudevan et al [33], quienes partiendo de diagramas de éstos constitución usaron redes neuronales artificiales para predecir el contenido de delta ferrita en soldaduras de aceros inoxidables, haciendo

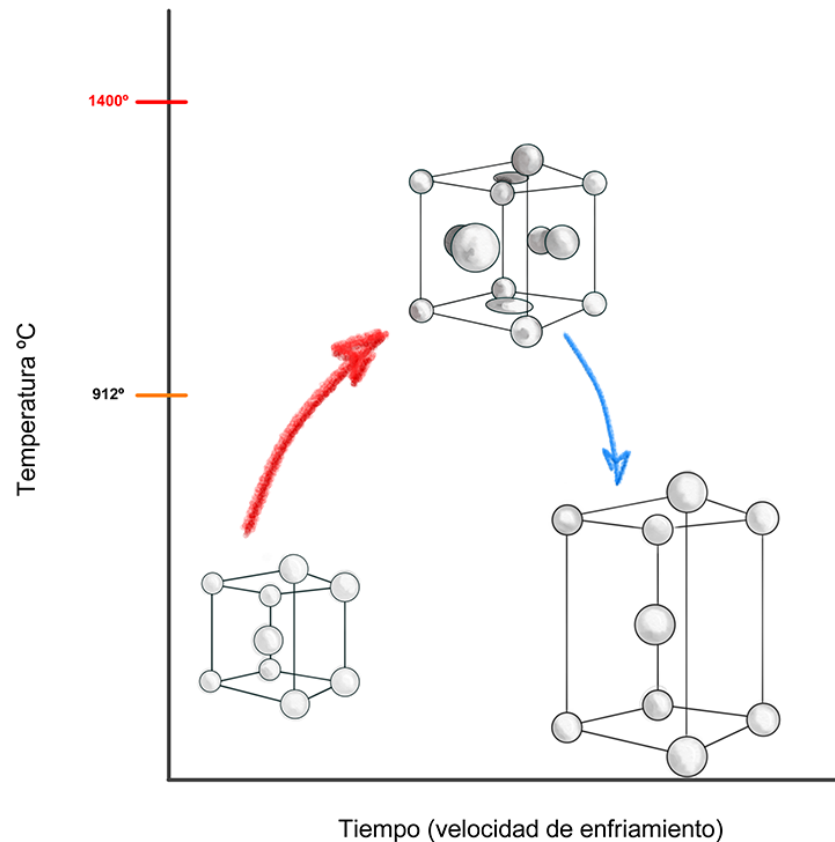
comparación con otros métodos, logrando determinar con Inteligencia artificial más precisión en las predicciones [2], [33], [37].



**Figura 2.8** Diagrama original de Anton Schaeffler para predecir los cambios de en la microestructura del acero inoxidable [37, p. 5]

### 2.2.4 Soldabilidad del Acero inoxidable 430

Es soldable con distintas técnicas, aunque se ha reportado el crecimiento de grano, pérdida de ductilidad y propiedades, derivado del calor que promueve la presencia de martensita que causa corrosión intergranular. Esto se debe al cambio de la estructura cristalina de Cúbica Centrada en Cuerpo (BCC) [2] que se da a temperatura ambiente, al aumentar el calor a 912°C se convierte en austenita enfriarse de manera acelerada a temperatura ambiente cambia su fase a martensita [21] durante la recristalización, que tiende presentar carburos de cromo, estos causan lo que se llamado “caries del acero” es decir corrosión intergranular y debilitamiento en la unión, en el metal de aporte o fundido y en la ZAC del metal base provocando pérdida de propiedades mecánicas.



**Figura 2.9** Cambio de estructura cristalina del acero inoxidable ferrítico 430. Elaboración propia ®

Por ello el presente estudio, resulta de interés, ya que aportará información importante para determinar los parámetros óptimos en este acero.

## 2.3 Procesos de soldadura por arco

### 2.3.1 Principales tecnologías de soldadura por arco

La AWS (*American Welding Society*) define la soldadura como “*la unión localizada de metales o no metales producidos por calentamiento del material hasta la temperatura de soldadura, con o sin aplicación de presión, o por solo la aplicación de esta, con o sin el uso de metal de aporte*” [26, p. 49].

Las tecnologías de unión y soldadura son vitales en la vida humana. Existen múltiples procesos de soldadura, de acuerdo a la AWS, existen más de 50 procesos. En el presente estudio nos centraremos en la soldadura por arco y más específicamente soldadura GTAW pulsado con brazo robotizado.

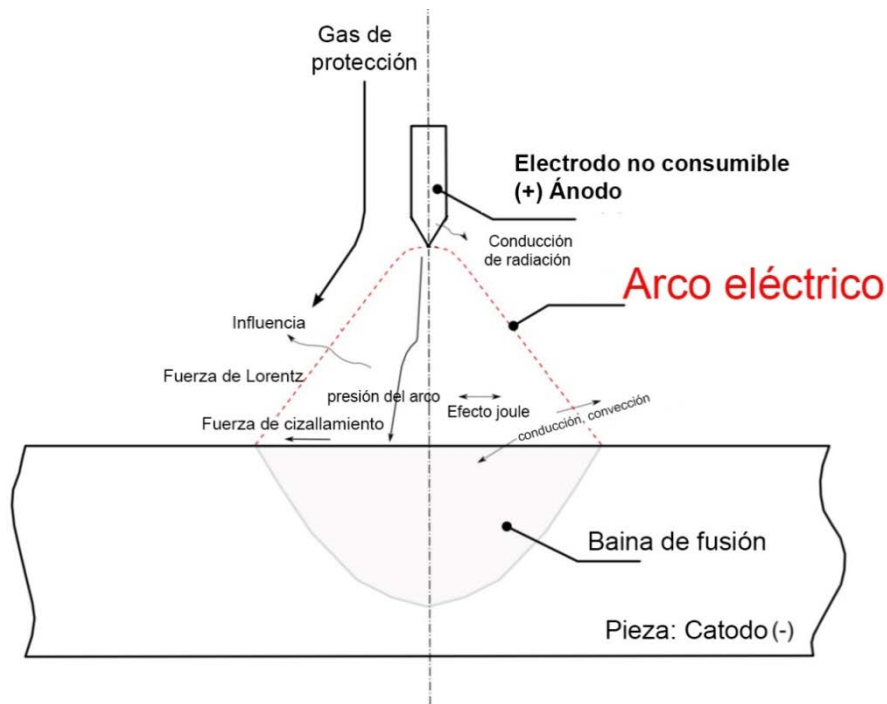
La soldadura por arco consiste en unir la pieza por medio de la fusión del material de aporte derivado del arco eléctrico generado entre el herramental y el metal base. Como se muestra en la figura 2.10, la física del arco eléctrico es compleja, ya que en ella se conjugan las fuerzas de Lorentz, de cizallamiento, el efecto de joule, la propia presión del arco, hay conducción y convección, así como la influencia del gas de protección. Todos estos factores influyen en la unión soldada, ya que funden el metal de aporte o general unión por fusión del metal.

Para la soldadura con arco eléctrico y gas de protección gaseosa con electrodo de Tungsteno, este último se acerca 2mm a la pieza de trabajo generando el arco.

La figura 2. 10 muestra esquemáticamente el electrodo de W, funcionando como ánodo, es decir conectado al positivo, existiendo una distancia con el trabajo que, en ese ejemplo es el cátodo, es decir se conecta al negativo y donde, se crea el arco eléctrico, dando origen al calor que fundirá el metal y se creará un recíproco que es la vaina de fusión.

Así mismo se observa como el gas de protección desciende sobre el arco eléctrico protegiéndolo.





**Figura 2.10** Física del arco eléctrico en polaridad DCEP (Corriente Directa con Electrodo Positivo). Traducción y modificación propia de [38, p. 29].

Entre las principales tecnologías de por soldadura con arco se encuentran:

**SMAW:** cuyas siglas en inglés son Shield Metal Arc Welding. Es el proceso de soldadura manual con electrodo revestido y el más popular en todo el mundo debido a su facilidad de uso y bajo costo. Como todos los procesos por arco eléctrico se requiere del calor del arco para fundir el metal de aporte que está presente en el material de aporte presente en el electrodo consumible (varilla) que se funde sobre el metal base generando la unión. El electrodo va revestido de un material que al fundirse genera un gas de protección que a su vez genera escoria [39].

**PAW:** Acrónimo de Plasma Arc Welding, se utiliza un electrodo de tungsteno para no consumible, que a su vez está rodeado de dos gases, uno que genera el arco de plasma y otro que lo protege [40].

**SAW:** Por sus siglas “Submerged Arc Welding” se denomina soldadura por arco sumergido, **EGW:** Electrode Gas Welding y **FCAW:** Flux Cored Arc Welding.

Mientras que las que usan gas de protección son GMAW y GTAW,

**GMAW:** Gas Metal Arc Welding, también conocida como MIG –MAG. Su nombre viene de Metal Inert Gas ya que se utilizan gases inertes tales como Ar y He. MAG, es el acrónimo de Metal Active Gas, refiriéndose al uso de gases activos tales como CO<sub>2</sub> y Nitrógeno. Los gases generan una atmósfera controlada que evita escoria en la unión. GMAW-S se refiere a soldadura con electrodo consumible con protección a gas por arco corto, mientras que GMAW-P se refiere a soldadura con electrodo consumible con protección a gas por arco pulsado [40].

De igual manera **GTAW** es el acrónimo de “*Gas Tungsten Arc Welding*” que es la soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo de Tungsteno con las letras “S” para referirse a arco corto y “P” arco pulsado. También se conoce como TIG que es *Tungsten Inert Gas*. En la figura 2.11, se puede ver un mapa mental con las técnicas de soldadura por arco, según la AWS.



**Figura 2.11** Técnicas de soldadura por arco eléctrico como mapa mental. Elaboración propia.

### 2.3.1.1 Generalidades de la soldadura

Para soldar se necesita la corriente eléctrica y una fuente de alimentación. Se manejan dos tipos de tensión, la primaria que alimenta el equipo de soldadura y que va de 347 a 600 Volts (aunque en algunos equipos la tensión primera va de 120 a 240 V y la secundaria) [40]

El equipo básico consiste en una fuente de corriente, cables, pistola o porta electrodo, pinza para la masa, tanque de gas de protección, tal como se muestra en la figura 2.12. Para operar este equipo se debe contar con los siguientes elementos de protección, tales como, guantes, careta, mandil, calzado de seguridad, lentes de protección con vidrio filtrante, ropa ignífuga.

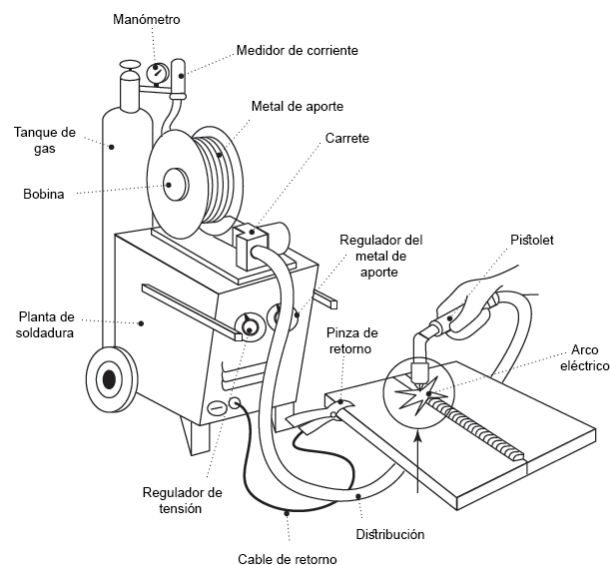
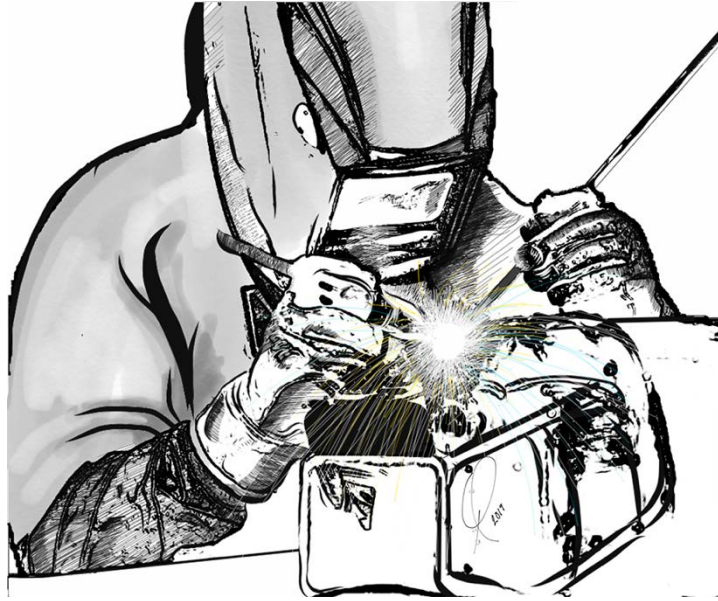


Figura 2.12 Diagrama esquemático de equipo de soldadura. Tomado de [40, p. 11]

### 2.3.2 Soldadura por arco con electrodo de tungsteno con protección a gas (GTAW)

Se trata de la técnica denominada así por sus siglas en inglés *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) de soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno protegido con gas. En este proceso, el soldador con una mano suministrará en

material de aporte que se encuentra en forma de alambre en diámetros de  $\frac{1}{4}$ " mientras sujeta con la otra mano la pistola de soldadura, que tiene un electrodo no consumible de W, este será el que fundirá el metal aportado o el metal base si se trata de soldadura por fusión. Conforme avanza con la mano, la moverá haciendo oscilaciones, tal como se muestra en la ilustración 2.13.

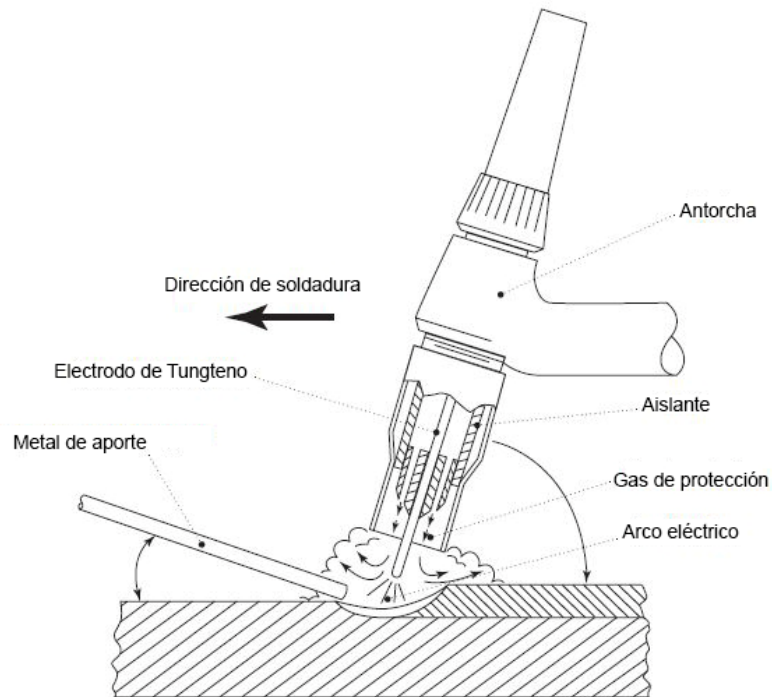


**Figura 2.13** Soldador utilizando técnica GTAW (TIG), haciendo unión con material de aporte. Elaboración propia®

Una de las grandes ventajas de esta técnica, es que se puede utilizar en cualquier metal, incluso en metales difíciles de soldar como Titanio, Aluminio y aceros inoxidables con o sin material de aporte. Ello significa que puede existir unión por fusión del material base. En la figura 2.14, se puede entender de manera muy sencilla el proceso de soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW), se cuenta con una pistola que tiene un aislante que contiene el electrodo, y rodeándolo se encuentra la boquilla de donde sale el gas inerte para crear la atmósfera controlada. Mientras se avanza se va adicionando el material de aporte sin tocar el electrodo.

El electrodo es de Wolframio o mejor conocido Tungsteno, en estado puro o aleado con Cerio, Torio, Lantano o Zirconio, tal como se muestra en la tabla 2.3.

Estos electrodos pueden resistir altas temperaturas de tal manera que puede incluso contaminar el metal de aporte si este, hace contacto con el electrodo. Cuando se suelda por fusión (es decir sin material de aporte) el electrodo se mantendrá limpio, siempre y cuando no haga contacto con el metal base.



**Figura 2.14** Vista esquemática del proceso de soldadura GTAW que muestra la antorcha, el metal de aporte y el metal base. Traducción propia de [40, p. 15].

Esta técnica también es denominada TIG (*Tungsten Inert Gas*) por la utilización de gases inertes tales como Argón y Helio. Estos proveen una atmósfera controlada que protege de contaminantes a la soldadura previendo de sanidad a la unión.

Las ventajas que brinda la soldadura TIG o GTAW:

1. Alta calidad de las uniones
2. Ausencia de escoria
3. Se puede soldar cualquier metal
4. Se puede soldar con y sin aporte

5. Control preciso del calor

**Tabla 2.3** Tipo de electrodos de tungsteno para el proceso GTAW. Tomado de [26, pp. 3-17]

Electrodo	Aleación	Color
EWP	Tungsteno puro	Verde
EWCe-2	1.8 a 2.2% cerio	Naranja
EWLa-1	1% de Lantano	Negro
EWLa1.5	1.5 de Lantano	Oro
EWLa-2	2% Lantano	Azul
EWTh-1	0.8-1.2% Torio	Amarillo
EWTh-2	1.7-2.2% Torio	Rojo
EWZr	0.15-.040% Zirconio	Café

Las desventajas de este método son inclusiones de Tungsteno y discontinuidades derivado de esto. También puede presentarse porosidad en el metal fundido

El equipo de soldadura GTAW es el que se muestra en la figura 2.12, que fue descrito con anterioridad.

**2.3.2.1 Parámetros de soldadura**

Cuando hablamos de parámetros en la soldadura, nos referimos a los eventos físicos que tienen un impacto antes, durante y después de ejecutar la unión. Existen muchos fenómenos que intervienen durante el proceso de unión.

Algunos fenómenos son fundamentales para la soldadura e impactan en la sanidad, calidad y penetración de la soldadura, estos son denominados “**parámetros esenciales**” y de estos, algunos resultan críticos.

Otros, pueden afectar, pero no de manera determinante, y por ello se denominan “no esenciales” [26]. En este caso nos ocuparemos de los parámetros esenciales y

abordaremos el efecto de cada uno de ellos, para efecto de contextualizar el presente estudio. En esa tesitura, cabe señalar que, en los apartados siguientes se ejemplifica la aplicación de las mismas.

### 2.3.2.2 Corriente eléctrica

Tiene un papel toral en la soldadura por arco, toda vez que dependiendo el tipo de corriente serán los resultados que se tengan.

**Corriente Directa (CD):** Sucede cuando los electrones viajan en la misma dirección. El corriente de soldadura va de 1 a 500 A para GTAW.

**Corriente alterna (CA):** En este tipo de corriente los electrones viajan del polo negativo al positivo en ciclos de 60 Hz. La corriente de soldadura va de 5 a 500 A para GTAW.

La corriente se puede utilizar con polaridades diferentes, mismas que se detallan en la tabla 2.4.

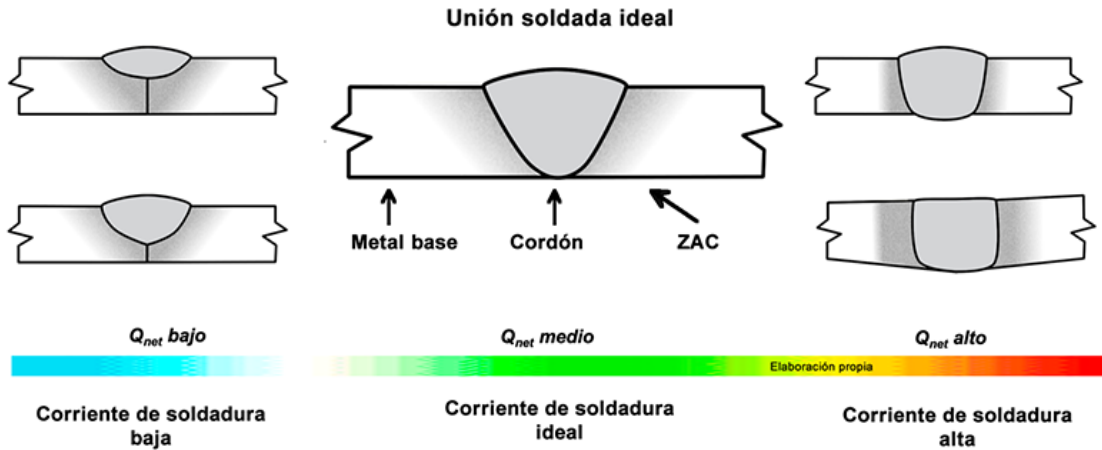
**Tabla 2.4** Polaridad de corriente para soldadura. Basado en [26, pp. 62,63], [35].

Siglas	Polaridad	Tipo de corriente	Electrodo en polo	Genera
DCEP CDPI	Invertida	Corriente Directa	Positivo	Calor en el electrodo
DCEN CDPD	Normal o directa	Corriente Directa	Negativo	Calor en el metal base
AC		Corriente Alterna	Indistinto	Calor en metal base y electrodo

La elección del tipo de corriente y la polaridad impacta en penetración de la soldadura, limpieza de oxidación, balance en el calor del arco eléctrico. Esta soldadura es recomendable cuando hay requerimientos de alta calidad en las uniones

soldadas, así como terminados con las mismas características, es especialmente bueno en aceros inoxidable y aluminio.

La corriente de soldadura es un factor toral, ya que a menor corriente menor penetración de la soldadura y viceversa esto puede verse de manera esquemática en la figura 2.15 que muestra como el cordón de soldadura penetra más entre el metal base conforme aumenta la temperatura [41].



**Figura 2.15** Efecto de la corriente y calor de entrada en la fusión del metal de soldadura. Elaboración propia ®

De acuerdo con la AWS [26] se cuenta con una tolerancia del  $\pm 25\%$  en el cambio de corriente para cada diámetro, es decir, que se puede variar aumentando o disminuyendo la corriente de soldadura dependiendo en diámetro del material. Es importante señalar que este porcentaje es el máximo permitido. Pongamos un ejemplo, se tiene una corriente de experimentación de 100 A, para saber la tolerancia se saca el 25%, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Min = A - \frac{A * 25}{100} \quad \therefore Min = 50 - \frac{100 * 25}{100} = 75 \quad (2.1)$$

$$Mx = A + \frac{A * 25}{100} \quad \therefore Mx = 50 + \frac{100 * 25}{100} = 125 \quad (2.2)$$



**Tabla 2.5** Ejemplo de tolerancia para la aplicación de corriente de acuerdo a [26]

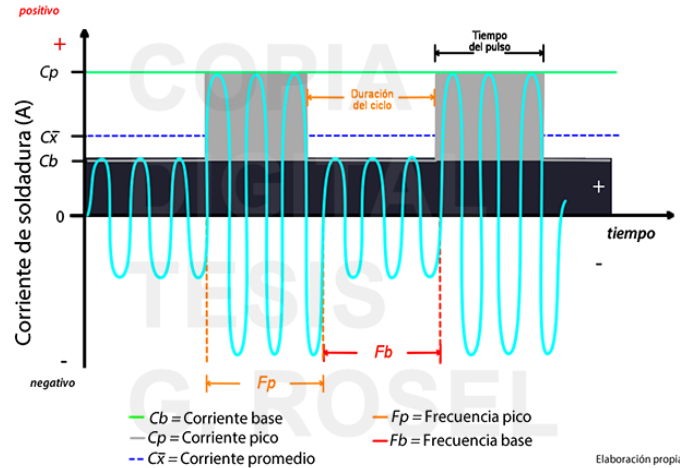
Corriente mínima permitida	Corriente reportada	Corriente máxima permitida
75 A	100 A	125 A

### **2.3.2.3 Corriente pulsada**

Esta se diferencia por contar con dos tipos de corriente la de base ( $C_b$ ) y pico ( $C_p$ ), que constituyen dos valores diferenciados que hacen distinto el proceso de soldadura.

Cuando se utiliza arco pulsado ocurre en la fundición del metal de aporte o fusión (como lo es el presente estudio) durante la corriente pico ( $C_p$ ), mientras que, durante la corriente base ( $C_b$ ) ocurre la disminución térmica. Esta técnica funciona como una serie de puntos de soldadura, semejantes a la soldadura spot sin llegar a serlo, ya que, son una serie de puntos de soldadura que se aplican durante la corriente pico en un ciclo determinado.

Para que suceda este fenómeno físico, también hay variables determinantes en el arco pulsado, como los son el tipo de onda (cuadrada o sinusoidal), duración del pulso y duración del ciclo [8], [17], [42]. Lo anterior se expresa a manera de ilustración en la figura 2. 16.



**Figura 2.16** Corriente pulsada de soldadura de onda cuadrada y sinusoidal. Elaboración propia®.

### 2.3.2.5 Diferencia de potencial (V)

Para que exista corriente se requiere del voltaje que será la fuerza que mueve a los electrones. Este valor también resulta uno de los más importantes en el tema de soldadura, ya que, se considera una variable esencial. En general al voltaje del arco no se aplican cambios significativos de los ya establecidos, y no tienen un impacto tan grande como la corriente. La AWS, tiene establecida una tolerancia para este parámetro, que es el mismo que en el caso de la corriente, el  $\pm 25\%$ , aplicándose igual que en la corriente de soldadura [2], [26], [40].

### 2.3.2.6 Velocidad de avance de soldadura

Se trata simplemente de la velocidad con la cual, el arco eléctrico manipulado manual o automatizado, recorre la pieza de trabajo sobre el claro, donde se hace la unión. Generalmente se mide en mm/min. En este caso también existe una tolerancia establecida en [26] que es  $\pm 50\%$ . Por ejemplo:

Se tiene una velocidad reportada de 50mm /min se saca el 50% y se resta o se suma quedando:

$$Min = A - \frac{A*50}{100} \quad \therefore Min = 50 - \frac{50*50}{100} = 25 \quad (2.3)$$

$$Mx = A + \frac{A*50}{100} \quad \therefore Mx = 50 + \frac{50*50}{100} = 75 \quad (2.4)$$

Donde A, es el parámetro de voltaje del arco evaluado.

**Tabla 2.6** Ejemplo de tolerancia para la aplicación de velocidad de desplazamiento con base en [26].

Velocidad de desplazamiento mínima	Velocidad de desplazamiento reportada	Velocidad de desplazamiento máxima
25 mm/min	50 mm/min	75 mm/min

### 2.3.2.7 Calor de entrada

El calor de entrada es un parámetro esencial en la soldadura de cualquier material, es una variable que depende de tres factores: voltaje del arco, corriente de soldadura y velocidad de avance, se expresa en Joules por plg.

De acuerdo a la AWS, este factor en GTAW es parámetro esencial, es de tal influencia que la AWS lo refiere como “*cualquier aumento en el calor de entrada*” [26] sus efectos los podemos ver de manera clara en el capítulo de resultados.

Para su cálculo se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{arc} = 60 \frac{EI}{V} \quad (2.5)$$

Donde:

$Q_{arc}$  = Energía del arco

E= Voltaje del arco (V)

I= Corriente de soldadura (A)

V= Velocidad de avance de soldadura (mm/min) para j/mm, (plg/min) para j/plg [26, pp. 711,8,12].

### 2.3.2.8 Gas de protección

Como ya se mencionado en múltiples ocasiones se utilizan gases que proveen una protección del arco eléctrico. Dependiendo el material será el gas o mezcla de ellos, generalmente se usan gases inertes tales como Ar y He, o gases activos como CO<sub>2</sub>. Algunas marcas comerciales venden mezclas de gases para usos específicos o sugerencia de uso.

### 2.3.2.9 Posiciones de soldadura

Las posiciones para ejecutar la soldadura están determinadas en las normas y estándares internacionales. Son doce y están identificadas por un número arábigo seguido de una letra que indican la posición a soldar y tipo de unión. Las hay en Filete, que se identifican con la letra F, se hacen en piezas que serán unidas en 90° y sobre ese ángulo se coloca en material de aporte [43, pp. 30-32] ver en la figura 2.17.

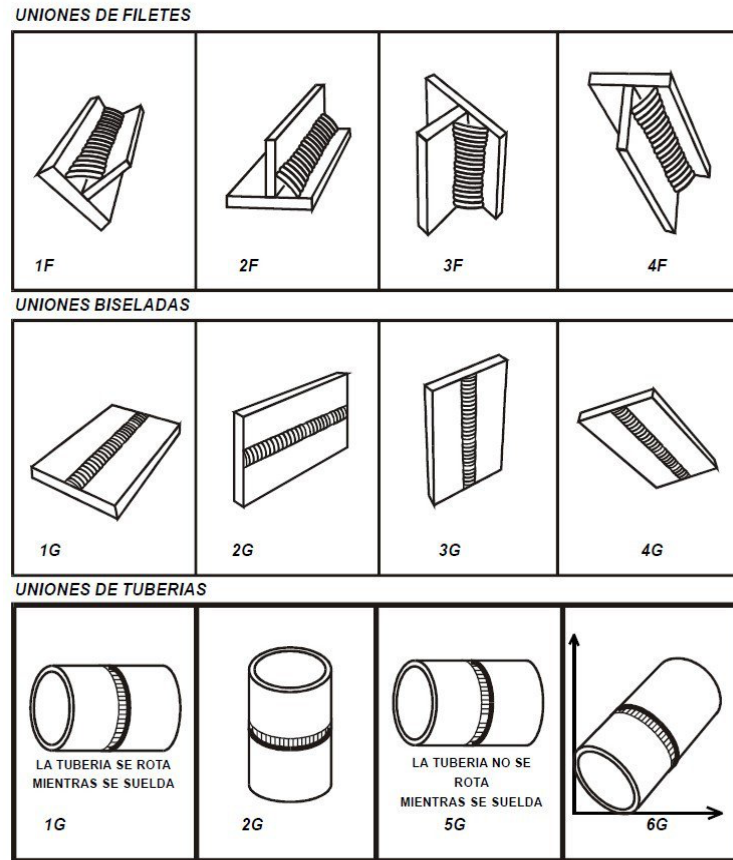


Figura 2.17 Posiciones de soldadura en Filetes. Tomado de [42, p. 7]

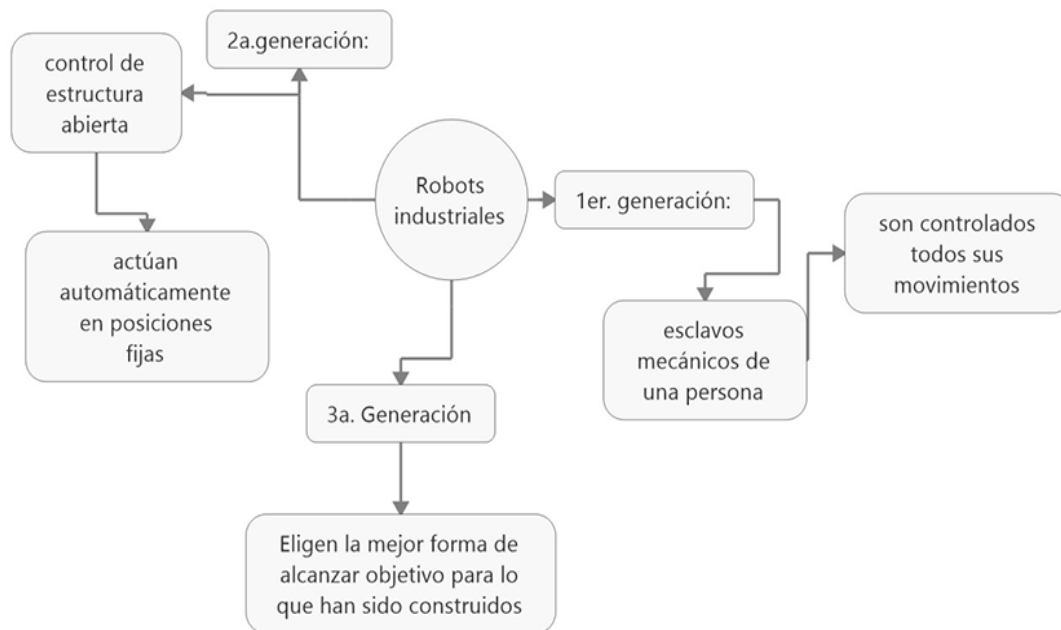
## 2.3.3 Soldadura robotizada

### 2.3.3.1 Robots industriales

Los robots industriales son ampliamente utilizados en la actualidad para ejecutar tareas repetitivas, monótonas y peligrosas reemplazando la mano de obra humana. Los beneficios para la industria son amplios y principalmente de carácter económico, ya que los robots pueden trabajar de manera continua por largos periodos de tiempo con mucha precisión.

El Estándar ISO/TR 8373 1988 define al robot industrial como “Manipulador automático, con servo sistemas de posición, reprogramable, capaz de posicionar y orientar materiales, piezas, utillajes, considerando movimientos variables y programables para ejecución de tareas variadas” [44, p. 4], [45].

El avance tecnológico ha permitido su evolución, ello nos permite plasmar en la siguiente figura su avance que se mide en generaciones (figura 2.18)



**Figura 2.18** Mapa mental de generación de robots industriales. Elaboración propia ® basado en [45].

Dualé [46], explica concretamente qué es un robot industrial, de la forma que sigue: “*Es un conjunto "autónomo" que consta de tres elementos:*

1. *Brazo*
2. *El armario de control*
3. *El escritorio de programación”* [46, p. 33].

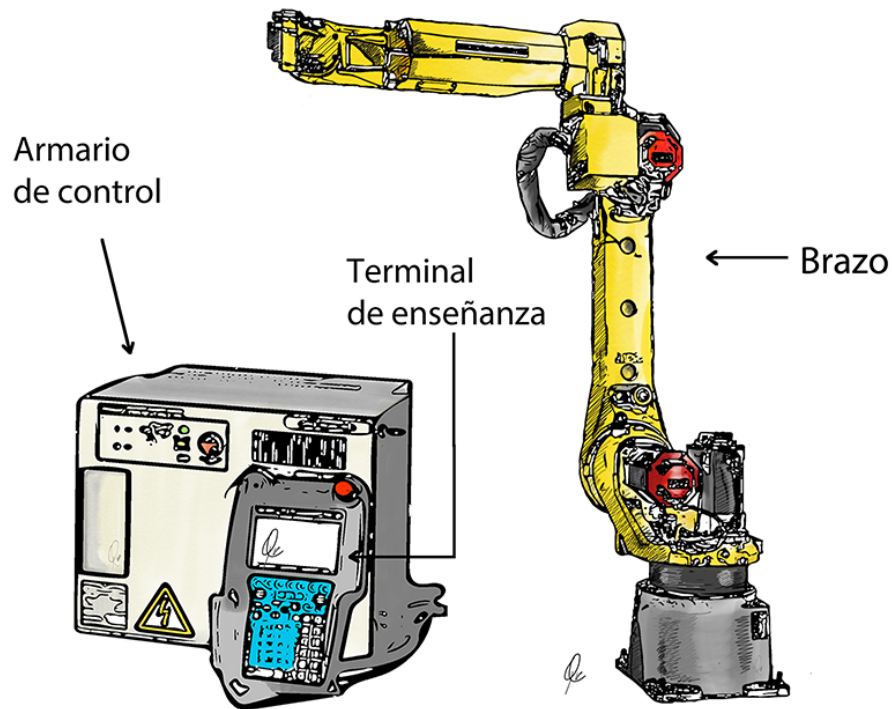
### **2.3.3.2 Soldadura por arco robotizada**

Para que pueda funcionar un robot industrial de soldadura se debe contar con un brazo robótico, su armario de control conocido como “*el teach pendant* o atril de programación” [46, p. 39] (figura 2. 19), y los elementos de soldadura tales como, fuente de poder, gabinete para micro alambre, mangueras de conducción para gas y micro – alambre, un sistema de enfriamiento y pinza de masa para cerrar el circuito eléctrico.

Estos son los elementos que configuran una celda de soldadura, con los cuales se puede soldar robóticamente [44], [46], [47], [48], [49].

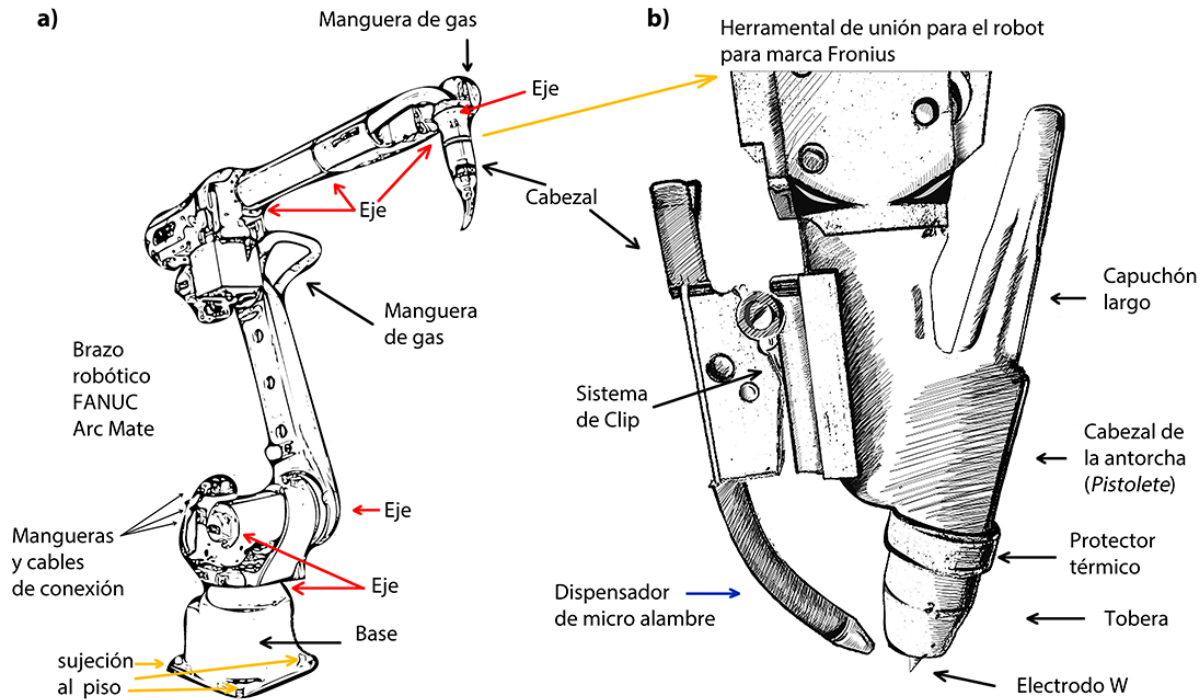
La soldadura por arco robotizada, tiene los fundamentos que mencionaron en el apartado 2.3.2, ofreciendo ventajas inigualables para la industria tales como: alta repetibilidad, control sobre las trayectorias, velocidad de soldadura y de alimentación del alambre [49].

Para que el brazo robótico pueda soldar, requiere de un herramental de soldadura, que cambia, dependiendo el tipo de técnica que se requiera (por puntos, MIG, MAG, CMT, GMAW, plasma, etc.) [48], [49].



**Figura 2.19** Vista general de los elementos que conforman un robot industrial. Elaboración propia ®

En el presente proyecto el herramental es de GTAW, que cuenta con la tobera anclada al cabezal, ahí mismo se aloja el electrodo de tungsteno, y cuenta con un dispositivo que permite alinear y abastecer el micro alambre mientras se avanza en la soldadura, haciéndolo de forma automática y controlada. Junto al brazo, se cuentan con mangueras conectadas al tanque gas, para que por el cabezal se proteja la soldadura con el gas o mezcla de ellos y se obtenga una soldadura limpia de escoria [35]. El gas sale por la copa de difusión de gas de la misma forma que con la soldadura manual, tal como se muestra en las figuras 2. 14 [40, p. 15] y 2.20 creando protección de la soldadura [22], [44].



**Figura 2.20 a)** Vista esquemática de un brazo robótico FANUC® modelo arc mate, **b)** cabezal para soldadura GTAW o GTAW-P con alimentador para el micro alambre, para modelos Fronius. Elaboración propia ®

## 2.4 Caracterización mecánica y microestructural

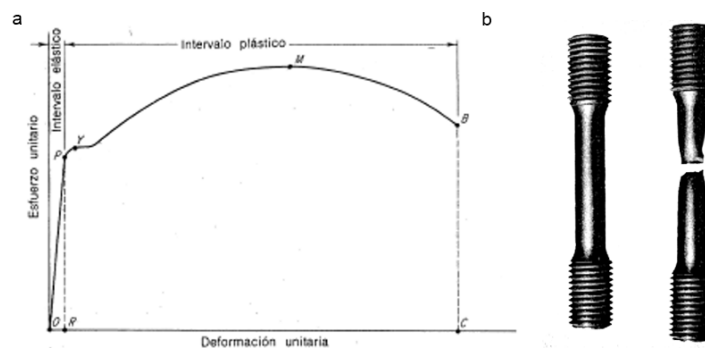
Todos los materiales deben ser caracterizados para conocer su microestructura, propiedades químicas y mecánicas. Para el presente estudio resultan de importancia las pruebas de mecánicas de tracción uniaxial y microdureza, ya que en los componentes con soldadura en servicio son sometidos a esfuerzos de tracción y compresión muy altos.

Las pruebas microestructurales resultan torales, toda vez que se deben documentar los cambios para analizarlos con respecto a la temperatura y cambios de fase, a fin de determinar cuál es la mejor condición.



## 2.4.1 Pruebas de tensión

Esta prueba es de las más utilizadas ya que, permite determinar la resistencia a la tracción de un material. Para ello se utiliza una máquina universal de prueba, donde se aplica una fuerza inicial sobre la probeta, que se denomina carga, puede ser de tensión o de compresión. Así mismo se utiliza un extensómetro con el que obtiene la medida del estiramiento del material analizado. Con los datos obtenidos se genera una diferencia entre los valores iniciales y los valores finales, mismos que denotaremos con una  $\Delta l$  que significa diferencia de longitud con respecto al valor inicial que denotaremos como  $\Delta 0$  que significa, longitud inicial o longitud cero. La máquina universal de pruebas, la gráfica S-e y las probetas en sus distintas fases se indican en la figura 2.21.



**Figura 2.21** a) Diagrama esfuerzo-deformación obtenida del análisis de un material sometido a cargas en máquina universal de pruebas, b) Probeta con longitud inicial y probeta fracturada. Tomadas de [30, pp. 52,54]

## 2.4.2 Metalografía

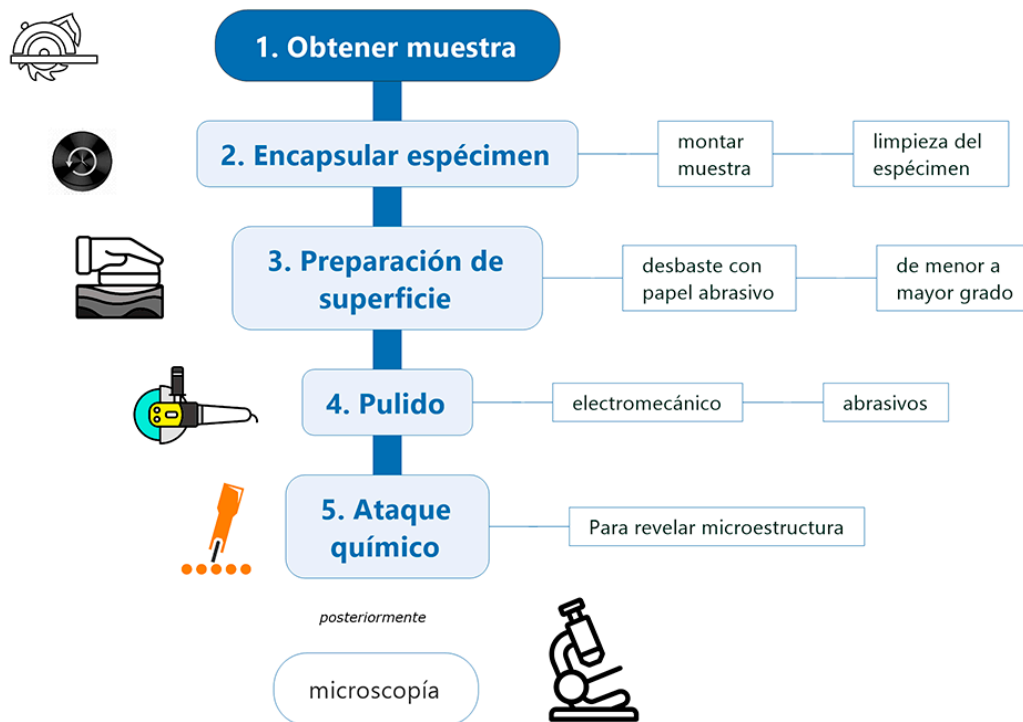
Zipperian describe la metalografía como “el conjunto de ciencia y arte” [50, p. 11]. Se trata sobre estudio de los metales o aleaciones que estudia los especímenes de la cual se toma una muestra para su análisis, posterior documentación y disertación.

Para hacer iniciar el proceso metalográfico se debe obtener una muestra (o cuantas muestras sean necesarias), del material u objeto que se desea analizar, para su preparación, ya que serán representativas de todo el elemento que se desea estudiar.

Se basa en cinco principios o pasos generales, cada uno con su propia complejidad y detalle, mismos que se resumen en la figura 2.22 y describen a continuación de manera muy sintética:

1. **Obtener la muestra:** Se deberá extraer mediante corte un fragmento o el número de muestras necesarias del material.
2. **Montar el espécimen:** Una vez seccionada la muestra, deberá introducirse en el cilindro de acero inoxidable integrado a la montadora metalográfica, cubrirse con compuestos de compresión que encapsulan la muestra mediante calor y presión. Los compuestos pueden ser resinas, baquelita, polvos fenólicos, o bien con sistemas acrílicos o epoxi. Una vez que se encuentra perfectamente encapsulada la muestra en material de compresión, se deja enfriar para proceder al siguiente paso [51].
3. **Preparar la superficie por medio de desbaste:** Una vez que la muestra quedó encapsulada y montada en baquelita, se procede a desbastar la muestra con papel abrasivo de carburo silicio (SiC), óxido de aluminio u otros, iniciando con el de menor granulometría por  $\mu\text{m}^2$ , siguiendo en orden ascendente al grado 2500. Puede hacerse manualmente o de preferencia para obtener mejores acabados superficiales, se puede emplear desbastadora electromecánica de baja revoluciones para agilizar el proceso [51].
4. **Pulido:** Consiste en aplicar pulimentos finos, por ejemplo, pasta de diamante, alúmina, entre otros, sobre un paño especializado que se mantiene hidratado por goteo, a fin de eliminar las imperfecciones del paso anterior, mejorando la superficie que se va estudiar.

5. **Ataque químico (etching):** consiste en aplicar sobre la muestra pulida un reactivo químico que ataque la microestructura del material y la revele en el microscopio. El reactivo será específico para cada material, dada su composición química [51], [52], del tipo de imagen que se desea obtener de microestructura, por ejemplo metalografía a color [50].



**Figura 2.22** Pasos para preparar muestra metalográfica. Elaboración propia ®

### 2.4.3 Microscopía óptica

La microscopía óptica es ampliamente utilizada para el análisis metalográfico de especímenes. El rango de aumentos va de 50X hasta 1000x (figura 2.23), aunque existen mayores aumentos con lentes especializados. Existen diversos métodos para hacer la microscopía, algunas de ellas son: Luz polarizada, Oblicua, Campo oscuro, Campo claro, Contraste diferencial e inferencial; Cada una de ellas se aplica para mostrar características microestructuras distintas.

Para un equipo de microscopia óptica un componente importante es el lente de objetivo, cuya capacidad de recolección de luz se basa en la apertura numérica.

El límite de la resolución se obtiene con la fórmula que sigue:

$$\text{resolución} = \lambda / (2 * N.A)$$

Donde:

$\lambda = \text{longitud de onda de luz usada}$

$\lambda = 0.54 \text{ micras (para luz verde)}$

$\lambda = 0.1 \text{ Angstrom para haz de electrones}$

$N.A = \text{lente objetivo}$



**Figura 2.23** Lente objetivo del microscopio óptico. Tomado de [50, p. 144]

Para el caso que nos ocupa, con esta técnica, se puede observar la microestructura del metal base, la zona atacada térmicamente, la zona de fusión y el cordón de soldadura. Es así, que podremos obtener datos de suma importancia, tales como ancho de la ZAC, tamaño de grano en las distintas zonas, alto de la corona, área del cordón, porcentaje de penetración de la soldadura, y defectos.

### 2.4.4 Dureza Vickers

Es uno de los métodos de caracterización mecánica de los materiales. Consiste en la aplicación de una carga con indentador sobre la muestra. Esta última debe estar

libre de óxido y de suciedad, preferentemente preparada metalográficamente. El indentador tiene como base un cuadrado y la punta de diamante tiene forma piramidal con ángulo de base de 136° [30] [50]. Tal como se observa en la figura 2.24.

La superficie de la impronta se mide para determinar la dureza mediante la fórmula:

$$HV = 1.854 \frac{P}{D^2} \quad (2.6)$$

Dónde:

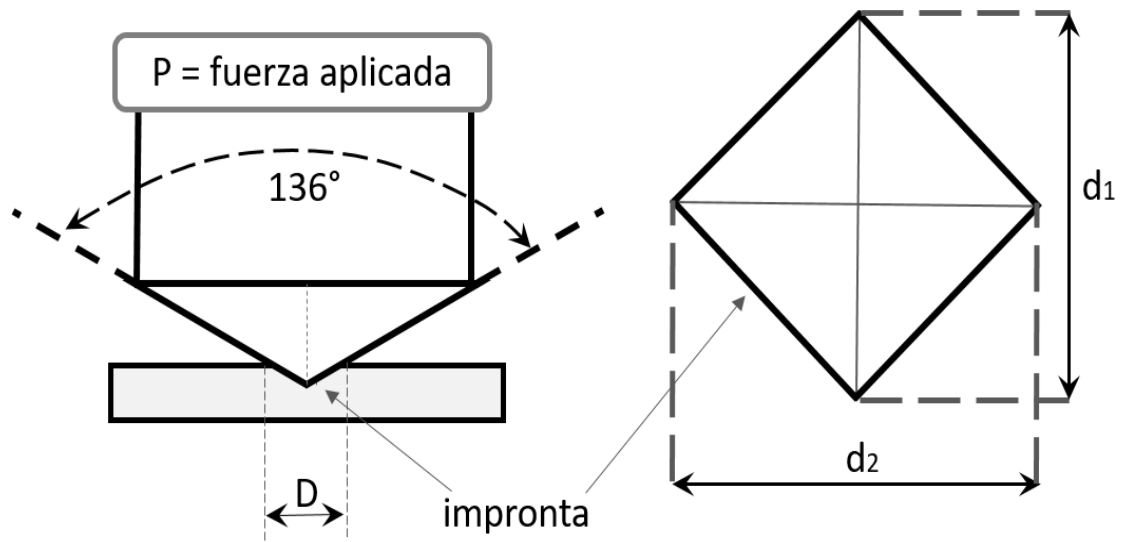
**HV** es la dureza Vickers por su nombre en inglés (Hardness Vickers),

**P** es la carga

**D<sup>2</sup>** es la media de las diagonales de la impronta, que se obtiene de la fórmula:

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.7)$$

Cada una de estas huellas determina la dureza del material. Para el caso de uniones soldadas, se hace un extremo al otro del metal base a fin de general un perfil de las durezas utilizando las ecuaciones (2.6 y 2.7)



**Figura 2.24** Esquema del ensayo Vickers. Elaboración propia basada en [30, p. 45], [53].

Capítulo

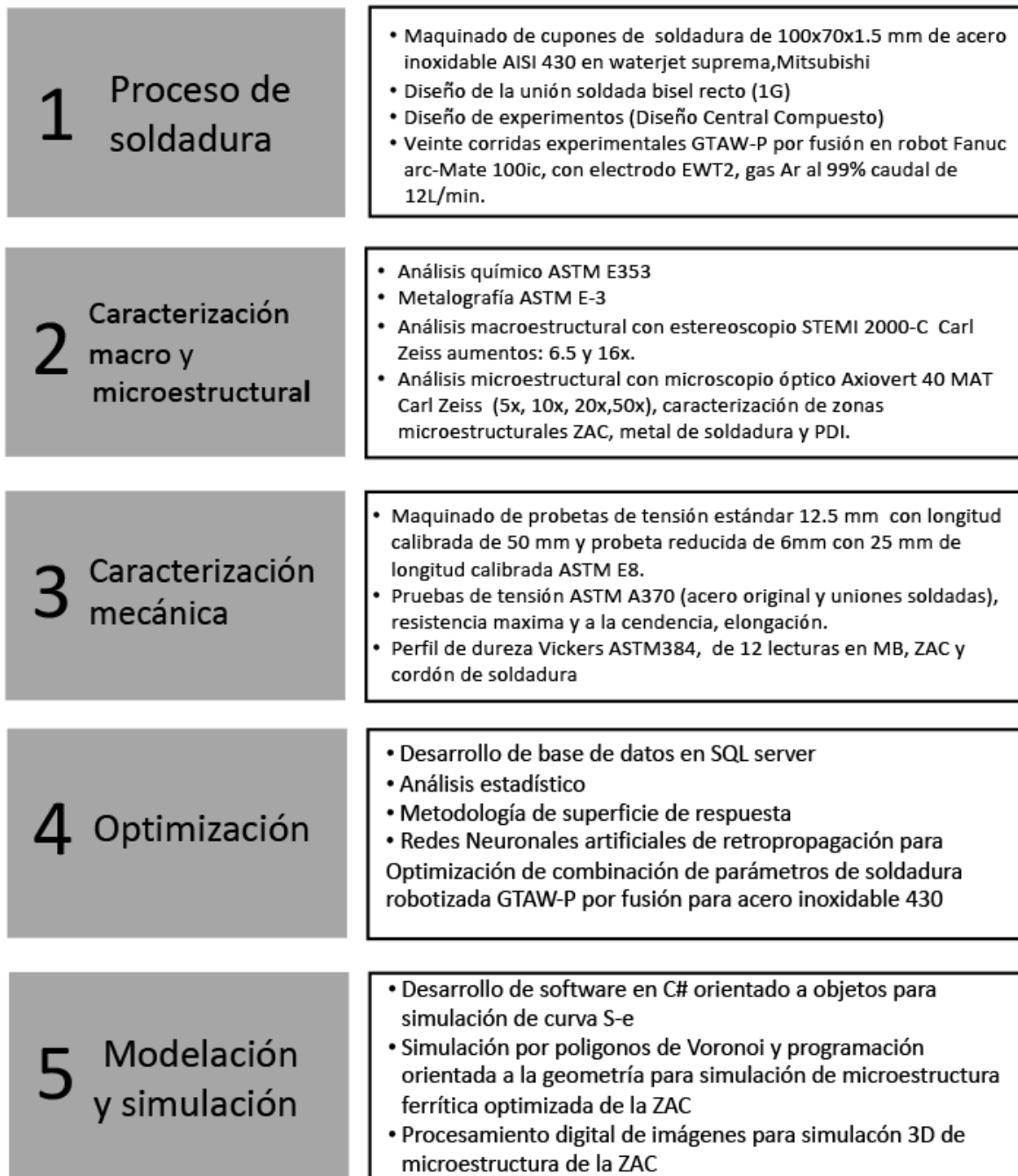
# 3

## Desarrollo experimental

---







**Figura 3.1** Diagrama de bloques del proceso de experimentación cuyo objetivo es la optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P en acero inoxidable 430.

## 3.1 Materiales

Para el presente estudio se utilizaron láminas de acero inoxidable de 1000 × 1000 × 1.5 mm de largo, ancho y espesor respectivamente. Estas fueron caracterizadas química, microestructural y mecánicamente para obtener la identificación del metal.

### 3.1.1 Propiedades originales del acero

El acero inoxidable ferrítico 430 fue sometido a análisis químico por emisión óptica en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) sede Querétaro bajo procedimiento indicado en estándar ASTM E353 [54]. Se obtuvo una muestra tomada del centro de la chapa con dimensiones de 25 × 25 × 1.5 mm de largo ancho y espesor respectivamente. El equipo utilizado fue un espectrómetro SPECTRO ®. Cinco lecturas fueron realizadas sobre la superficie de la muestra de forma aleatoria. Con los elementos químicos presentes en el acero (tabla 3.1), se calculó el Cr y Ni equivalente con base en Guiraldenq and Hardouin [37] (ecuaciones 3.1 y 3.2), las cuales se basan en el principio del porcentaje de elementos en la aleación presentes en el acero inoxidable, con ello se obtuvieron las coordenadas en el diagrama de Schaeffler [37] logrando predecir que fases cristalinas podrían presentarse.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Cb \quad (3.1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn \quad (3.2)$$

**Tabla 3.1** Composición química del acero inoxidable ferrítico para experimentación AISI 430 (Wt.%)

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	Cr <sub>eq</sub>	Ni <sub>eq</sub>
82.32	0.03	0.23	0.49	16.16	0.22	0.03	16.5	1.3

Las propiedades mecánicas originales de este acero demostraron tener una resistencia máxima a la tensión promedio de 498 (MPa), una resistencia a la cedencia

de 348 (MPa) y una elongación superior al 32%, así como excelente ductilidad como lo muestra el valor n de la tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Propiedades mecánicas bajo tensión del acero original

Probeta	Esfuerzo de tensión o tracción (MPa)	Resistencia a la cedencia 0.2% (MPa)	Elongación (%)	Valor K	Valor n
1	497.57	347.89	32.44	0.18	0.18
2	498.47	347.91	32.46	0.18	0.18
3	497.57	347.91	32.32	0.18	0.18
Promedio	497.87	347.9	32.4	0.18	0.18
Desv. St.	0.42	0.009	0.06	0.001	0.001

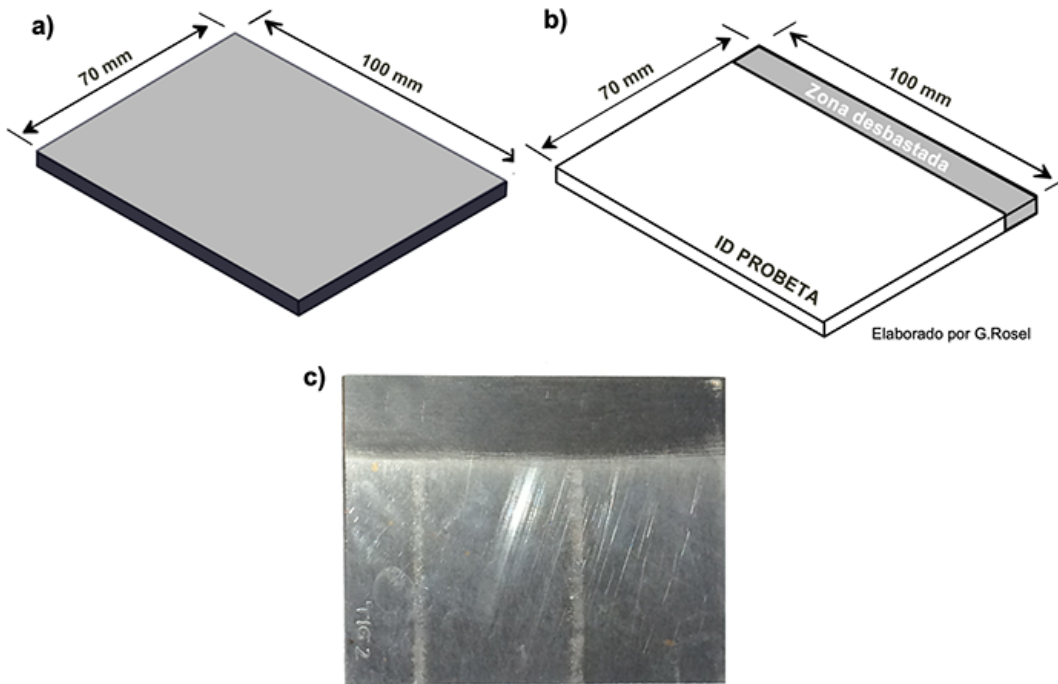
## 3.2 Proceso de soldadura GTAW-P robotizado

### 3.2.1 Maquinado y preparación de cupones

Para evaluar las uniones soldadas se llevó a cabo el proceso de soldadura de acuerdo a las siguientes secciones. Se realizó el plano en 2D CAD (figura 3.2a) [32] de los cupones de soldadura con el software Solidworks 2018, las medidas fueron 100 × 70 × 1.5 mm de longitud, ancho y espesor respectivamente. Después, se convirtieron a planos CAM mediante software Mastercam para ser maquinados cincuenta cupones con la herramienta de corte por chorro de agua waterjet Mitsubishi Electric® Suprema.

Los cupones ya cortados se marcaron con un grabador Dremel enumerándolos en pares con la nomenclatura TIG seguida de número consecutivo del 1 al 20, a fin de ejecutar las corridas experimentales GTAW-P sin metal de aporte. Cinco pares adicionales se identificaron como láminas de prueba para el ajuste del brazo robótico, mismas que se desecharon al final del proceso [22], [35], [55].

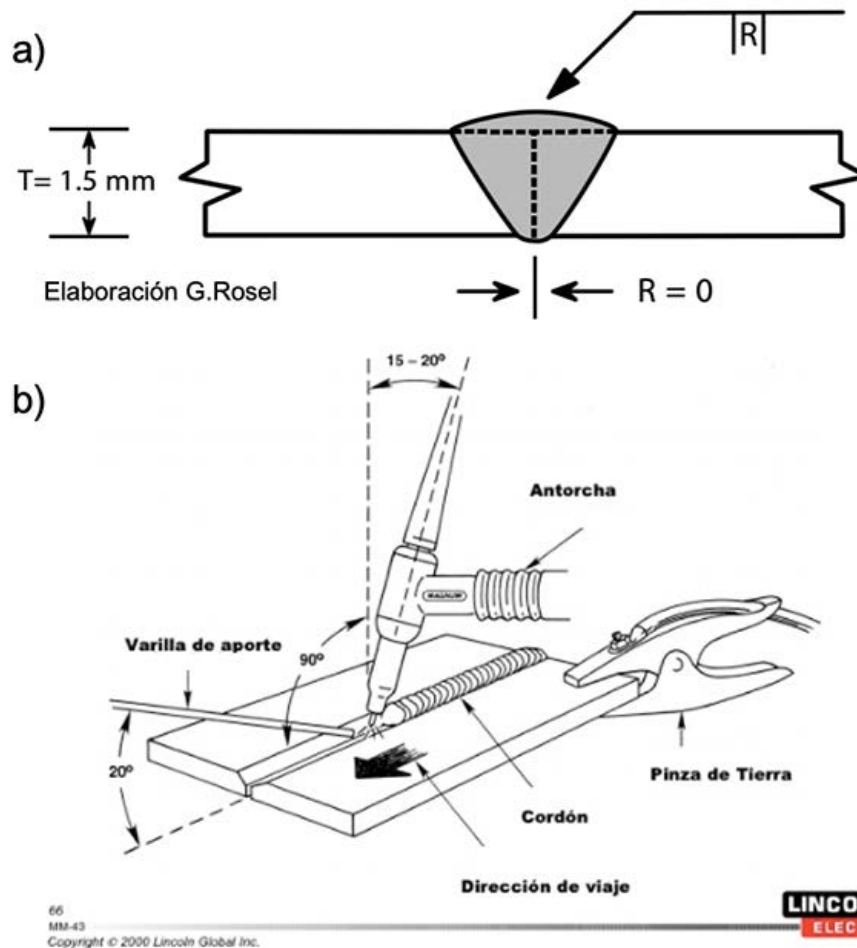
Las probetas tuvieron preparación de filo a lo largo 1 plg del cupón y el canto con papel abrasivo de óxido de aluminio grado 300 para su desbaste, posteriormente se llevó a cabo la limpieza con acetona industrial (figura 3.2b), con el fin de remover suciedad y óxido superficial que pudiera causar inestabilidad en el arco eléctrico. Así mismo, antes de cada corrida de soldadura se limpió cada par de cupones de acuerdo al orden aleatorio correspondiente con un paño de algodón y limpiador Clase 2, grado nuclear sin halógenos ni cloruros, Cantesco C101-A, que cumple con ASME sección V (figura 3.2c).



**Figura 3.2** Cupones de soldadura robotizada: a) Diseño de cupones para soldadura robotizada GTAW-P, b) Vista esquemática de cupón con preparación, desbaste e identificación y c) Fotografía del cupón TIG2 con limpieza previa a soldadura. Elaboración propia ®

### 3.2.2 Diseño de la unión

El diseño de la unión soldada fue de bisel recto sin apertura de raíz (R) (figura 3.3a), posición 1G con ángulo de la antorcha de  $90^\circ$  (figura 3.3b) [22] [35] un solo pase de soldadura y sin metal de aporte, de acuerdo al código AWS D1.6 [11].



**Figura 3.3** a) Diseño de la soldadura en lámina de acero inoxidable ferrítico elaboración propia ®) y b) Vista esquemática del ángulo de la antorcha a  $90^\circ$  aplicado en la soldadura robotizada GTAW-P [55, p. 66]

### 3.2.3 Diseño de experimentos (DOE)

Se utilizó un diseño central compuesto rotatable con tres factores, ocho puntos del cubo, seis axiales y seis centrales, de un bloque con valor  $\alpha=1.682$  para obtener

veinte corridas aleatorizadas experimentales sin réplicas [56], [57], [58]. Los parámetros utilizados en el DOE fueron tomados de la literatura [5], [8], [11], [27], [59], [60] con lo cual se determinaron como exógenas: corriente de soldadura (A) con corrección del arco de  $\approx 17\%$ , velocidad de avance (plg/min) y pulsos del arco (Hz). Con el diseño se determinó el punto óptimo de los múltiples objetivos y se generaron cinco niveles para cada factor [61], determinado los valores mínimos en -1 y máximos en 1, al aplicar el modelo del diseño central compuesto [36], [56], [57], [58], [61], se logró obtener la media de estos puntos en 0 y los extremos del espectro experimental de  $-\alpha$  y  $+\alpha$  tal como se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Niveles del diseño experimental con variables codificadas y naturales [57].

Parámetro	Niveles				
	-1.682	-1	0	1	1.682
Corriente de soldadura (A)	40	60	90	120	140
Velocidad de avance (plg/min)	10	11	13	15	16
Pulsos (Hz)	1.5	5	10	15	18.4

Las combinaciones resultantes, sirvieron para construir las topologías de superficies de respuesta, así como para el análisis estadístico y arrojaron información sobre los parámetros para optimizar el proceso de soldadura GTAW-P robotizado sin metal de aporte [17], [56].

Con base en ello, se ejecutaron veinte corridas experimentales que evaluaron las respuestas de: resistencia máxima a tensión (MPa), resistencia a la cedencia (MPa), elongación (%), ancho de ZAC (mm), tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ ), número de tamaño de grano G ASTM y su comportamiento con respecto a las variables de entrada, este diseño se muestra en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Diseño del experimento y orden de las corridas que se experimentaron.

Orden de corridas	Cupones utilizados	Corriente de soldadura (A)	Velocidad de avance (plg/min)	Pulsos (Hz)
1	TIG 9	40	13	10
2	TIG 2	120	11	5
3	TIG 16	90	13	10
4	TIG 18	90	13	10
5	TIG 1	60	11	5
6	TIG 19	90	13	10
7	TIG 4	120	15	5
8	TIG 3	60	15	5
9	TIG 14	90	13	18.4
10	TIG 11	90	10	10
11	TIG 10	140	13	10
12	TIG 15	90	13	10
13	TIG 13	90	13	1.6
14	TIG 17	90	13	10
15	TIG 12	90	16	10
16	TIG 8	120	15	15
17	TIG 20	90	13	10
18	TIG 6	120	11	15
19	TIG 7	60	15	15
20	TIG 5	60	11	15

### 3.2.4 Corridas experimentales robotizadas

Las corridas experimentales se llevaron a cabo en *Lincoln Electric Welding School*, en Apodaca NL, México. Se utilizó proceso de soldadura GTAW-P sin metal de aporte y corrección del arco del 17% para la corriente de soldadura. Se utilizó un robot industrial FANUC ARC MATE 100ic con seis ejes de movilidad, gabinete de control y fuente de poder Lincoln electric (s500 power wave), con electrodo de W con 2% de Th (EWT2), protección de gas Ar al 99.9% con flujo de 12 L/min, sin gas de respaldo [22], [35], [55]. La programación de trayectorias se hizo a pie de máquina mediante la consola de programación (*teach pendant*) empleando lenguaje TLP (software embebido de FANUC robotics ®) [44], [48], [49].

Se programaron cinco puntos sobre el bisel recto de los cupones a soldar, como se muestra en la figura 3.4a) calculando una distancia entre el electrodo y piezas de 2 mm para obtener un voltaje calculado en 12 V.

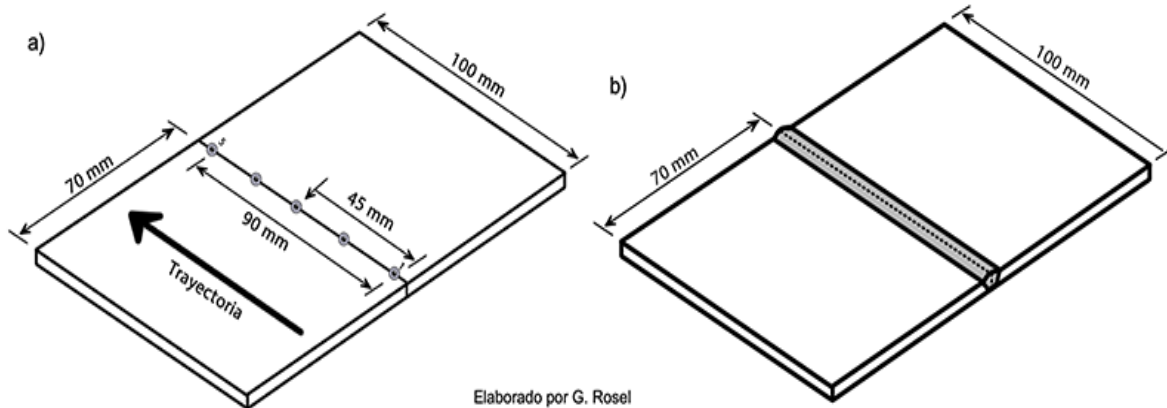
Así mismo, en la consola de programación se dispusieron los parámetros de la corriente de soldadura (A), velocidad de avance de antorcha (plg /min) y pulsos del arco (Hz) definidos en el diseño de experimentos y con base en esto, se ejecutaron las corridas.

Las pruebas iniciales y veinte corridas, se documentaron bajo formatos de especificación del procedimiento de soldadura (WPS, por sus siglas en inglés) [11], donde se describe fecha de ejecución, técnica de soldadura, diseño de la unión, protección del gas, técnica y secuencia [26].

Los cupones se fijaron a un robot hexápodo que funcionó como mesa de trabajo, con un soporte de acero HSLA de 1 plg de espesor, que fue esmerilada en el eje central de correspondencia a las piezas de soldeo a fin de que cuando se presente la fundición, las chapas no se soldasen al respaldo.

Para sujetarlas, se prensaban con piezas especiales maquinadas para ese fin y sujetas con pinzas de presión de soldadura, resultando las uniones soldadas que se ilustran en la figura 3.4b). Una vez ejecutadas las corridas experimentales, se generaron los planos en CAD-CAM para extraer del centro de los cupones soldados las muestras para ejecutar la caracterización macro-microestructural y mecánica de los cupones de soldadura.





**Figura 3.4** a) Diseño y programación de la trayectoria del robot FANUC® para soldadura GTAW-P en acero inoxidable ferrítico AISI 430, y b) Vista esquemática de los cupones de soldadura. Elaboración propia ®

### 3.2.5 Calor de entrada

El cálculo de calor de entrada se basó en lo descrito por estándar WIT-AWS [26] descrita en la sección 2.3.2.7 y de acuerdo con Guzmán et al. [62], teniendo como eficiencia del arco de 0.85, así como la aplicación de las ecuaciones 2.5 y 3.3.

$$Q_{net} = \eta Q_{arc} \quad (3.3)$$

Donde:

$Q_{net}$  = Calor de entrada (kJ/mm)

$\eta$  = Eficiencia del arco (0.85)

## 3.3 Caracterización macro y microestructural

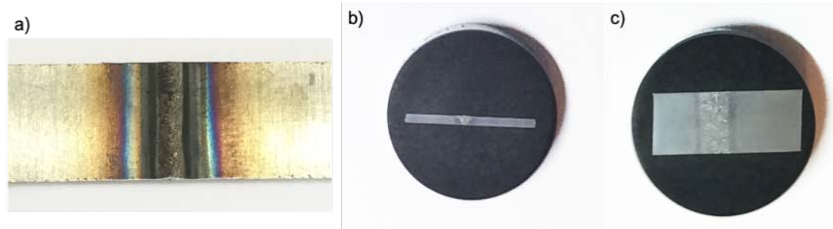
El material se caracterizó antes y después del proceso de soldadura GTAW-P, a fin de documentar todos los cambios macro y microestructurales que se dieron durante el proceso de la experimentación.

### 3.3.1 Metalografía

El proceso metalográfico [51] sujeto al estándar ASTM E3 [63] consistió en corte de muestras de las veinte corridas experimentales, las cuales tuvieron dimensiones de

100×10×1.5 mm de largo, ancho y espesor, respectivamente que fueron tomadas del centro de los cupones y maquinadas con una herramienta de corte por chorro de agua en máquina Mitsubishi Electric® Suprema, a fin de obtener un corte preciso y sin calentamiento.

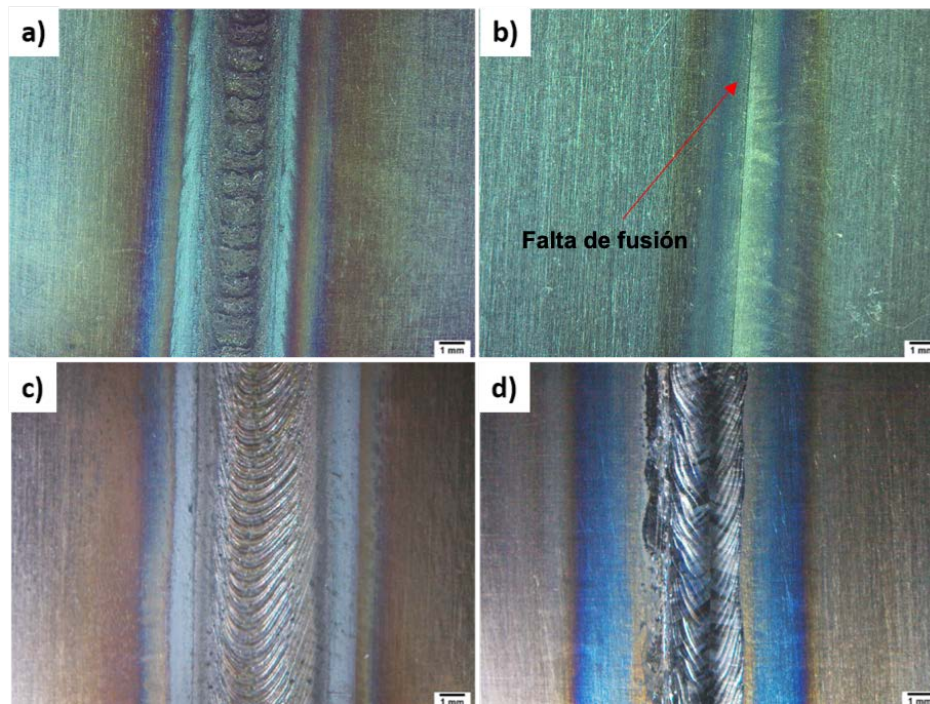
**A posteriori**, se cortaron los extremos para ajustar el tamaño de los especímenes a 22 × 10×1.5 mm de largo, ancho y espesor, respectivamente (figura 3.5a), para encapsularse en baquelita las secciones transversales y longitudinales. Las cuarenta muestras fueron encapsuladas en baquelita utilizando una montadora metalográfica de prensa LHM-1000 a 135°C por 30 min con el mismo tiempo de enfriamiento al aire calmado. Después se ejecutó desbaste con papeles abrasivos de SiC grados 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000. Seguidamente, las muestras tuvieron pulido con equipo electromecánico MetaServ Twin® 250 entre 50 y 450 RPM, con pasta de diamante de 5 y 7 μm de diámetro y agua por goteo, dispuesto sobre paño fino Microcloth® de pelo largo, los tres anteriores Buehler©. Finalmente, se atacó químicamente por inmersión por tiempos entre 20s y 75 s 1m 15 s, en reactivo Vilella (5 ml HCl, 1 g ácido pícrico y 100 ml etanol o metanol), a fin de revelar las características microestructurales (figuras 3.5 b) y 3.5c)) del metal base, ZAC, así como el cordón de soldadura y posteriormente, expuestas al estereoscopio con aumentos de 6.5 y 16x.



**Figura 3.5** a) Unión soldada cortada para metalografía, b) probeta transversal y c) espécimen longitudinal montada en baquelita.

### 3.3.2 Análisis macroestructural

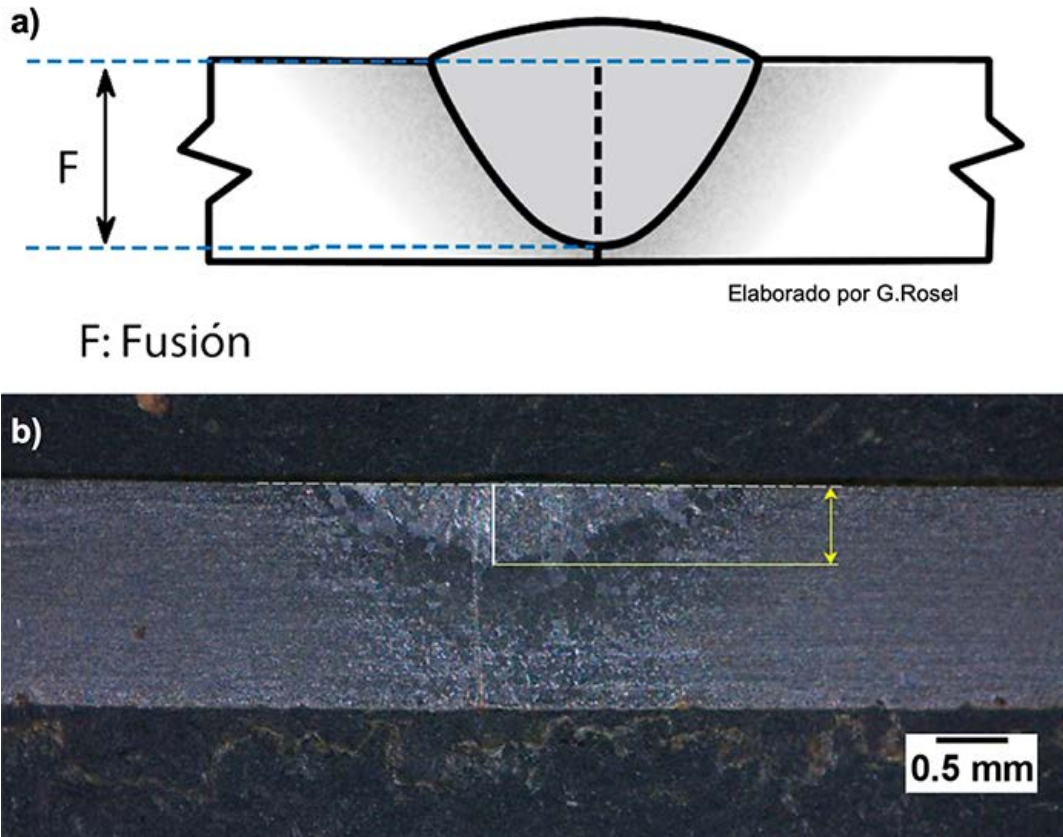
Para el análisis de la macroestructura longitudinal, los cupones de soldadura se limpiaron con alcohol isopropílico y se analizaron en un estereoscopio STEMI 2000-C que cuenta con cámara Axiovert ERc 5s Carl Zeiss de donde se extrajeron las macrografías de forma digital del anverso (figuras 3.6a) y 3.6c)) donde se puede observar en ambas, la cara del metal fundido y reverso donde se observa el bisel recto de las chapas sin fusión (figura 3.6b) y la penetración completa de la soldadura (figura 3.6d) de los cupones de soldadura con software de licenciamiento AxioVision Rel.4.8 de la misma marca con aumentos de 6.5 y 16x



**Figura 3.6** Macrografías a 6.5x de las uniones soldadas GTAW-P antes de maquinarse: a) Anverso del cupón longitudinal TIG1, b) Vista macroscópica de la unión TIG1 por el reverso con falta de fusión, c) Anverso de la unión soldada TIG 10 en vista longitudinal y d) Reverso del cupón TIG10 con fusión completa del material.

### 3.3.2.1 Fusión de cupones y penetración de la soldadura

Para evaluar la fusión del metal durante el proceso de soldadura, las muestras transversales previamente preparadas metalográficamente [51] y con ataque químico, se expusieron al estereoscopio a 16 x a fin de evaluar y medir la fusión de la soldadura, tal como se observa en la figura 3.7a). Se utilizó el software de licenciamiento AxioVision Rel. 4.8 de Carl Zeiss para obtener las macrográficas digitales con escala y lograr con ello, medir la fusión en mm y % (figura 3.7b).



**Figura 3.7** a) Vista esquemática de la evaluación de fusión de las chapas de acero inoxidable y b) Medición por estereoscopía transversal a 16x del metal recristalizado del espécimen TIG3. Elaboración propia ®

### 3.3.3 Caracterización microestructural

Para analizar la evolución microestructural se cortaron muestras de 10x10 mm de longitud y ancho, respectivamente para la caracterización inicial, mientras que

para las uniones soldadas GTAW-P se utilizaron las muestras de 25×10×1.5 mm, así como el empleo del procedimiento descrito en el estándar ASTM E3 [63] antes descrito.

Dichas muestras fueron expuestas en un microscopio óptico Axiovert 40 MAT con cámara Axio Vert ERc 5s Carl Zeiss incluida, que permitió obtener los campos microestructurales. El software de licenciamiento utilizado para obtener digitalmente las micrografías fue AxioVision Rel.4.8 de la misma marca que el microscopio. Los objetivos utilizados fueron 5x, 10x, 20x, 50x y 100x.

Para la caracterización inicial se hicieron dos campos longitudinal y transversal para cada aumento (100x, 200x, 500x y 1000x), respectivamente. Mientras que para las veinte uniones soldadas se hicieron seis a diez campos a 50x (dependiendo del espesor del cordón y/o deformidad de lámina), a 100x se hicieron seis de la ZAC derecha, ZAC izquierda y la soldadura, a 200x se hicieron catorce micrografías de cada corrida de las tres zonas a fin de determinar presencia de segundas fases, medir tamaño de grano, hacer procesamiento digital de imágenes (PDI), y finalmente a 500x se hicieron seis micrografías de las tres zonas por probeta, todas las anteriores de las secciones transversales.

A fin de obtener más datos para alimentar la base de datos, se hicieron también de las probetas longitudinales los siguientes campos: cuatro campos a 50x que abarcan metal base, ZAC y soldadura (derecho e izquierdo), diez micrografías a 200x de las tres zonas y finalmente seis a 500x también de las tres zonas a estudiar [50], [51], [52]

El número de campos, aumentos, zona de enfoque y fin para el que utilizaron se muestra en la tabla 3.5, resultando 1,080 campos. Una vez obtenidos los campos se procedió a construir las panorámicas de las uniones soldadas, medir el ancho de la ZAC microestructural, determinar el número G ASTM y promedio de tamaño de grano, como se describe en las siguientes subsecciones.

**Tabla 3.5** Aumentos y número de campos utilizados en las veinte uniones soldadas GTAW-P transversales y longitudinales para la caracterización microestructural.

Aumento	Sección	Número de campos	Zona microestructural	Propósito
50x	Transversal	6 a 10	Metal base, ZAC, Soldadura	Hacer panorámica de la unión soldada
	Longitudinal	2	Metal base, ZAC, Soldadura (derecha)	Hacer panorámica de la unión soldada
50x	Longitudinal	2	Metal base, ZAC, Soldadura (izquierda)	Hacer panorámica de la unión soldada
	100x	Transversal	2	Metal base (derecho)
2			ZAC(derecho)	
2			Soldadura	
Longitudinal		2	Metal base	
		2	ZAC	
		2	Soldadura	
200x	Transversal	2	Metal base	Control
		6	ZAC	Medir tamaño de grano y PDI
		6	Soldadura	Identificar y determinación de segundas fases
	Longitudinal	2	Metal base	Identificar y determinación de segundas fases
		2	ZAC	
		6	Soldadura (3 derecha, 3 izquierda)	
500x	Transversal	2	Metal base	Control
		2	ZAC	Identificar partículas en límites grano, así como segundas fases y presencia de carburos
		2	Soldadura	Identificar partículas en límites grano, así como segundas fases y presencia de carburos
	Longitudinal	2	Metal base	Control
		2	ZAC	Identificar partículas en límites grano, así como segundas fases y presencia de carburos
		2	Soldadura	Identificar partículas en límites grano, así como segundas fases y presencia de carburos

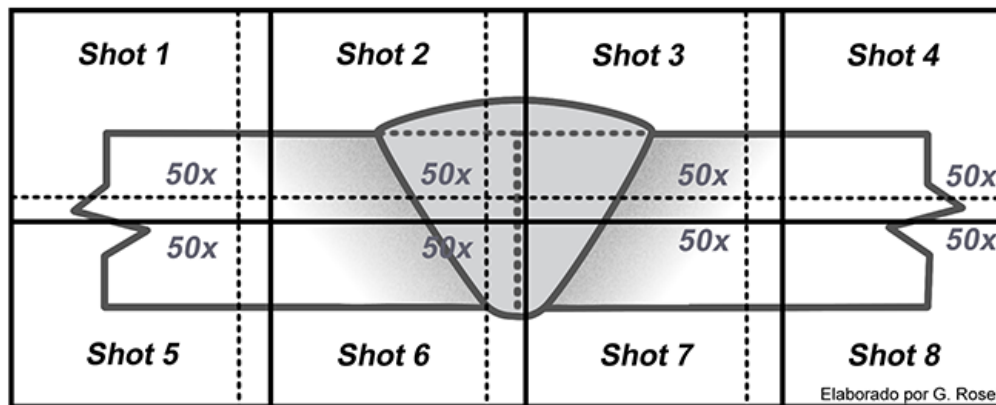
### 3.3.4 Panorámicas de micrografías transversales

A fin de obtener una imagen completa de la sección transversal de los cupones de soldadura se aplicó una técnica de fotografía [64] y PDI [65] a fin de lograr fotografías de amplio formato o panorámicas a partir de micrografías a 50x.

Se hizo un barrido de micrografías a 50x de las muestras encapsuladas en baquelita expuestas en el microscopio óptico, obteniendo de seis a diez campos por espécimen [50]. Esto depende de la condición de la lámina y unión soldada, ya que en algunas ocasiones el cordón de soldadura fue muy ancho y la lámina se deformó, en esos casos fue necesario obtener más campos. En los casos que la lámina no tuvo deformación o la fusión fue mínima o completa sin corona y/o respaldo altos, el número de micrografías fue menor.

Los campos se hicieron de manera ordenada de acuerdo a la figura 3.8 [66]. El barrido se inició del extremo izquierdo de la muestra hacia el extremo derecho de la misma en dos filas. Las lecturas ejecutadas hacia la derecha abarcaban entre 10 y 30% (dependiendo de la condición de la lámina) del extremo derecho de la micrografía anterior y 20% del espacio superior [64].

Una vez obtenidos los campos correspondientes a cada espécimen, se generó digitalmente una micrografía panorámica de amplio formato que permitió evaluar la distribución y evolución microestructural de las uniones soldadas GTAW-P, medir ancho de ZAC, altura de la corona y respaldo, así como comparar con los resultados obtenidos con cada macrografía.



**Figura 3.8** Vista esquemática del procedimiento para obtener micrografías panorámicas, por medio de PDI. Elaboración propia ®



### 3.3.4.1 *Tamaño de grano promedio y número de tamaño de grano G ASTM*

Se hicieron seis micrografías a 200x de cada espécimen de la ZAC a fin de determinar el tamaño de grano promedio y número G ASTM para las veinte corridas experimentales. Se empleó la metodología de los tres círculos de Abrams (figura 3.9a) descrita en el estándar ASTM E112 [66, p. 11], que parametriza la determinación del tamaño de grano en  $\mu\text{m}/\text{mm}^2$  de muestras metalográficas.

Este método permite hacer el conteo real de los granos mediante interceptos de los límites de grano sobreponiendo tres líneas circulares a la muestra, la suma de estas circunferencias es una longitud de 500 mm. Una vez sobrepuesta la plantilla en la micrografía, se cuentan los interceptos debiendo tener como objetivo 500 conteos entre 5 a 10 campos de acuerdo con el estándar mencionado. Para hacer los cálculos posteriores a los conteos se aplican las ecuaciones 3.5 y 3.6 [66, pp. 8,9,12], esta última determina el número de tamaño de grano G ASTM.

$$N_L = \frac{N_i}{L/M} \quad (3.5)$$

Donde:

$N_i$  = Número de granos inceptados en la plantilla de tres círculos

$L$  = Longitud de línea de ensayo ( 500 mm)

$M$  = Magnificación del aumento (200x)

$$G = - 3.2877 + 6.643856 \log_{10} N_L \quad (3.6)$$

Una vez aplicadas estas ecuaciones a las veinte corridas experimentales, se determinó el tamaño de grano G ASTM para cada una, comparando contra la tabla 4 del multicitado estándar ASTM E-112 [66, p. 8], ver figura 3.9 b). En aquellos casos que el número G resultante en las corridas experimentales no fuese exacto con el número G de la tabla referida, se procedió hacer interpolación lineal con la ecuación 3.7.



$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1 \quad (3.7)$$

Donde

$y$  = diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ ) de la corrida experimental

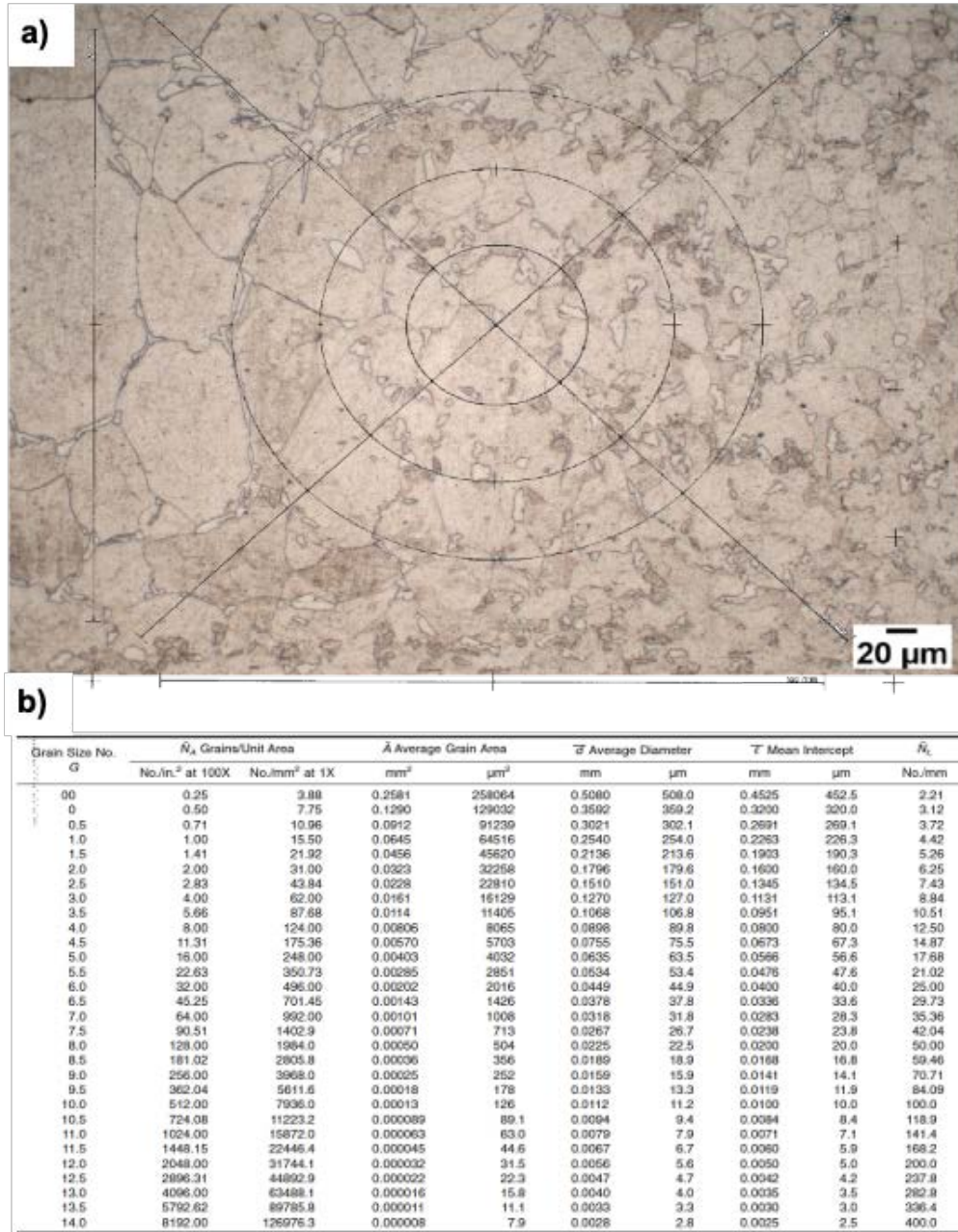
$y_1$  = diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ ) del límite inferior en la tabla 4 de ASTM E112

$y_2$  = diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ ) del límite superior en la tabla 4 de ASTM E112

$x_1$  = número G del límite inferior en tabla 4 de ASTM E112

$x_2$  = número G del límite superior en tabla 4 de ASTM E112

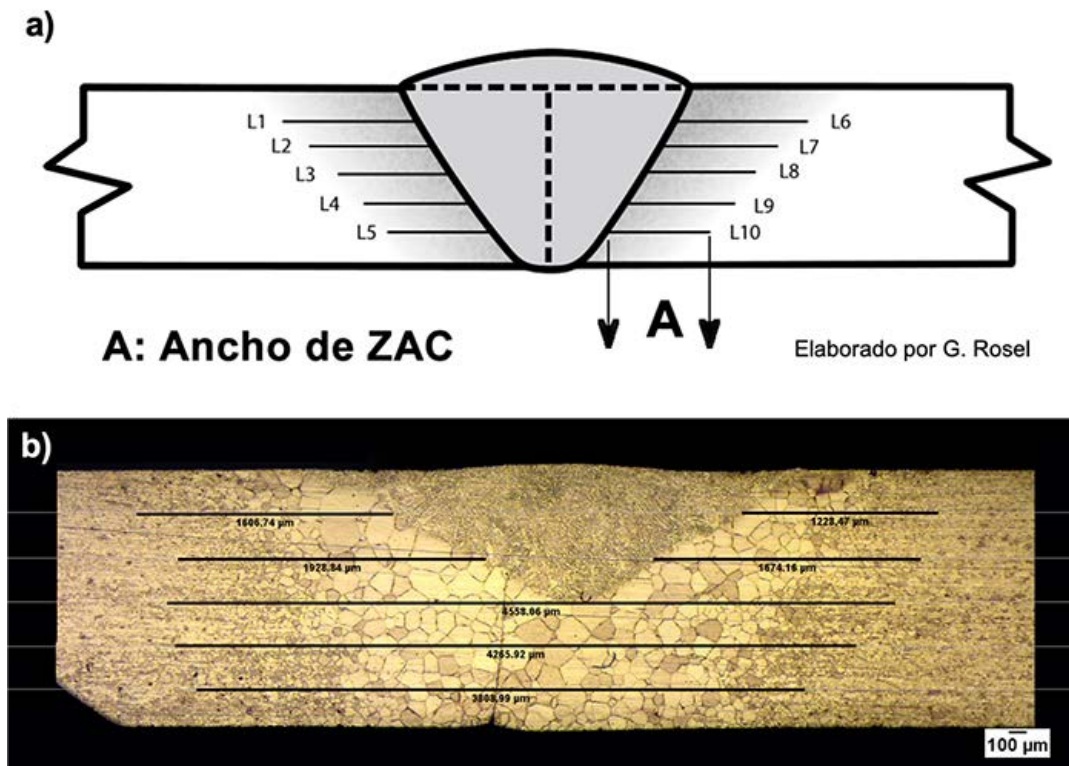
Cabe señalar que la relación de G con el diámetro promedio de grano es inversamente proporcional: a mayor número G, menor es el tamaño de grano. Con ello se determinó la cuantificación estandarizada del diámetro promedio de grano en  $\mu\text{m}/\text{mm}^2$ , es decir, tamaño de microgranos por  $\text{mm}^2$ , reduciendo el error mediante mediciones aleatorias [67].



**Figura 3.9** a) Plantilla de tres círculos de Abrams ASTM E-112 [66, p. 11] sobre micrografía a 200x de la ZAC del espécimen TIG 8 para determinar el tamaño de grano y número G ASTM y b) Relación de tamaño de grano para granos uniformes, equiaxiales y orientación aleatoria ASTM E-112 [66, p. 8].

### 3.3.4.2 Ancho de la ZAC

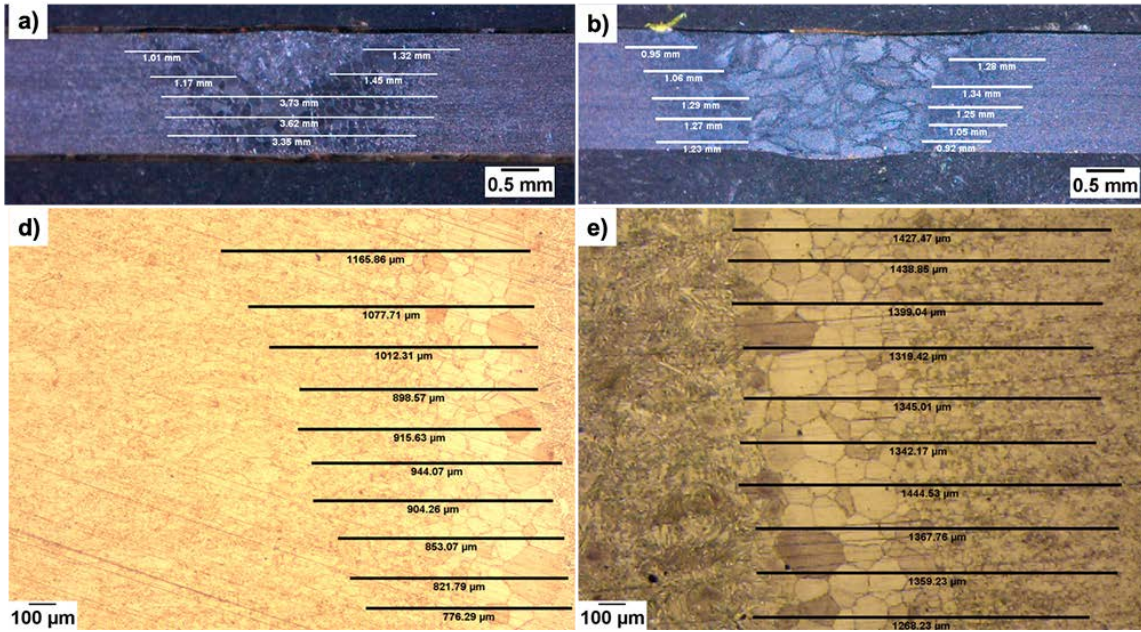
Para tener datos más exactos del ancho de ZAC se midió sobre las micrografías panorámicas obtenidas digitalmente de las veinte corridas experimentales, en las que se dibujaron cinco pares de líneas horizontales equidistantes entre sí, comenzando en el límite de la línea de fusión hasta llegar al metal base, que abarca el ancho de la ZAC por ambos lados de las uniones soldadas, como se observa en la figura 3.10a). Los valores se midieron directamente y se obtuvo el ancho promedio (figura 3.10b).



**Figura 3.10** Metodología para medir el ancho de ZAC en soldadura robotizada GTAW-P con fusión completa: a) Vista esquemática del procedimiento y b) Micrografía panorámica del espécimen TIG 1 que ilustra estas mediciones en caso de fusión incompleta. Elaboración propia ®

A fin de obtener más datos de ancho de la ZAC para robustecer la base de datos, se midieron en macrografías transversales a 16x (figuras 3.11a) y 3.11b)) y

longitudinales (anverso y reverso a 6.5 x), así como longitudinalmente en micrografías a 50x (figuras 3.11c) y 3.11d)). Cabe señalar que estos datos no forman parte del reporte final para la superficie de respuesta, sin embargo, fueron almacenados en la base de datos general, para el momento de la optimización contar con datos suficientes para las redes neuronales y que el ancho de ZAC tuviese entre 950 y 1,200 mediciones reales, dado que no se replicó el experimento.



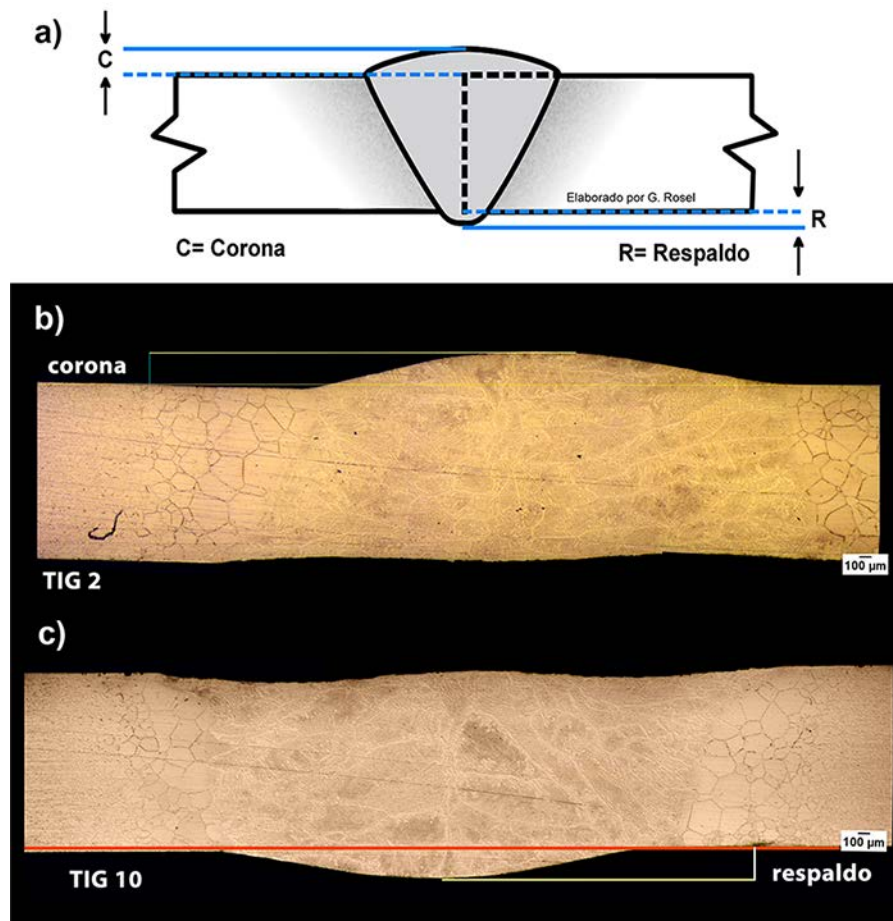
**Figura 3.11** Mediciones de ancho de ZAC: a) Macrografía TIG1 con fusión incompleta, b) Sección transversal TIG6, c) ZAC izquierda longitudinal a 50x de TIG14 y d) ZAC derecha de la unión TIG4. Elaboración propia®.

### 3.3.4.3 Altura de la corona y respaldo

Sobre las micrografías panorámicas se trazó una línea horizontal sobre los extremos del metal base atravesando la corona [68] y otra línea horizontal sobre el punto más alto de la corona (figuras 3.12a) y 3.12b)). En el caso del respaldo, se trazó una línea horizontal desde los extremos de metal base atravesando la soldadura y se trazó otra línea horizontal hacia el punto más bajo de la imagen, obteniendo un espacio para extraer el dato (figura 3.12c). Lo anterior, para proceder a las



mediciones digitales de los espacios correspondientes a la altura de la corona y respaldo, respectivamente.



**Figura 3.12** a) Vista esquemática de obtención de la altura de corona y respaldo de uniones soldadas de acero inoxidable ferrítico, micrografías panorámicas a 50x de uniones soldadas robotizadas: b) TIG 2 donde se observa la medición de corona y c) TIG 10 indicando la medición del respaldo. Elaboración propia ®

#### **3.3.4.4 Fracción volumétrica de martensita intergranular (MI)**

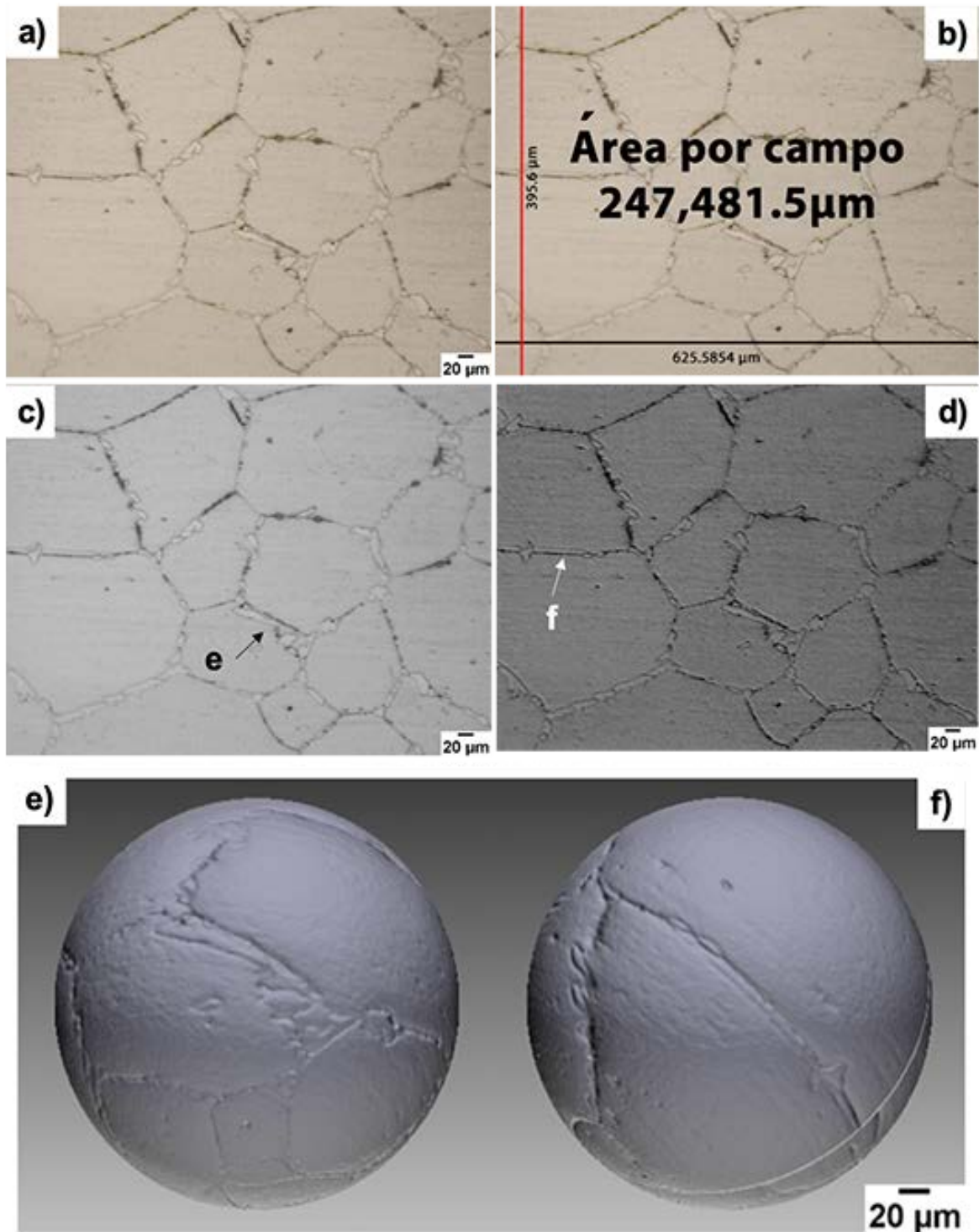
En la figura 3.13 se muestra en mapa mental, la síntesis de las cuatro fases del proceso, donde inicialmente se determinaron las áreas, en segunda instancia se hizo PDI para proceder al conteo de partículas con la finalidad de obtener la fracción volumétrica [65], [69]. La primera parte del proceso consistió en el cálculo su fracción

volumétrica como diferencial de áreas. Se utilizaron seis micrografías de la ZAC a 200x, los mismos campos con los que se midió el tamaño de grano para las veinte corridas experimentales.



**Figura 3.13** Mapa mental de la metodología para obtener la fracción volumétrica y porcentaje de martensita intergranular de uniones soldadas robotizadas GTAW-P en acero inoxidable ferrítico AISI 430 sin metal de aporte. Elaboración propia ®

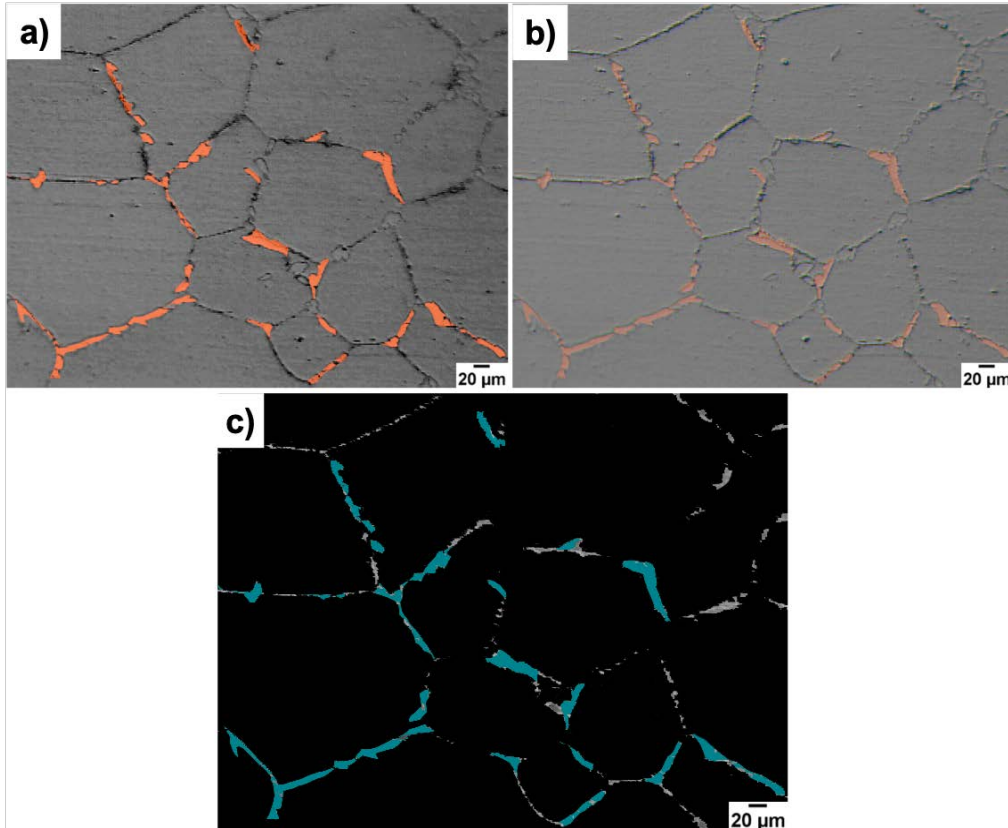
El punto toral fue la determinación del área total en  $\mu\text{m}^2$  como región de interés, que se obtuvo con la escala de 200x de las micrografías. El área obtenida ( $A_1$ ) (figura 3.14b) se multiplicó por 6 ( $A_t$ ) que fueron los campos utilizados durante el proceso de obtención de tamaño de grano. Posteriormente, se efectuó el PDI mediante el uso de AxioVision Rel 4.8, Photoshop CS6 x 64 (13.0) para Windows, Adobe ExtendedScript Toolkit (ESTK) 3.5 y Gwyddion 2.54, el cual se basó en separación y extracción de partículas mutuamente excluyentes por atributo de forma (figuras 3.14c) y 3.14d)) [70]. En caso de algunas fases, donde no se identificaba claramente la diferencia entre martensita intergranular y ferrita poligonal intragranular [71] se ejecutó análisis tridimensional de dichas partículas para identificación de fase (figuras 3.14e) y 3.14f)).



**Figura 3.14** PDI para obtener fracción volumétrica de MI: a) Micrografía a 200x de la muestra TIG10, b) Determinación de área por campo, c) y d) separación de canales y bits, e) y f) Análisis tridimensional de fases de difícil identificación. Elaboración propia ®

Una vez separados los canales y convertidos los bits, se identificaron con etiqueta de color lo que permitió la identificación digital de la martensita intergranular de mayor área o gruesa (figura 3.15a) [72]. Posteriormente, para identificar la MI más fina se extruyeron las zonas de interés (figura 3.15b).

Posterior a esto, se separaron los canales [77] en colores identificando en color verde y gris la MI quedando el resto de las fases y granos en color negro (figura 3.15c) por no ser región de interés, para proceder al conteo de área de cada partícula en  $\mu\text{m}^2$ , integrándolas en la base de datos. Finalmente, se hizo la suma de todas las áreas martensíticas [69] y se obtuvo el área total ocupada en  $\mu\text{m}^2$  ( $AT_{mi}$ ) de MI por espécimen o corrida experimental, para determinar por medio de proporcionalidad directa el porcentaje de MI en cada corrida.



**Figura 3.15** PDI de microestructura del espécimen TIG10: a) Martensita intergranular gruesa en color rojo, b) Extrusión de bordes para identificación de MI fina y c) Identificación de fase de interés en verde y gris. Elaboración propia ©



La metodología descrita del PDI en el cuerpo de este documento y expresado visualmente, se aplicó a las 120 micrografías de la ZAC en veinte corridas experimentales, a fin de obtener datos fidedignos para la optimización.

## **3.4 Caracterización mecánica**

Para conocer las propiedades mecánicas bajo tensión y micro dureza del acero inoxidable ferrítico 430 a fin de poder documentar los cambios durante el proceso experimental, se caracterizó antes y después del proceso de soldadura.

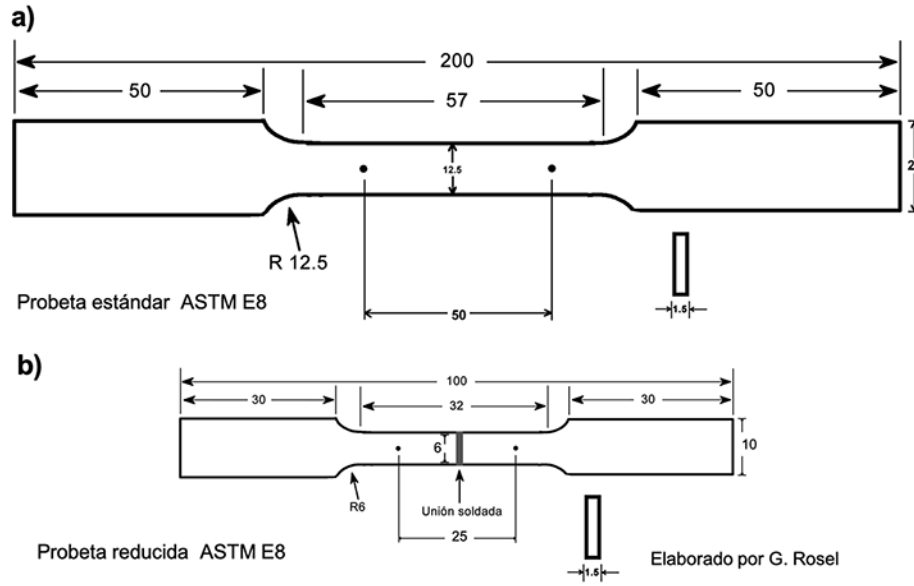
### **3.4.1 Pruebas de tensión**

Para llevar a cabo las pruebas de tensión se hicieron los planos de las probetas de ensayo de acuerdo al estándar de métodos para pruebas de tensión de materiales metálicos de la ASTM E8 / E8M [73].

Para el diseño de los planos de las probetas de tensión en 2D CAD se utilizó el software SolidWorks 2014 y posteriormente se modificaron a CAM (WARD CAM) para poder ser maquinadas las muestras.

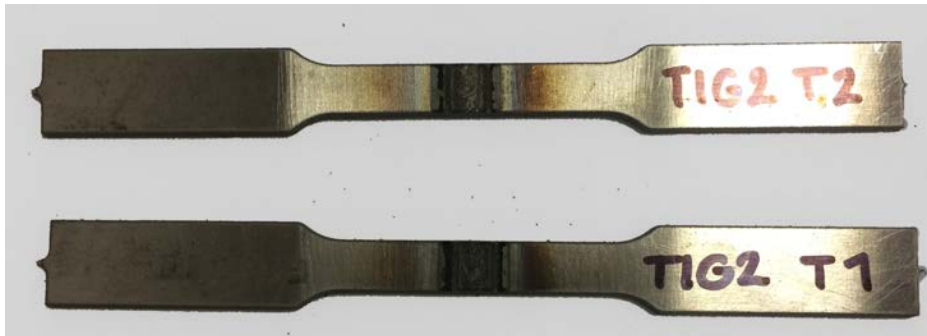
Las probetas de prueba del acero original se tomaron del centro de la lámina siguiendo los procedimientos presentes en ASTM A370 [74].

Se maquinaron tres probetas estándar de 12.5 mm de ancho con longitud calibrada de 50 mm la figura 3.16a) muestra el plano. Mientras que para las pruebas de tensión de las uniones soldadas se utilizaron probetas reducidas de 6 mm de ancho de acuerdo con ASTM E8 [73] por duplicado, cuya longitud calibrada fue 25 mm, teniendo en el centro la soldadura. La figura 3.16b) muestra el plano de las probetas de tensión reducidas.



**Figura 3.16** Planos de probeta de tensión (medidas en mm): a) Probeta estándar de 12.5 mm de ancho para caracterización inicial y b) Probeta reducida (6 mm) de la unión soldada. Elaboración propia ®

El maquinado se realizó en equipo de corte por chorro de agua Mitsubishi Electric® Suprema. La figura 3.17 muestra las probetas de uniones GTAW-P experimentales por soldadura robotizada sin aporte.

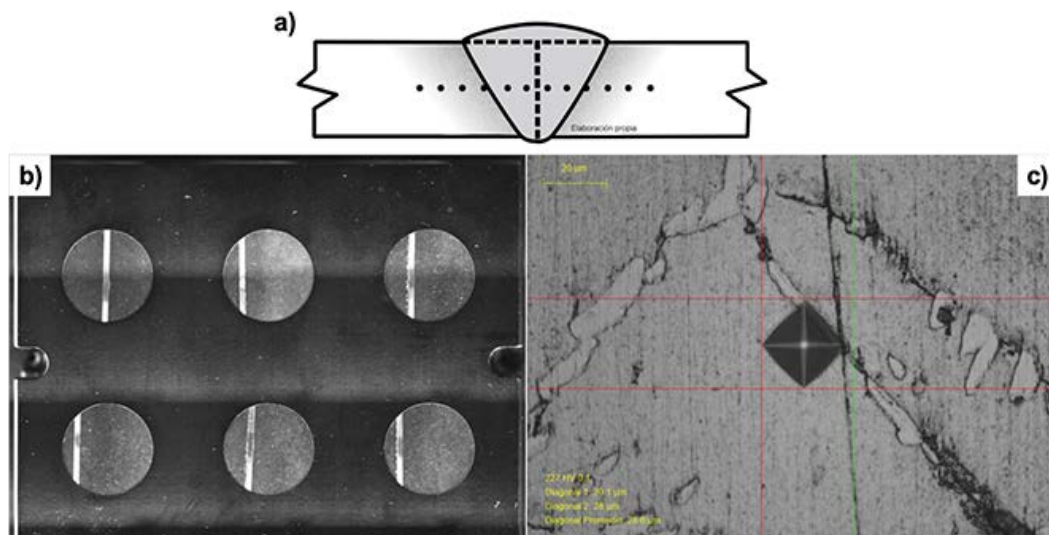


**Figura 3.17** Fotografías de las probetas de tensión de unión soldada en acero 430.

Posteriormente, se desbastaron con papel abrasivo grado 600 en las longitudes de trabajo (incluyendo el radio) a lo largo del eje principal de las probetas. Para ensayarlas, se colocaron en máquina electromecánica INSTRON® 4482 la rapidez de deformación para obtención de la cedencia fue  $8 \text{ MPa s}^{-1}$  y para la obtención de la resistencia máxima a la tensión fue  $15 \text{ mm/min}$ . La resistencia a la cedencia se calculó mediante el método offset de  $0.2\%$ , empleando un extensómetro INSTRON de  $50 \text{ mm}$  de longitud calibrada.

### 3.4.2 Dureza Vickers

La obtención del perfil de micro dureza se realizó bajo estándar ASTM E384 [75]. Se empleó durómetro Durascan 80 g5 EmcoTest, con el cual se realizó barrido con carga de  $100 \text{ gf}$  por  $12 \text{ s}$  en muestras de sección transversal del metal base, ZAC y soldadura en los especímenes que habían sido sujetos al método metalográfico. Se realizaron doce lecturas en distancia de  $9.6 \text{ mm}$ , como se puede observar en la figura 3.18a), colocadas en un porta-muestras (figura 3.18b) y hacer el barrido de forma automatizada, diagonales promedio de  $28.5 \mu\text{m}$  (figura 3.18c).



**Figura 3.18** Prueba de dureza Vickers: a) Distribución de indentaciones (elaboración propia ®), b) Distribución de probetas sobre porta-muestras y c) Huella de micro-indentación de la ZAC en muestra TIG10.

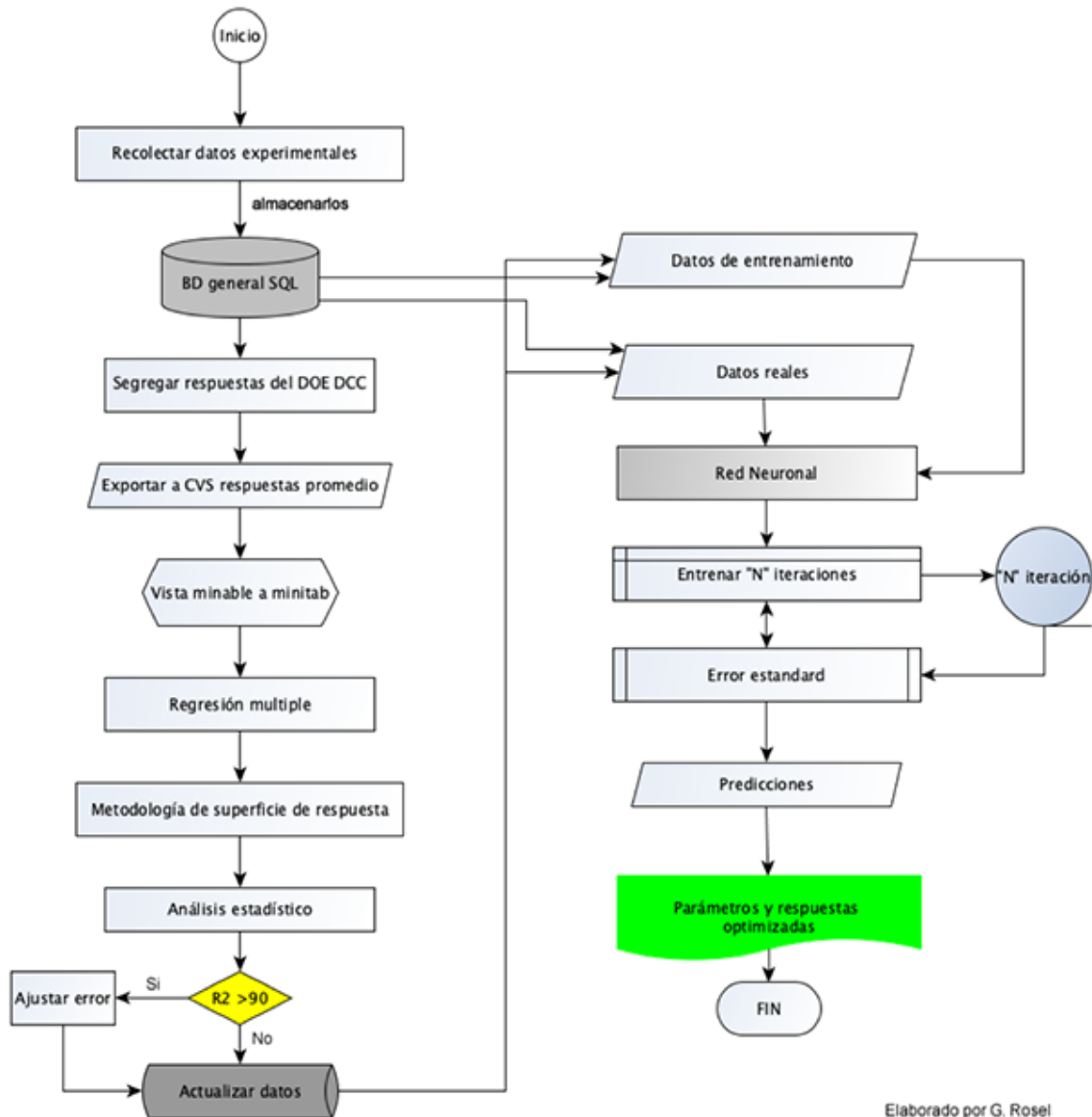
## 3.5 Optimización y simulación

Para lograr la optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P en lámina de 1.5 mm de espesor de acero inoxidable ferrítico AISI 430 sin metal de aporte, se hizo experimentación previa, se analizaron y almacenaron los datos. Con esta experiencia se logró determinar que parámetros podrían ser optimizados (corriente de soldadura, velocidad de avance, pulsos del arco) y se generó un diseño de experimentos (DoE). Se ejecutaron las corridas experimentales y se hizo un extenso proceso de recolección de datos experimentales sobre las muestras, como se expresó en las secciones anteriores, es decir, todos los datos generados de pruebas mecánicas de tensión (resistencia máxima a la tensión, resistencia a la cedencia y porcentaje de elongación antes de la fractura), ancho de ZAC, tamaño de grano y número G, se almacenaron en la base de datos general.

Después de esto, se generaron los datos promedio y se escribieron como respuestas del diseño central compuesto en Minitab 18.1, donde se hicieron regresiones múltiples y se generaron los resultados de metodología de superficie de respuesta (MSR) [57] obteniendo regiones experimentales y gráficos guía para la optimización, tales como gráficas de superficie y contorno. Haciendo también un análisis estadístico para conocer las interacciones de las variables y ajustar errores para finalmente actualizar la base de datos general.

Se hizo una segregación de datos como preparación para alimentar una red neuronal artificial [76] que se desarrolló para la optimización y que se alimentó con datos reales y artificiales, segregados en archivos pequeños cvs y los de la base de datos general.

La red neuronal se entrenó con los datos experimentales y artificiales inducidos en 1000 iteraciones, ajustando el error estándar y logrando entregar predicciones de parámetros y sus respuestas, ambas optimizadas. Este proceso de optimización se describe mediante un diagrama de flujo en la figura 3.19.



**Figura 3.19** Diagrama de flujo para el proceso de optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®

### 3.5.1 Regresión lineal múltiple y análisis estadístico

Estas regresiones para el presente estudio se expresan matemáticamente con la ecuación 3.8 [17], es una técnica estadística para explicar las similitudes entre las relaciones de las variables (endógenas y exógenas) [77]. Este modelo permite

determinar que variable tiene influencia sobre otra(s) o que correlación existe entre estas [56], [57], [58], [61], [77].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.8)$$

Donde

$y = \text{variable endógena}$

$x = \text{variables exógenas}$

$\beta = \text{coeficientes del efecto marginal estimados}$

$\varepsilon = \text{error}$

Se efectuó el análisis de variables promedio estandarizadas, desviación estándar (S), varianza, valor F para determinar qué variable independiente tiene capacidad de explicar la variación de las variables dependientes, valor P [78], [79] como la relación de fiabilidad de un estudio [79], coeficiente de determinación o correlación múltiple ( $R^2$ ) y cuadrado ajustado (R), para evaluar los efectos de los parámetros evaluados [56], (corriente de soldadura, velocidad de avance de la antorcha y pulsos del arco) sobre las respuestas del sistema [57], [86] (resistencia máxima a la tensión, resistencia a la cedencia, porcentaje de elongación, ancho de ZAC, tamaño de grano promedio en ZAC y número de tamaño de grano G ASTM) a fin de optimizar los parámetros de la soldadura robotizada sin metal de aporte en lámina de acero inoxidable ferrítico.

### 3.5.2 Superficie de respuesta

Las variables endógenas evaluadas [77] con MSR [57] fueron:  $y_1$  resistencia máxima a la tensión (UTS),  $y_2$  resistencia a la cedencia ( $Y_s$ ),  $y_3$  elongación (E%),  $y_4$

tamaño de grano en la ZAC ( $Gz$ ),  $y_5$  ancho de ZAC, así como  $y_6$  número G ASTM ( $Ng$ ). Las variables exógenas fueron  $x_1$  corriente de soldadura ( $C_w$ ),  $x_2$  velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y  $x_3$  pulsos del arco ( $P_s$ ). Sus relaciones se describen en las ecuaciones 3.9 a 3.14 [17], delimitando la región experimental para valores de  $-\alpha$  y  $+\alpha$  [56] [80], como se observa en la tabla 3.6.

$$UTS = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.9)$$

$$Ys = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.10)$$

$$E\% = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.11)$$

$$ZAC = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.12)$$

$$Ng = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.13)$$

$$Gz = f(C_w, S_w, P_s) \quad (3.14)$$

Como se explicó en el punto 3.2.3, los extremos de la región experimental se encuentran en los puntos -1.682 y 1.682 correspondientes al valor de  $\alpha$  de las variables exógenas (tabla 3.6). Estos puntos resultaron de gran utilidad, toda vez que, amplió el espectro a un rango que arrojó respuestas muy significativas, como se demuestra en el siguiente capítulo.

**Tabla 3.6** Delimitación de la región experimental determinada por el DOE

Parámetros	Límites [17]		
	Id	-1.682 ( $-\alpha$ )	1.682 ( $+\alpha$ )
Corriente de Soldadura (A)	$C_w$	40	140
Velocidad de Avance (Plg/Min)	$S_w$	10	16
Pulsos (Hz)	$P_s$	1.5	18.4

Las superficies de respuesta se hicieron para cada uno de los parámetros dispuestos en ejes x - y, dejando fijo una de las tres variables, siendo la respuesta evaluada siempre en eje Z, obteniendo una imagen 3D. Así mismo, se graficaron los contornos de respuestas en 2D para evaluarlas por medio de coordenadas [61].

Es importante señalar, que en este punto se empleó una vista minable de las respuestas promedio en tabla simple de Minitab [81]. De cada respuesta se obtuvieron tres gráficas de superficie (3D) y tres gráficas de contorno, siendo las primeras correspondientes a ejes x - y de las superficies [57].

### **3.5.3 Redes neuronales**

Debido a que la soldadura tiene comportamiento no lineal, la respuesta de resistencia máxima a la tensión tenía un error  $>0.9$ , por lo que se tuvo que desarrollar una red neuronal [18], [33] que ofreciera una solución más adecuada que la superficie de respuesta, ya que esta última tiene un acotamiento muy severo en los datos evaluados [56].

Por ello, se utilizaron todos los datos generados durante el proceso de esta tesis, a fin de optimizar los parámetros de soldadura robotizada GTAW-P utilizando el modelo de red neuronal de retro propagación, guardando las mismas relaciones descritas en ecuaciones 3.9 a 3.14, así como las limitaciones paramétricas presentadas en la tabla 3.6 y teniendo en cuenta las restricciones de la tabla 3.7, consistentes en fusión completa de las chapas de acero inoxidable cuya resistencia máxima a la tensión, resistencia a la cedencia y elongación encuentran su optimización en maximización de 450MPa, 330MPa y 29.5% respectivamente con límite establecido con la caracterización inicial.

En ese mismo tenor se encuentra el tamaño de grano G ASTM objetivo optimización será maximizarlo para que, en consecuencia, sea inversamente proporcional el tamaño de grano en la ZAC minimizándolo de  $10\mu\text{m}$ .



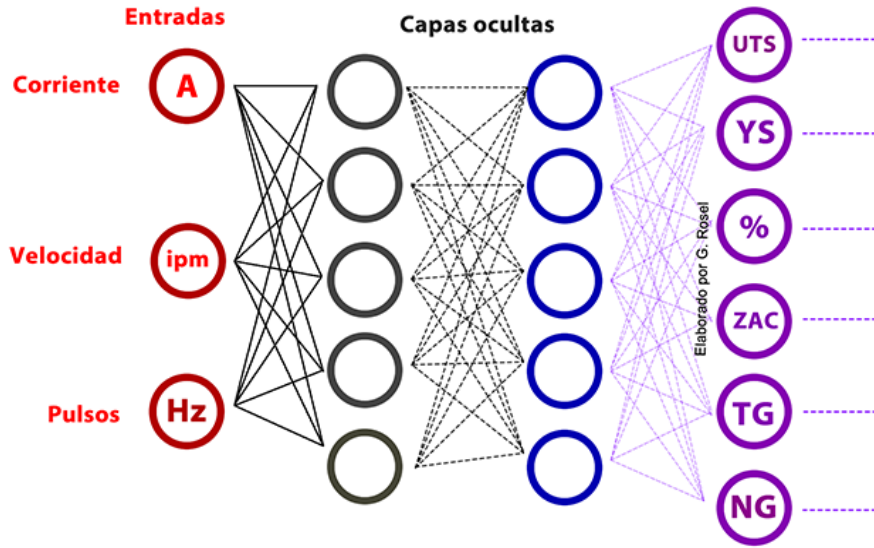
**Tabla 3.7** Objetivos de la optimización de respuestas para soldadura GTAW-P robotizada en acero inoxidable ferrítico 430.

Respuesta	Objetivo de optimización	
Fusión	$\geq 100\%$	
Resistencia máxima a la tensión (UTS)	$\geq 450MPa \leq 490MPa$	Maximizar
Resistencia a la cedencia (Ys)	$\geq 330MPa \leq 342MPa$	Maximizar
Elongación	$\geq 29.5\% \leq 32\%$	Maximizar
Desplazamiento	$\geq 8 \leq 9mm$	Maximizar
Ancho de ZAC	$\leq 1.5 mm$	Minimizar
Tamaño de grano en ZAC	$\leq 10 \mu m$	Minimizar
Número G ASTM	$\geq 10 \leq 14$	Maximizar

Se modeló una red neuronal con tres neuronas en la capa de entrada, dos capas ocultas de cinco neuronas cada una y seis salidas (figura 3.20), la cual fue desarrollada en R studio, ya que permite hacer scripts en Sql y conectar a servidores SQL y MySQL, así como leer archivos en CVS [82].

Una vez modelada las redes neuronales, se desarrollaron [82], [83] iniciando con la instalación, paquetes necesarios (neuralnet, caTools, h2o, ROCR, odbc, MASS, ggplot).

Después se hizo una preparación de datos para el aprendizaje y entrenamiento de la red neuronal, se segregaron y seleccionaron datos de la base de datos general SQL [84]. Estos datos se extrajeron entregándolos en forma de matrices con datos reales de experimentación [83].



**Figura 3.20** Modelo experimental de red neuronal para optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®

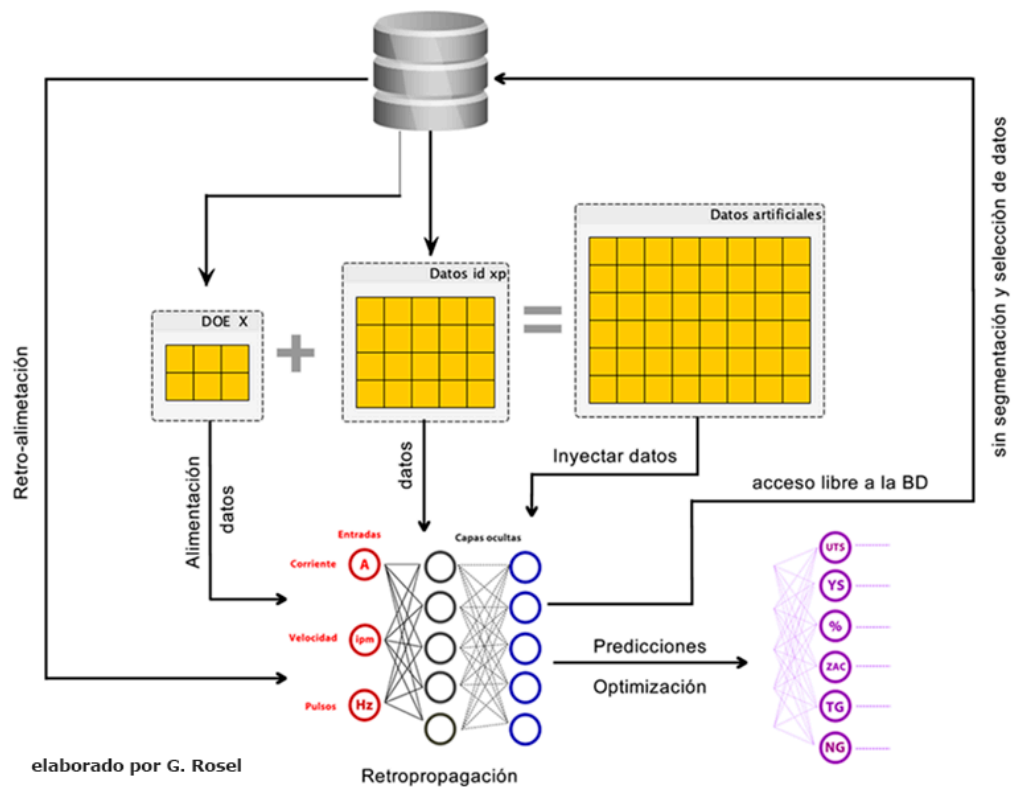
La primera matriz fue la vista minable o matriz experimental con la que se hicieron las superficies de respuesta, que corresponde a datos promedio de las corridas experimentales (de  $20 \times 9 = 180$  datos) [18]. La segunda matriz tenía los datos de todos los especímenes testeados, de los cuales se obtuvieron medias para la superficie ( $46 \times 9 = 414$  datos) incluyendo caracterización inicial, ambas se entregaron en formato CVS. Con esta matriz se definieron máximos y mínimos, es decir, con las restricciones de ambas se formaron los datos reales para el entrenamiento, que en teoría deben ser menor del 30% de los datos totales para aprendizaje automático [82].

La tercer matriz se generó mediante la suma de las dos anteriores, estos datos fueron analizados en superficie de respuesta para generar respuestas similares (no reales) e inducir datos artificiales de entrada y salida dentro del margen de restricciones establecido previamente, creciendo la matriz en tamaño y gama de respuestas, ampliando el aprendizaje de la red con 594 datos artificiales como se observa en la figura 3.21.

Una vez preparados los datos en archivos cvs, se hizo una conexión a la base de datos denominada **Data430.sql** mediante la librería odbc [82], [84] para sostener de forma cuantitativa la suficiencia de datos evaluados.

Mediante esta conexión se le dio libre acceso a la esta base a fin de que se alimentara con holgura entre 132,066 datos obtenidos durante toda la investigación. Una vez logrado esto, se normalizaron variables, se aplicó la fórmula del paquete y se definió el modelo de la red.

Finalmente, la red entregó predicciones y se llevó a cabo la suma del error cuadrático [18]. Obteniendo respuestas optimizadas para las combinaciones de parámetros, siendo congruentes con las gráficas de superficie de respuesta [61].



**Figura 3.21** Proceso de entrenamiento de la red neuronal para optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ©

### 3.5.4 Simulación de respuestas optimizadas

A fin de aportar valor agregado al presente estudio, se realizó simulación de propiedades mecánicas y una microestructura. Para ello, se dividió en dos este proceso, tal como se observa en la figura 3.22, mediante un diagrama de Venn. La simulación se gestó con la combinación de desarrollo de software orientado a objetos en C# [85], [86], base de datos en SQL server [84], PDI [65] y diseño gráfico con la interacción de programación orientada a la geometría.



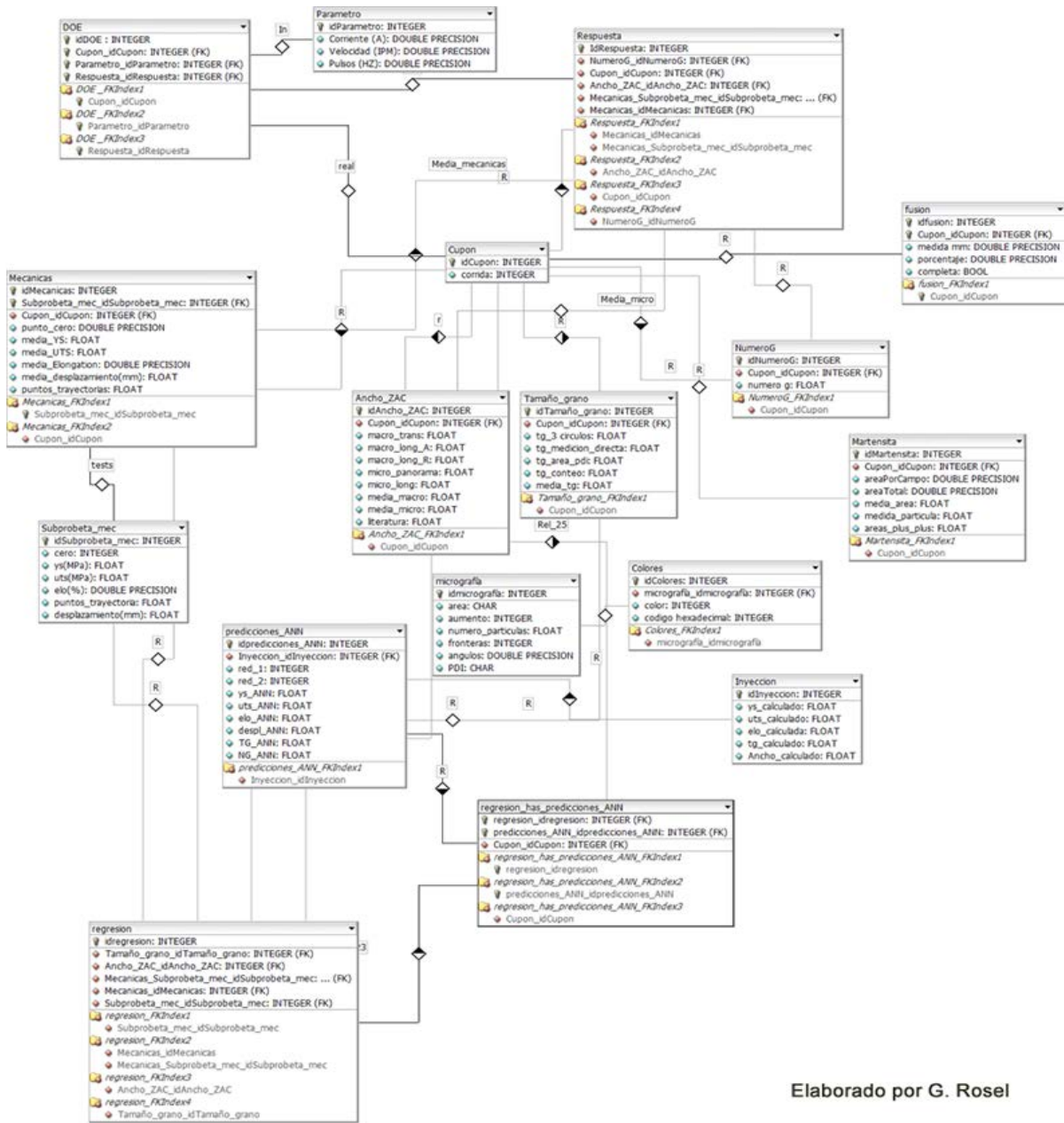
**Figura 3.22** Diagrama de Venn para el desarrollo de simulación del proyecto de optimización de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia.

#### 3.5.4.1 Desarrollo de software y base de datos

Se desarrolló una base de datos en Microsoft® SQL server® 2012 SP2 para gestionar y almacenar los datos generados en el proceso de experimentación y estudio de estado del arte, a fin de lograr una optimización sustentada en datos duros. La lógica para diseñarla fue de entidad - relación. Una vez determinado el diseño de

experimentos y teniendo claro las respuestas, se modeló la base de datos relacional de acuerdo a la figura 3.23. Se hicieron tablas individualizadas para cupones experimentales, los multicitados parámetros, respuestas, colores, datos de regresiones, datos artificiales de inyección y sus llaves foráneas se llamaron mediante query's a tablas de DOE, Metalografía y predicciones.

Como nota he de señalar que los nombres de clases del software desarrollado, así como contenido de tablas del modelo y base de datos SQL no contienen tildes ni caracteres especiales por motivos de programación.

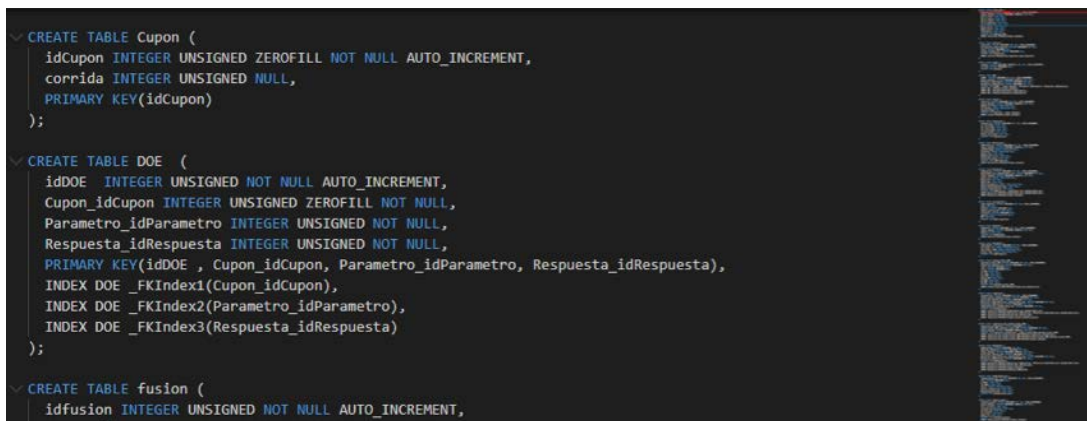


Elaborado por G. Rosel

Figura 3.23 Modelo para el desarrollo de la base de datos®. Elaboración propia ®

El lenguaje de programación utilizado fue SQL con modelado de objetos [84], toda vez que el software desarrollado sería en Visual Studio Community (Figura 3.24) y es compatible con versiones de servidores abiertos como Apache y con MySQL, así como la conexión con R studio mediante ODBC. Fue nombrada Data430.sql, su creación, desarrollo y alimentación se hizo a línea de código [84], toda vez que no se

creó interfaz de usuario para interactuar con ella de forma directa, por no ser objetivo del presente estudio.



```

CREATE TABLE Cupon (
  idCupon INTEGER UNSIGNED ZEROFILL NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  corrida INTEGER UNSIGNED NULL,
  PRIMARY KEY(idCupon)
);

CREATE TABLE DOE (
  idDOE INTEGER UNSIGNED NOT NULL AUTO_INCREMENT,
  Cupon_idCupon INTEGER UNSIGNED ZEROFILL NOT NULL,
  Parametro_idParametro INTEGER UNSIGNED NOT NULL,
  Respuesta_idRespuesta INTEGER UNSIGNED NOT NULL,
  PRIMARY KEY(idDOE , Cupon_idCupon, Parametro_idParametro, Respuesta_idRespuesta),
  INDEX DOE _FKIndex1(Cupon_idCupon),
  INDEX DOE _FKIndex2(Parametro_idParametro),
  INDEX DOE _FKIndex3(Respuesta_idRespuesta)
);

CREATE TABLE fusion (
  idFusion INTEGER UNSIGNED NOT NULL AUTO_INCREMENT,

```

**Figura 3.24** Captura de pantalla del desarrollo y creación de tablas relaciones de la base de datos®.

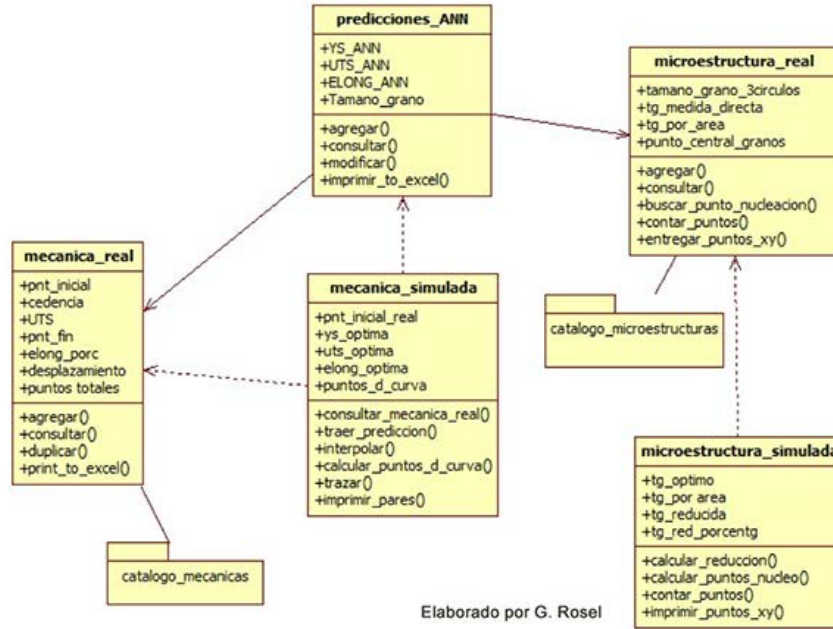
El software desarrollado fue orientado a objetos [84] en Visual Studio Community 2019 y se expresa su modelamiento en el diagrama en UML [87], (Figura 3.25) para facilitar la lectura de la presente tesis, que de por sí, es compleja y robusta. Este es multicapa con Visual studio, Windows applications y SQL Server, es decir, tiene capa de usuario, una más de procesamiento y otra de datos.

Este software fue denominado **Simu430®**, tiene una interfaz basada en objetos de escritorio que interactúa con la base de datos y su complejidad radica en las cuatro clases desarrolladas [85], [86], [87], mismas que se observan en la figura 3.25 En ella se describe que el software maneja los datos de las pruebas mecánicas obtenidos de la experimentación interactuando con las predicciones hechas por las redes neuronales para finalmente crear los puntos de las curvas S-e, así como la trayectoria simulada de la optimización de parámetros.

De la misma manera operan clases y objetos desarrollados para la microestructura, que toman datos reales de la experimentación el software los ancla a las predicciones de las redes neuronales, procesa y emite los puntos x-y para ser graficados para posterior simulación de microestructura optimizada.



Los ejes torales del software son las clases “mecanica simulada” y “microestructura\_simulada”, como se describe en las siguientes subsecciones.



**Figura 3.25** Desarrollo de cuatro clases® para software Simu430® que permite realizar simulación de curvas S-e y microestructura optimizadas. Elaboración propia ®

### 3.5.4.2 Simulación de propiedades mecánicas

El proceso de simulación de propiedades mecánicas se explica a **grosso modo** mediante la figura 3.26. Primero se recabaron los datos de experimentación, después se desarrolló el software que calcula los puntos predichos por las redes neuronales como óptimas, procesa, compila y entrega pares de datos para traza de trayectoria de curvas S-e.





**Figura 3.26** Resumen gráfico para la simulación de propiedades mecánicas curva S-e

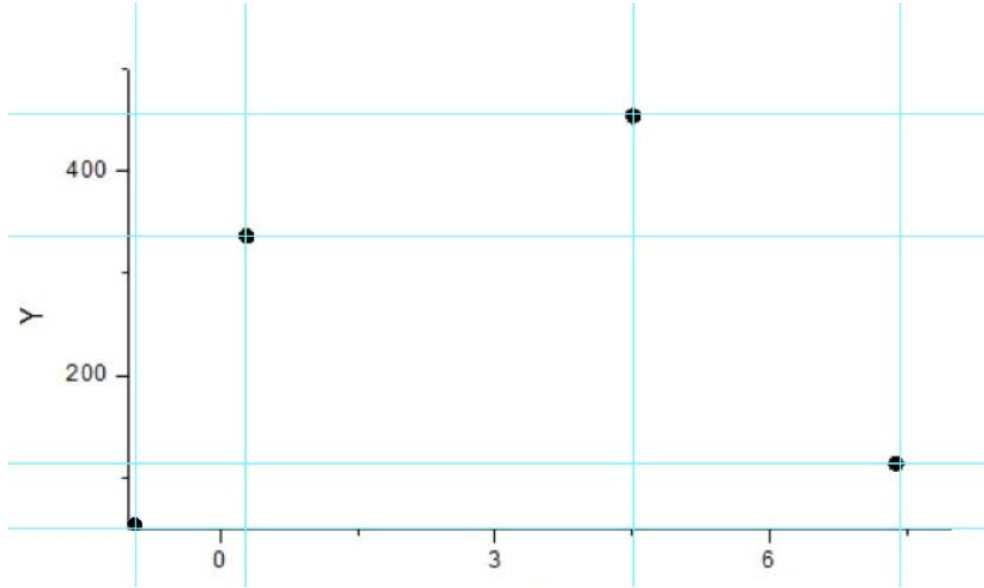
Se desarrolló un módulo de software en C# denominado Simu430® [85]. Su objetivo es generar coordenadas mediante puntos obtenidos por interpolación que introduce información artificial sustituyendo aquella que se desea simular, tomando datos reales de la base de datos y alcanzar los objetivos que se plantearon en la clase “predicciones\_ANN®”.

La clase “mecanica\_simulada” toma de la clase “predicciones\_ANN” cuatro puntos (figura 3.27) para obtener las respuestas optimizadas, estos puntos son:

1. Punto inicial,
2. Resistencia a la cedencia optimizada y predicha por las redes neuronales,
3. Resistencia máxima a la tensión optimizada y predicha por las redes neuronales,
4. Último punto de la curva que corresponde a la elongación antes de la fractura.

Calculando mediante función de interpolación los datos que se encuentran almacenados en la base SQL a fin de entregar (al término del cálculo) pares de datos en tablas donde eje X es la deformación, para eje y es el esfuerzo en MPa y con ello poder graficar en cualquier software las curvas S-e resultantes.

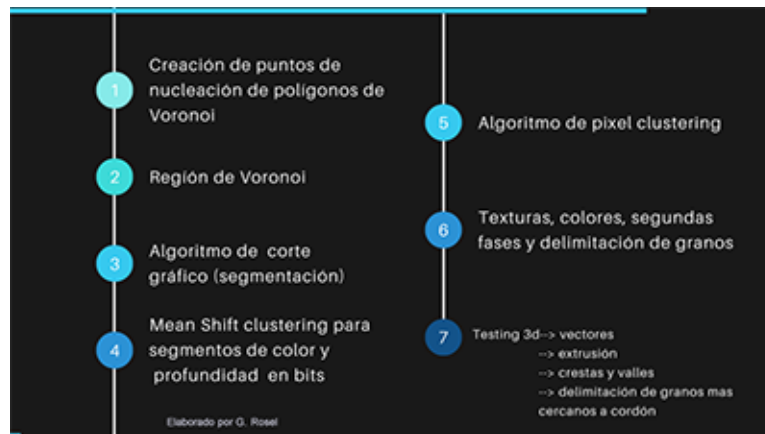
Una vez que el software los procesó y calculó, resultaron tres pares de datos en columnas correspondientes a eje X (deformación o desplazamiento), así en eje Y (resistencia) con los cuales fue posible construir la curva S-e simulada y optimizada en forma de gráfica. La validación de las respuestas se observa en una curva S-e en el capítulo 4.



**Figura 3.27** Cuatro puntos para generación de curvas esfuerzo-desplazamiento optimizadas, de acuerdo con software desarrollado en C#. Elaboración propia ®

### 3.5.4.3 Simulación de microestructura

El procedimiento para hacer simulación de microestructura, fue una mezcla de distintas técnicas, algoritmos ya desarrollados y empleados en procesamiento digital de imágenes [65], [88] este desarrollo experimental de la microestructura optimizada ferrítica se resume en la figura 3.28. A **grosso modo**, se trata de la creación de puntos para el desarrollo de una región de Voronoi [20], [89] con la cual se simularon polígonos que, tratados con PDI lograron simular una optimización de parámetros de soldadura por fusión robotizada GTAW-P en acero inoxidable ferrítico 430.



**Figura 3.28** Síntesis de pasos para la simulación de microestructura optimizada de granos en la ZAC.

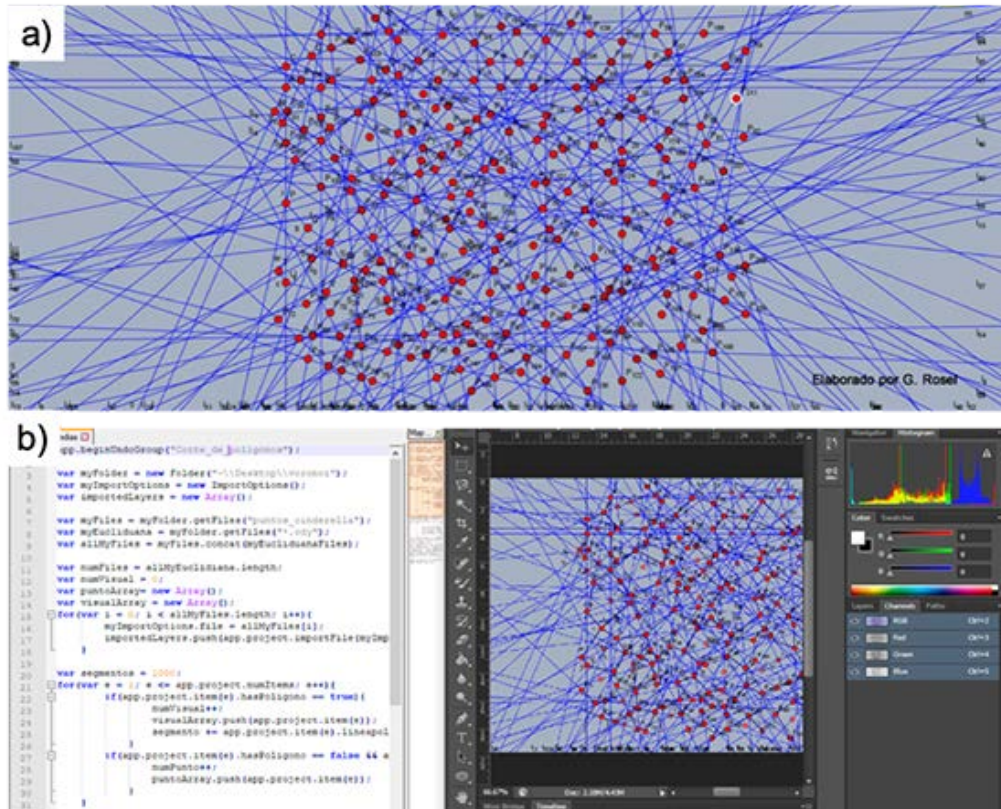
El espacio en  $\mu\text{m}$  y puntos de nucleación de polígonos para la simulación de microestructura está basada en el trabajo de Montayo [20] y un fragmento de su código fuente, que permite determinar un área en  $\mu\text{m}$ , así como una serie de puntos que sirven para generar polígonos. Con base en lo planteado por Montayo y su módulo denominado “Microestructura1” [20, pp. 82,83], se modificó la lógica de creación de puntos y se desarrolló la clase correspondiente a “simulacion\_microestructura”, ésta interactúa con “microestructura\_simulada” y la base de datos Data430.sql® [84] para poder generar puntos y calcular coordenadas de puntos de nucleación para polígonos de Voronoi [89].

Esto significa que el módulo del software calcula una reducción de áreas correspondientes a los granos ferríticos reducidos, entregando número y localización de puntos para ser procesados mediante polígonos de Voronoi [20], [89]. El software desarrollado **Simu430®** entregó puntos en un espacio simulado de  $61,870.39 \mu\text{m}^2$  ( $312.7927 \times 198.8 \mu\text{m}$ ). Estos puntos pueden ser inicio de nucleación de polígonos de Voronoi que emularon los granos ferríticos [20] de la ZAC en soldadura con parámetros optimizados.

En la simulación de la microestructura se usó en aplicación de programación entorno a la geometría [89]. Después, se tuvieron los puntos en el espacio que se

procesaron en el software libre Cinderella para simulación de geometría euclidiana (figura 3.29a) obteniendo una región de Voronoi [89]. Posteriormente, la imagen fue procesada con algoritmo de corte gráfico o segmentación [65], [70], [90], [91] para identificar los polígonos obtenidos que emulan una estructura de ferrita gruesa [20].

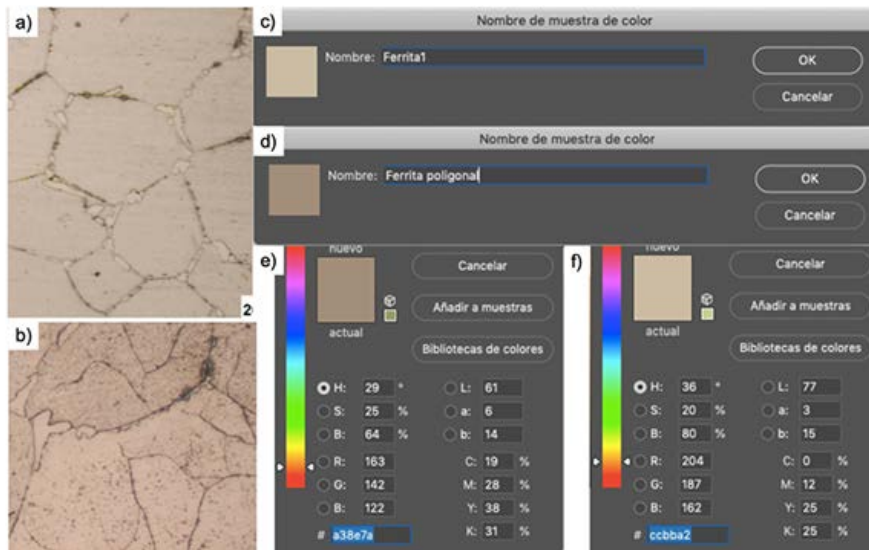
Para las tareas complejas de algoritmos mean shift clustering, algoritmos de pixel intensity clustering, integración de texturas y segundas fases, se generaron los archivos de código fuente en JavaScript (JS) (figura 3.29b), correspondientes a cada tarea y se migraron a una extensión para Photoshop 20.0 denominada Adobe ExtendedScript Toolkit (ESTK) CC, ambos, para macOS, que permite inspeccionar todos los datos del código en ejecución, acceso rápido a la consola y sesión de depuración.



**Figura 3.29** a) Puntos de nucleación para creación de una región de Voronoi para simulación de microestructura y b) Desarrollo de código en JS para segmentación PDI.

Cada color y profundidad [70] de los granos fue asignado a aquéllos que estuviesen más cerca del cordón, se identificaron con número único en la base de datos Data430.sql. Después, la técnica de Mean Shift clustering [92], [93] fue aplicada para los segmentos de límites de grano. Posteriormente, la imagen se procesó digitalmente vectorizando la región de Voronoi, simulando los límites de grano, se integraron texturas, colores, segundas fases y estilizando las fronteras de grano [94], [95].

Se hizo una paleta de 135 colores con Photoshop® 20.0 64x para macOS, con el uso de este software se extrajo de las micrografías reales [73] (figuras 3.29a) y 3.29b)) el color correspondiente a granos gruesos de ferrita y otras fases presentes en la ZAC (figuras 3.29c) y 3.29d)). Estos datos se almacenaron en una biblioteca de este software y se extrajeron los datos correspondientes al código hexadecimal de cada color (figuras 3.29e) y 3.29f)), a fin de obtener similitud en la vista final y se guardaron en la base de datos Data430.sql. La imagen final, se analizó mediante PDI a fin de ver si los vectores en eje X podrían ser traspolados a imagen tridimensional [90] y simular granos ferríticos gruesos con segundas fases cercanos al cordón de soldadura. Los resultados se evalúan en el capítulo 4.



**Figura 3.30** Extracción de colores para simulación de microestructura: a) micrografía TIG8 matriz de granos gruesos, b) micrografía TIG10 coloración de segundas fases, c) color para granos gruesos, d) gama para ferrita poligonal e) y f) identificación del código hexadecimal

# 4

## Análisis de resultados y discusión

---

### 4.1 Proceso de soldadura GTAW-P robotizada

**E**l análisis de resultados de las veinte corridas experimentales de soldadura robotizada GTAW-P, sobre láminas de acero inoxidable ferrítico AISI 430, de 1.5 mm de espesor, sin metal de aporte (o fusión) se describe en las siguientes secciones.

#### 4.1.1 Diseño de experimentos

Una vez realizada la caracterización de cada corrida, se generaron los resultados promedio y se colocaron como respuesta evaluada (tabla 4.1), donde se observan como salidas del sistema, cabe señalar que esta tabla es la vista minable a la que se aplicó la primer metodología de superficie de respuesta [34], [56], [57], [61] y con la que se inició el modelado de la redes neuronales artificiales. Esto nos permitió obtener una región experimental proba [57]. Debiendo señalarse que la respuesta ancho ZAC es la respuesta promedio de las micrografías transversales panorámicas a 50x.

**Tabla 4.1** Resultados promedio de las salidas del sistema para cada corrida experimental

Unión	Resistencia máxima a la tensión (Mpa)	Resistencia a la cedencia (Mpa)	Elongación (%)	Ancho de ZAC (mm)	Número G ASTM	Tamaño de grano (µm)
TIG1	416.13	310	13.08	2.18	10.1	10.84
TIG2	420.25	302	27.51	1.08	6.4	39.22
TIG3	294.81	276	1.18	2.26	10.7	8.68
TIG4	424.27	335	26.73	1.14	9.5	13.3
TIG5	435.75	310	26.46	1.16	9.9	11.62
TIG6	434.36	295	25.8	1	9.2	14.86
TIG7	288.52	163	1.93	1.57	9.6	12.88
TIG8	457.18	333	31.1	0.99	10.1	10.84
TIG9	375.26	290	3.17	2.06	11.6	6.46
TIG10	452.02	330.5	28.11	1.16	11.2	7.42
TIG11	415.93	318.5	18.33	1.44	11.2	7.42
TIG12	299.75	0	1.09	1	8.1	21.78
TIG13	444.11	320	32.11	2.6	10.7	8.68
TIG14	439.74	309.5	29.63	1.49	9.4	13.82
TIG15	339.8	154.5	7.02	1.91	8.9	16.5
TIG16	411.23	36.5	18.12	1.22	10.4	9.76
TIG17	295.24	141.5	2.08	2.26	9.9	15.38
TIG18	395.83	281.5	27.09	1.98	9.1	15.38
TIG19	381.64	271.5	18.48	2.68	9.9	11.62
TIG20	201.12	120.5	0.79	1.82	9.6	12.88

### 4.1.2 Calor de entrada

Evaluar el calor entrada fue factor clave en esta investigación, toda vez que arrojó información de suma importancia, que no se había contemplado en el estudio [41]. Tal es el caso de la relación del “*arc length*” y la pieza de trabajo con respecto a la cinética de movimiento del robot, dicho de otro modo, el espacio calculado al trazar las trayectorias de robot no fue la esperada debido al sistema de coordenadas que tiene el software embebido y calcula su propia trayectoria más cercana a los puntos



programados y/o bien no se logró programar adecuadamente el *arc length*, perdiendo la linealidad en el arco como se esperaba [48]. El voltaje proyectado o teórico [5], [23] [17], [8], fue de 12 V, con un espacio de 2mm entre la pieza de trabajo y el electrodo (como fue descrito en el capítulo anterior) resultando un voltaje promedio de 11.98 V y un espacio de trabajo promedio de 1.99 mm (Tabla 4.2), coincidente con la literatura [5], [59].

**Tabla 4.2** Variables de entrada para las 20 corridas experimentales, su respectivo calor de entrada y la distancia real del arco eléctrico entre la pieza y el electrodo del robot.

Unión	Corriente (A)	Velocidad (plg/min)	Voltaje (V)	Distancia real de trabajo (mm)	$Q_{net}$ (kJ/mm)
TIG 1	60	11	12.5	2.08	0.136
TIG 2	120	11	12.8	2.13	0.28
TIG 3	60	15	11.7	1.95	0.093
TIG 4	120	15	11	1.83	0.176
TIG 5	60	11	11.3	1.83	0.123
TIG 6	120	11	10.8	1.8	0.236
TIG 7	60	15	10.4	1.73	0.083
TIG 8	120	15	10.5	1.75	0.168
TIG 9	40	13	13.3	2.21	0.082
TIG 10	140	13	11.2	1.86	0.242
TIG 11	90	10	11.9	1.98	0.215
TIG 12	90	16	10.8	1.8	0.121
TIG 13	90	13	11.4	1.9	0.158
TIG 14	90	13	11.4	1.9	0.158
TIG 15	90	13	11.1	1.85	0.154
TIG 16	90	13	22.3	3.71	0.309
TIG 17	90	13	10.8	1.8	0.15
TIG 18	90	13	12.1	2.01	0.168
TIG 19	90	13	11.6	1.93	0.161
TIG 20	90	13	10.8	1.8	0.15

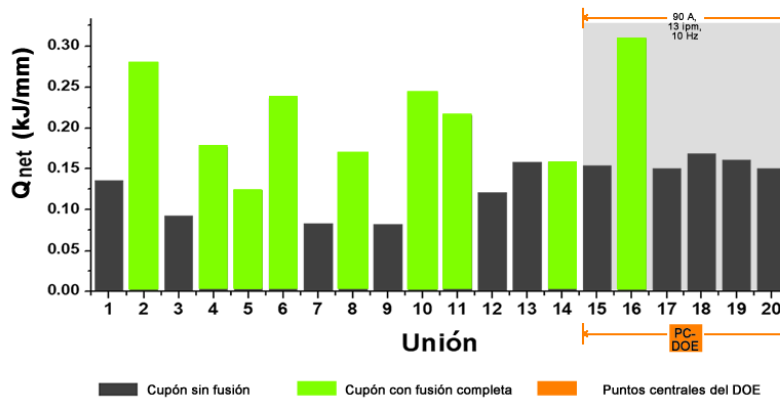
A ***grosso modo*** estos datos no tendrían significado tal como lo refiere [41] pero haciendo un análisis más prolijo, se logró determinar que, la cinética del robot al soldar tiene un impacto directo en el voltaje (figura 4.1) y que tal variación milimétrica es importante (tabla 4.2).

Este dato que se obtuvo mediante proporcionalidad directa y se segmenta en tres rangos para efectos de análisis de resultados:

<b>Bajo</b>	<b>(<math>\leq 0.125</math> kJ/mm)</b>
<b>Medio</b>	<b>(0.126 – 0.225 kJ/mm)</b>
<b>Alto</b>	<b>(<math>\geq 0.226</math>)</b>

Como se puede observar en la figura 4.1 el calor de entrada (que se identifica con línea cromática) las probetas TIG15, TIG16, TIG17, TIG18, TIG19 y TIG20 corresponden a los puntos centrales del diseño experimental siendo los parámetros de 90 A de corriente de soldadura con velocidad de 13 plg/min y pulsos de 10 Hz.

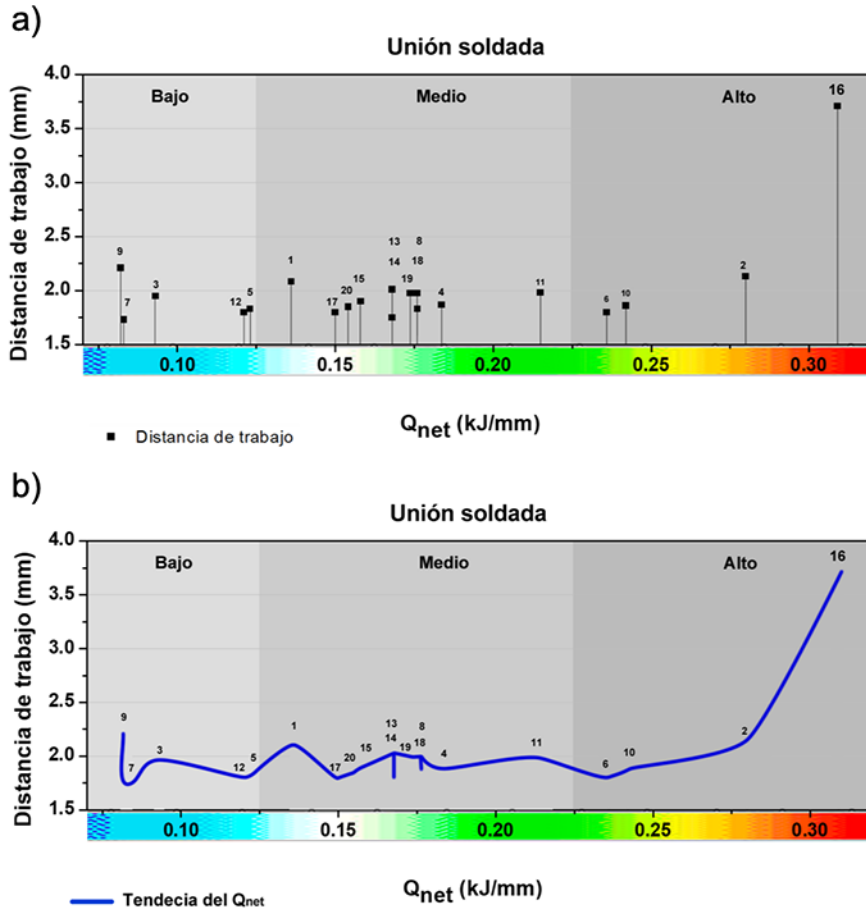
Sobre este bloque de corridas, es importante descabezar la información; tuvo seis repeticiones por ser los parámetros exactos de interés en el estudio. Como se puede observar en la figura 4.1, cinco de esas probetas (TIG15, TIG17, TIG18, TIG19 y TIG20) tuvieron un calor de entrada medio (0.126 – 0.225 kJ/mm) con espacios entre el electrodo y la pieza espacio entre el acero de 1.8 a 2 mm y no lograron fusión completa, mientras que la probeta TIG 16 tuvo una distancia de trabajo de 3.71mm aumentando el voltaje del arco a 22.3 (figura 4.2a), en consecuencia el calor de entrada de esta corrida fue el más alto (0.309kJ/mm) logrando ser la única de este bloque que logró fusión completa [8].



**Figura 4.1** Calor de entrada para cada corrida experimental de soldadura robotizada GTAW-P. Elaboración propia ®

Esto significa que la distancia del arco (y por lo tanto el voltaje) tiene gran influencia en la soldadura GTAW-P por fusión de las láminas de acero inoxidable ferrítico de 1.5 mm de espesor, toda vez que al aumentar la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo aumenta el calor de entrada de manera significativa y viceversa, tendencia que puede observarse en la figura 4.2b. El calor de entrada de rango bajo ( $\leq 0.125$  kJ/mm) es propenso a la falta fusión del acero, el calor de entrada  $\geq 0.126$  y  $\leq 0.167$  kJ/mm puede considerarse como medio-bajo y tener las mismas consecuencias que el  $Q_{net}$  bajo (como se analizará más adelante).

El calor de entrada superior a 0.168 kJ/mm y menor a 0.225 kJ/mm, (que se encuentra en el rango medio) sugiere ser el óptimo para la soldadura en acero inoxidable ferrítico ya que cuando es superior a los 0.226 kJ/mm hay inestabilidad en el comportamiento de la unión ya que puede presentarse deformación en la lámina, modificando la microestructura y haciendo propenso al material al aumento del porcentaje de martensita intergranular, como se demostró en las siguientes secciones [5], [23].

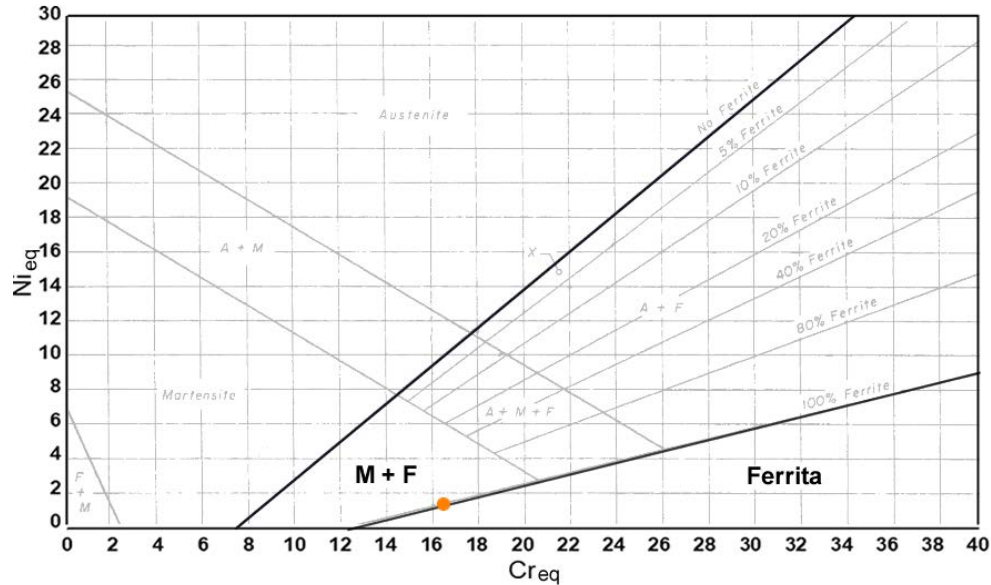


**Figura 4.2** a) Relación del calor de entrada con la distancia real de trabajo entre la pieza y electrodo en cada corrida experimental y b) Tendencia del calor de entrada.

## 4.2 Análisis macro y microestructural

### 4.2.1 Análisis químico por emisión óptica

El resultado del Cr y Ni equivalentes sobre el diagrama de Schaeffler, determinó que las microestructuras que se formarían posterior al proceso de soldadura serían ferrita y martensita (figura 4.3), hecho que se confirmó en el análisis microestructural [37].



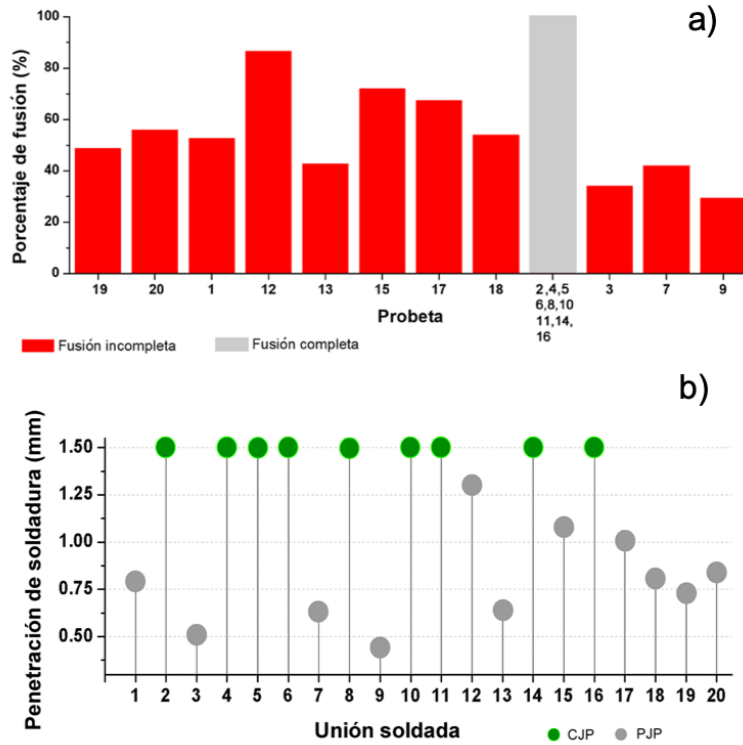
**Figura 4.3** Microestructuras predichas de acuerdo al diagrama de Schaeffler, tomado y modificado de [37, p. 5].

## 4.2.2 Análisis macroestructural

### 4.2.2.1 Fusión de cupones y penetración de la soldadura

Las muestras fueron evaluadas con inspección visual, donde se observó si existió fusión completa del material. La AWS [11] denomina a la fusión completa del material como CJP por sus siglas en inglés (*Complete Joint Penetration*) y la falta de fusión como PJP (*partial joint penetration*).

El 55% de los cupones de soldadura presentaron falta de fusión (Figura 4.4a). El resto mostró una soldadura completa (figura 4.4b), con pequeñas y estilizadas coronas, así como área de cordón similar la obtenida con metal de aporte [8]. La corriente y velocidad de soldadura y pulsos en valores altos del DOE fueron los parámetros que influyeron en que la fusión se completara.



**Figura 4.4** Evaluación de la fusión del metal y la penetración de la soldadura. a) Porcentaje de fusión de las uniones soldadas GTAW-P robotizadas y b) Evaluación de los cupones de soldadura con base en penetración de soldadura.

La Figura 4.5 muestra la sección transversal de las uniones soldadas de acero inoxidable donde la calidad y el impacto de la selección de los parámetros de soldadura pueden analizarse macroscópicamente.

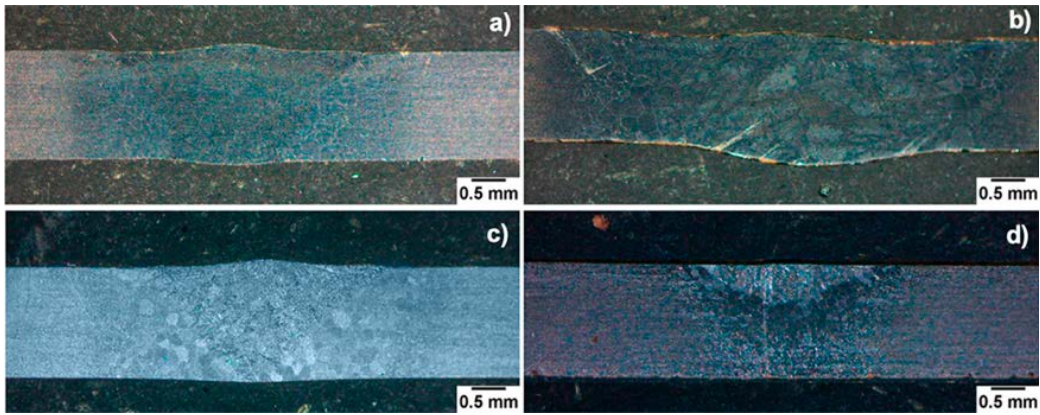
Se observa claramente que la macroestructura de las uniones soldadas estaba formada por metal fundido en el centro que contenía varios granos gruesos (Figura 4.5b) y que estaba rodeada por granos agrandados que mostraban un notable aumento térmico que daba como resultado la ZAC con diferentes valores de ancho y tamaño de granos en dicha zona. Dependiendo de la combinación de parámetros de soldadura en estudio como se puede ver en la Figura. 4.5c.

El mejor resultado se obtuvo de la muestra identificada como TIG8, que mostró una fusión completa, así como una penetración, 114  $\mu\text{m}$  de altura de la corona, 74  $\mu\text{m}$  de altura del respaldo y ausencia de defectos (Figura 4.5a) que se asoció a la combinación de parámetros antes mencionada que resultó en el  $Q_{\text{net}}$  medio (0.168 kJ / mm), como fue descrito con antelación. Por otra parte, otros investigadores [96] reportaron en sus estudios que la corriente pulsada mayor de 10 Hz podría disipar el calor y por lo tanto, mejorar las propiedades mecánicas de las juntas debido al cambio en el tamaño del grano.

La unión TIG10 exhibe una fusión completa, sin embargo, su calidad se redujo debido a la junta de distorsión en lámina, la corona tuvo altura de 73  $\mu\text{m}$  y el respaldo de 276  $\mu\text{m}$  debido al exceso de calor medido como  $Q_{\text{net}} = 0.242$  kJ / mm el valor más alto, lo que denota que el calor generado fue mayor provocando que la soldadura se acumulara hacia el respaldo.

También se generó un defecto de deformación térmica en la geometría del metal fundido, de acuerdo con Guzmán et al [62] donde atribuyeron este comportamiento de distorsión al tejido lineal de la antorcha, causado por concentración de calor que terminó en daño térmico, ver Figura 4.5b).

La Figura 4.5c) ilustra la condición TIG14 (90 A, 18.4 Hz y 330 13 plg/min) con fusión completa, libre de defectos, geometría estilizada del cordón cuya corona de 123  $\mu\text{m}$  y respaldo de 44  $\mu\text{m}$ , lo que resulta en una calidad adecuada. Finalmente, la soldadura TIG3 (Figura 4.5d) es un claro ejemplo de una mala combinación de parámetros, ya que la fusión del metal fue incompleta equivalente a una penetración parcial de la junta del 30% de espesor, según lo informado por Amuda et al [5], [23] para soldaduras convencionales.



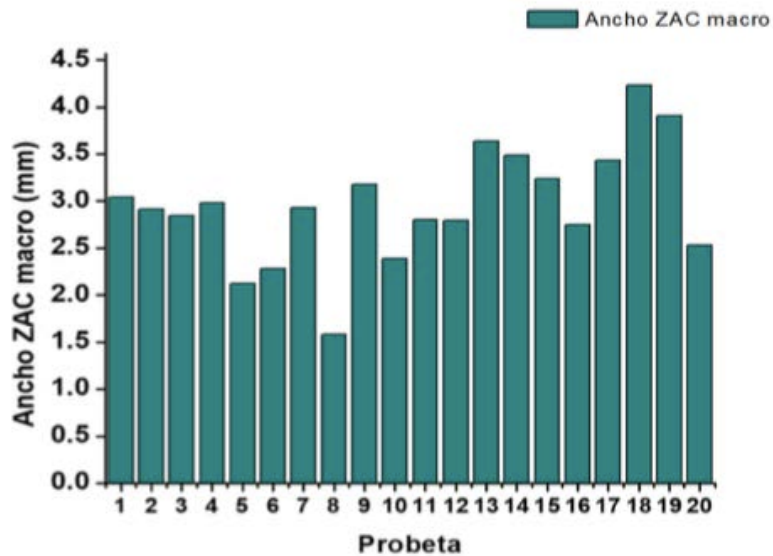
**Figura 4.5** Macrografías obtenidas a través de la estereoscopía a 16x de la sección transversal de las uniones soldadas robotizadas GTAW-P: a) TIG8 que muestra una penetración completa, b) TIG10 con distorsión térmica, c) TIG14 sin defectos y d) TIG3 con mínima penetración de la soldadura.

#### ***4.2.2.2 Ancho de ZAC desde la macroestructura***

La zona afectada térmicamente en la medición macro se realizó sobre las muestras transversales y longitudinales a fin de evaluar esta respuesta mediante superficie, recabar mayor cantidad de datos y establecer la diferencia que existe entre mediciones macro y microestructurales transversales.

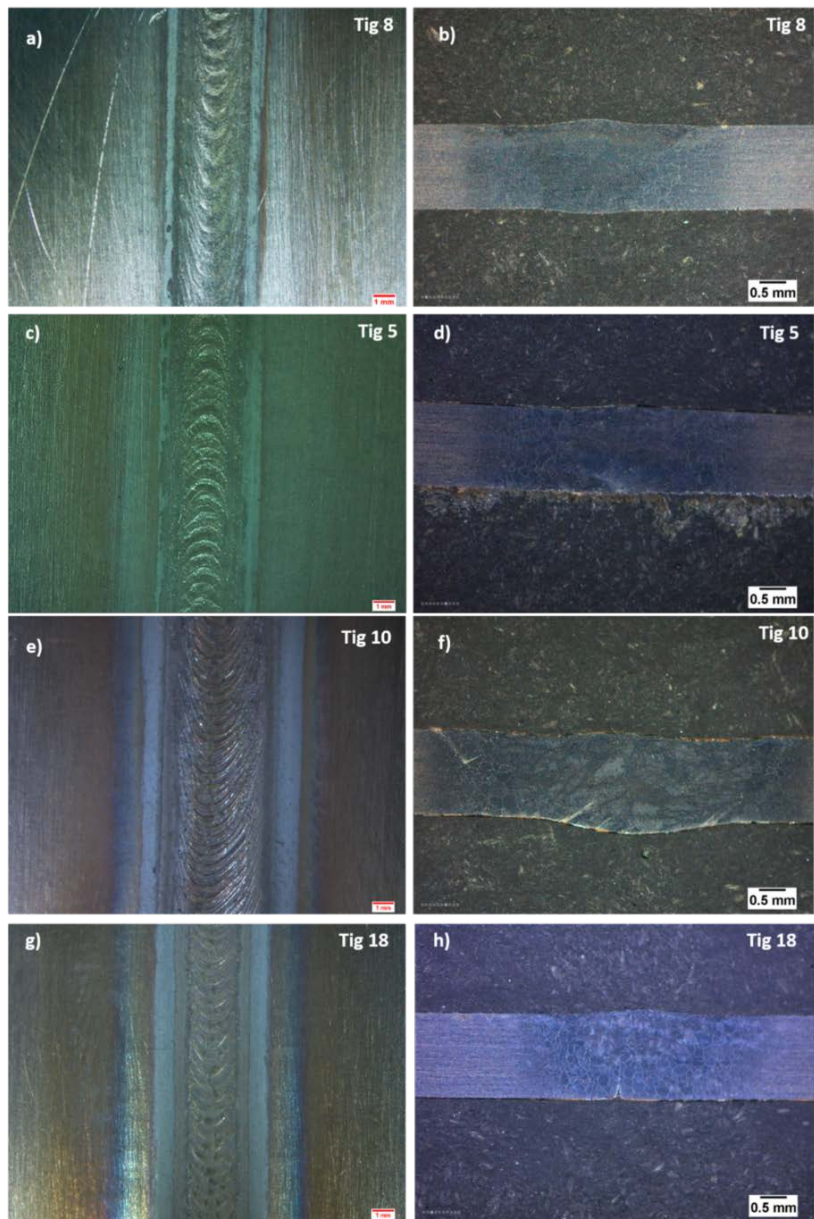
Los datos del ancho de ZAC obtenidos de la macroestructura se observan en la figura 4.6, que son mayores a los medidos en la microestructura. Estos se analizaron mediante superficie de respuesta, a fin de determinar, con qué combinación se logra reducir el tamaño de dicha zona.





**Figura 4.6** Ancho promedio de ZAC en mm de las mediciones hechas a la macroestructura

En la figura 4.7 se muestran los cupones 8 y 5 que tuvieron un menor ancho de ZAC promedio de 1.5 mm y 2.1 mm. En la figura 4.7 se muestran los cupones 10 y 20, que mostraron un ancho de ZAC promedio de 2.3 mm y 4.2 mm respectivamente. El cupón TIG 20, se toma como referencia, ya que es que mostró la mayor dimensión de 4.23 mm. Esta recolección de datos permitió robustecer la base de datos general hecha como eje medular de esta investigación. También permitió evaluar la diferencia entre las mediciones macro y microestructurales.

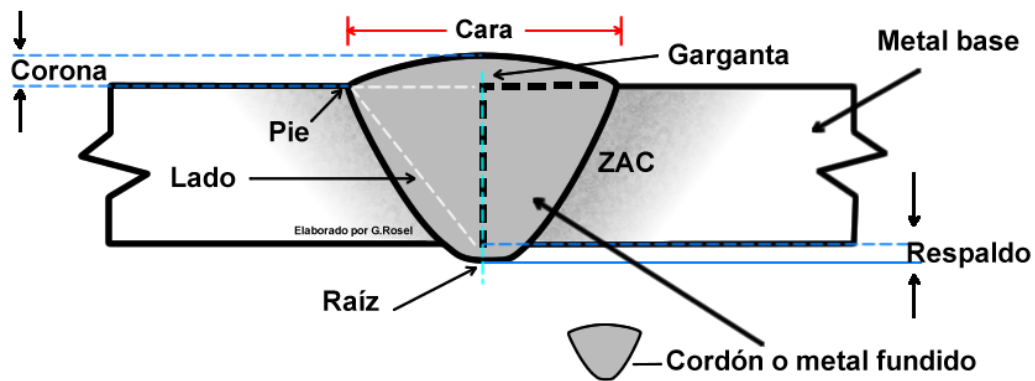


**Figura 4.7** Análisis macroscópico de los cupones de soldadura longitudinales a 6.5x y transversales a 16 x a) Condición TIG 8 imagen longitudinal a 6.5 x b) Condición TIG 8 imagen transversal a 16 x, donde se observa fusión completa

## 4.2.3 Análisis microestructural

### 4.2.3.1 Panorámicas de micrografías transversales

Las fotomicrografías panorámicas fueron de gran utilidad, ya que permitieron ver la evolución microestructural y cambios de fase en de cada condición, así mismo permitió analizar toda la anatomía del corte transversal con respecto a la unión soldada idealizada (figura 4.8).

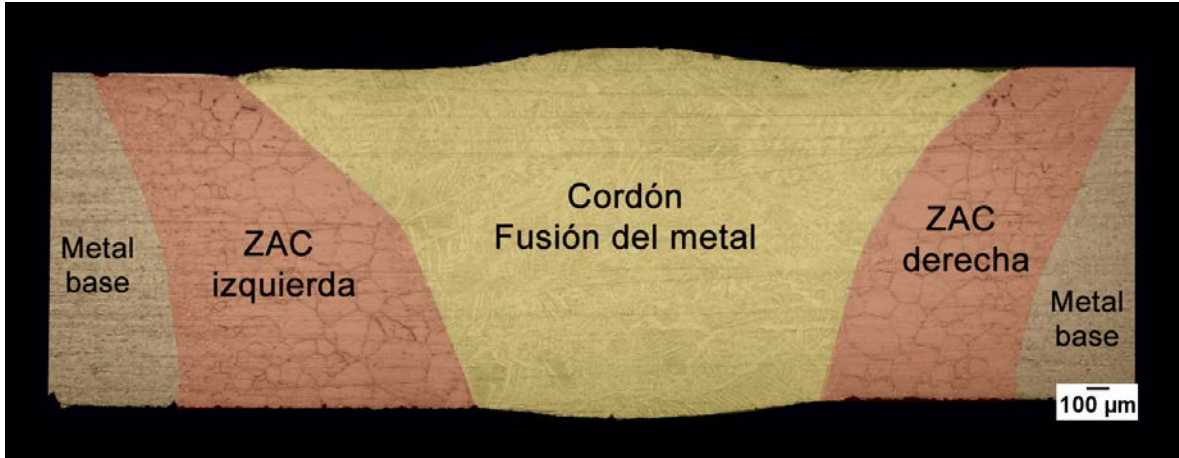


**Figura 4.8** Partes de la unión soldada, ilustradas de forma idealizada. Elaboración propia ®

Las panorámicas de las uniones soldadas [64], [65], mostraron de manera general, como la matriz ferrítica mostró cambios de fases con ferrita poligonal y ferrita alotriomórfica, seguida de una aumento en el tamaño de grano en la ZAC, continuando con las segundas fases claramente identificables del cordón de soldadura, repitiendo el ciclo hacia el lado contrario. Esta técnica de análisis digital, resultó ser muy adecuada para el análisis estructural, ya permitió ver manera clara las fases y zonas identificándose claramente, así como evidenciar los defectos (figura 4.9).

Esta técnica resulta de gran relevancia, toda vez que, al hacer mediciones integradas en una sola imagen de formato amplio, resultan más exactas que aquellas obtenidas de macrografías, por lo tanto, los datos obtenidos de las

micrografías panorámicas además de mostrar una imagen de la probeta transversal con mayor detalle gráfico, aportan mayor precisión en las mediciones del ancho de ZAC, que representa una mejora en exactitud de datos aproximadamente del 10% mayor, con respecto a las macroscopías obtenidas por estereoscopia.



**Figura 4.9** Panorámica con las zonas de análisis identificadas. Elaboración propia ©

### ***Fusión ideal***

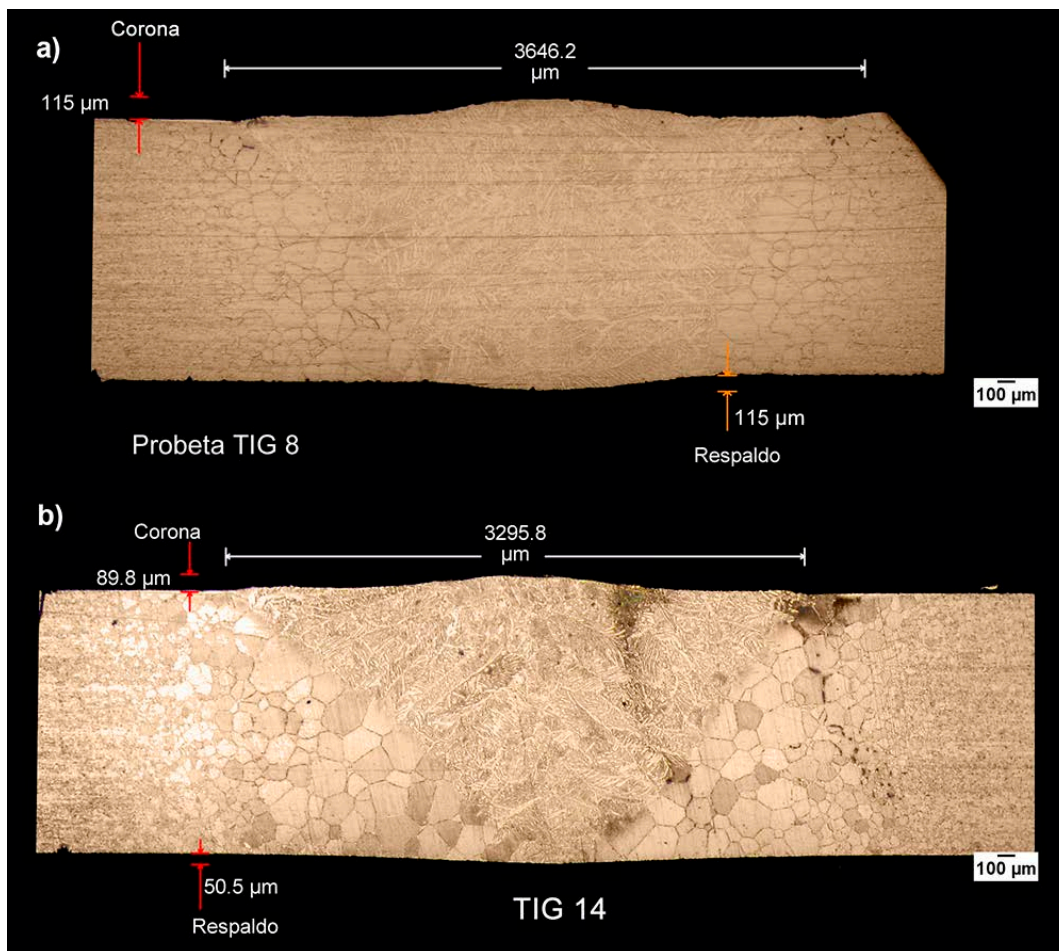
Las muestras TIG8 (figura 4.10 a) y TIG14 (figura 4.10 b) muestran una transición microestructural esperada en este acero, así como una geometría adecuada y fusión completa [2], [8].

La unión TIG 8 (figura 4.10 a), en vista panorámica muestra una extensión de 3646.2μm, geometría similar a la ideal con corona y respaldo de la misma medida 115μm, el cordón formado por la fusión de las chapas parece simular bisel de 45°, adicionalmente se muestran granos columnares dirigidos a la garganta, con diversas fases, que se describirán de manera más prolija en la evolución estructural.

La ZAC muestra granos gruesos de ferrita, que van decreciendo e intercalándose con granos más finos de ferrita y ferrita poligonal, cuyo tamaño se van empequeñeciendo hasta llegar a la matriz de ferrita del metal base.

Así mismo, se observa que durante el proceso de recristalización los granos tomaron la dirección de la garganta orientándose a la cara, lo que sugiere un buen enfriamiento.

Estas características microestructurales son concordantes con las pruebas mecánicas de tensión y con microdureza, resultado ser la mejor combinación de parámetros la empleada en esta corrida, toda vez que la geometría del cordón [17], los pies, la corona y el respaldo son simétricos a la garganta.



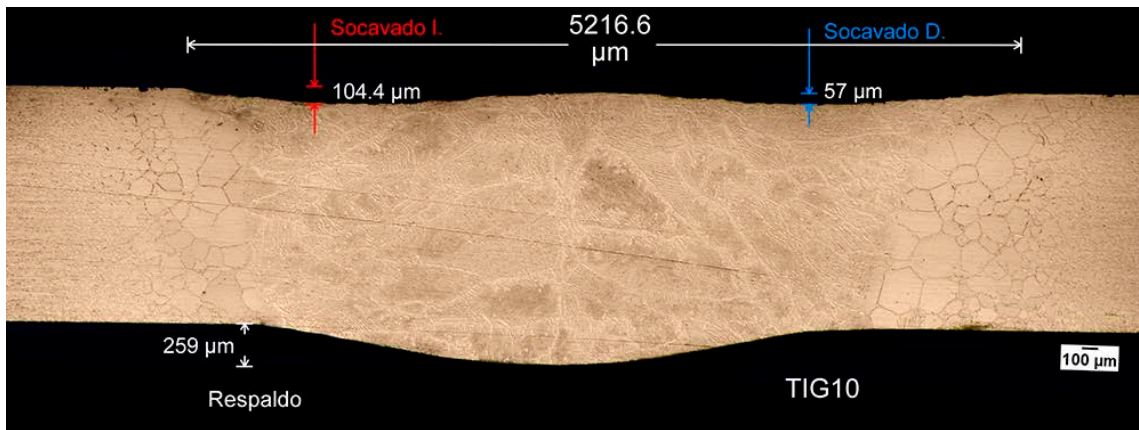
**Figura 4.10** a) Micrografía panorámica transversal de la unión TIG 8 con fusión completa corona y respaldo de 115µm b) Micrografía panorámica transversal de la unión TIG 14 que muestra una adecuada fusión.



### ***Fusión completa con distorsión***

La probeta TIG10 (figura 4.11) muestra de igual forma falta de fusión en el metal de soldadura y un defecto de geometría similar, se diferencia del anterior por la estructura y distancia de los pies, así mismo existe una asimetría en la fundición del metal, siendo de lado izquierdo más grueso y menor la ZAC, mientras que, de lado derecho mayor estreches, la ZAC más amplia y el tamaño de sus granos son más gruesos con relación a su contraparte. Es notable también que hubo fallo en la programación de la trayectoria debido a que la raíz de la soldadura se encuentra lateralizada hacia el lado izquierdo de la garganta, mostrando que el pie de ese mismo lado hace una curva indicando que el ángulo de la antorcha se modificó por la cinética de movimiento de robot. Que se confirma con la línea recta que hace el metal fundido desde el pie derecho hasta la raíz.

La condición TIG10 mostró una transición interesante ya que la cara del cordón y los pies tuvieron una depresión importante, mostrando socavado en ambos lados, causando deformación en la lámina soldada, así mismo el metal fundido tiene una geometría gruesa tendiente a la recristalización en el fondo de la raíz, creando un respaldo de 259  $\mu\text{m}$  (figura 4.11) debido al alto calor de entrada. El cordón muestra granos columnares [23] dirigidos al centro de la unión y la ZAC se muestra de menor ancho en ángulo más agudo a diferencia de las demás que se expresan más obtusos, así como una transición de granos gruesos a finos es un espacio más reducido.

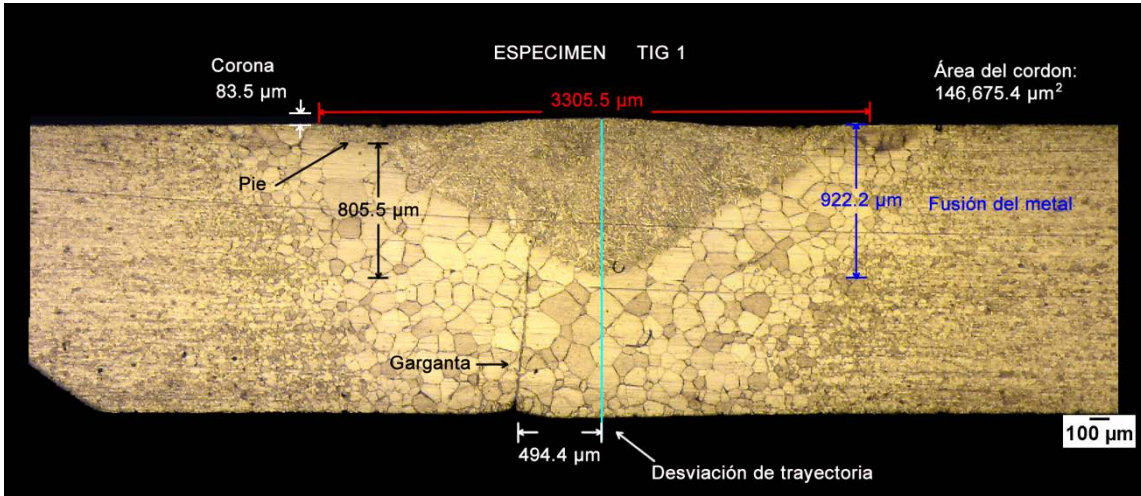


**Figura 4.11** Micrografía panorámica transversal a 50x de la unión TIG 10, con socavado.

### ***Falta de fusión***

Las panorámicas que resultaron de mayor importancia fueron las muestras TIG1 y TIG20 (figura 4.12) para los casos de falta de fusión.

La muestra TIG1 (figura 4. 12), mostró como la programación de las trayectorias no fue del todo adecuada y por lo tanto, la fundición del metal de soldadura se dio de forma lateralizada, teniendo la raíz del cordón 494.4  $\mu\text{m}$  espaciada de la garganta. Así mismo la cara de la soldadura fue de 3,305  $\mu\text{m}$ , la fusión de ambas chapas tuvo una fusión de 922.2  $\mu\text{m}$  y un área de metal recristalizado de 146,675.4  $\mu\text{m}^2$ . Al estar lateralizado el cordón o (fusión del metal), se observó que el pie izquierdo es de 116.7  $\mu\text{m}$ , es decir 33.2  $\mu\text{m}$  más grande que la corona; mientras que de lado derecho no se aprecia de la misma manera. En resumen, esta corrida experimental (TIG1) tiene inadecuada geometría, pobre fusión debido al bajo calor de entrada y la combinación de parámetros, así mismo en el metal fundido, se observan fases de ferrita Widmanstätten y martensita, en la ZAC se observan granos gruesos ferríticos que al acercarse al metal base se reducen y alternan con ferrita poligonal y alotriomórfica [71].



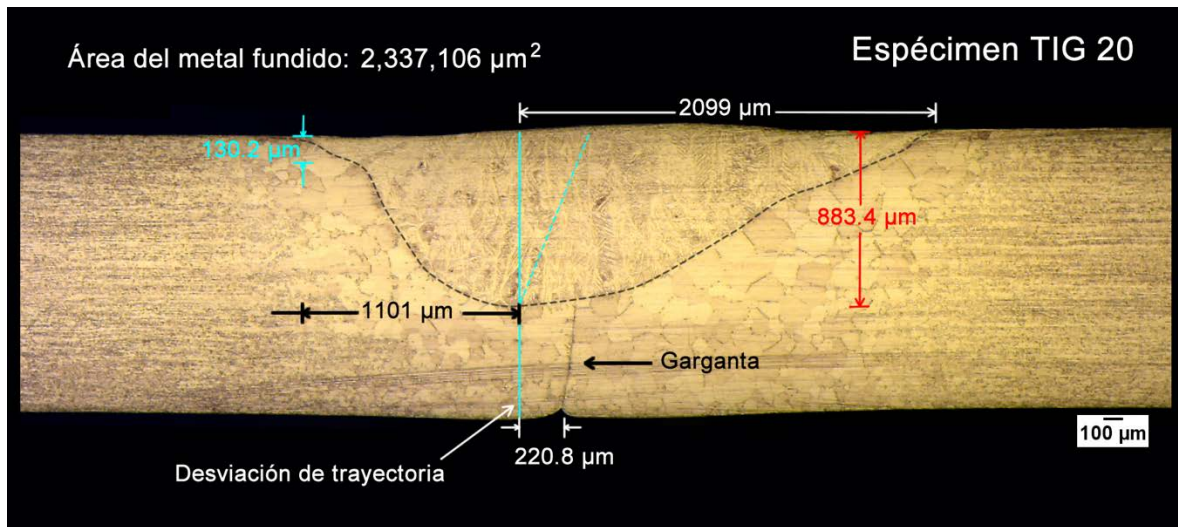
**Figura 4.12** Micrografía en amplio formato a 50x del espécimen TIG 1 en corte transversal

Otra probeta que es muestra notable de la falta de fusión y defectos de programación de trayectoria, es la corrida TIG20.

Esa muestra, tuvo una cara de 3200  $\mu\text{m}$  y un área de cordón de 2, 333,106  $\mu\text{m}^2$ . La fusión fue incompleta (<60%), mostró una desviación de 26° en la programación de la trayectoria de soldadura, que en consecuencia lateralizó la recristalización del metal separando la raíz del cordón 220.8  $\mu\text{m}$  de la garganta, existiendo una disimetría muy considerable en el metal fundido, de su lado derecho la cara tiene 2099  $\mu\text{m}$  y un ángulo de 31°, mientras que de lado izquierdo, la cara y la raíz el ángulo es de 50°, con el pie notablemente engrosado y asimétrico de 130.2 $\mu\text{m}$ .

La figura 4.13, muestra con detalle, lo antes descrito. Así mismo muestra los granos columnares y las formas caprichosas de la ferrita Widmanstätten en su esplendor, los granos gruesos de ferrita en la ZAC [21] (que es menor que la muestra TIG1) y una reducción de estos que se intercala con ferrita poligonal antes de religarse al metal base [71].





**Figura 4.13** Micrografía en amplio formato a 50x del espécimen TIG 20 en corte transversal

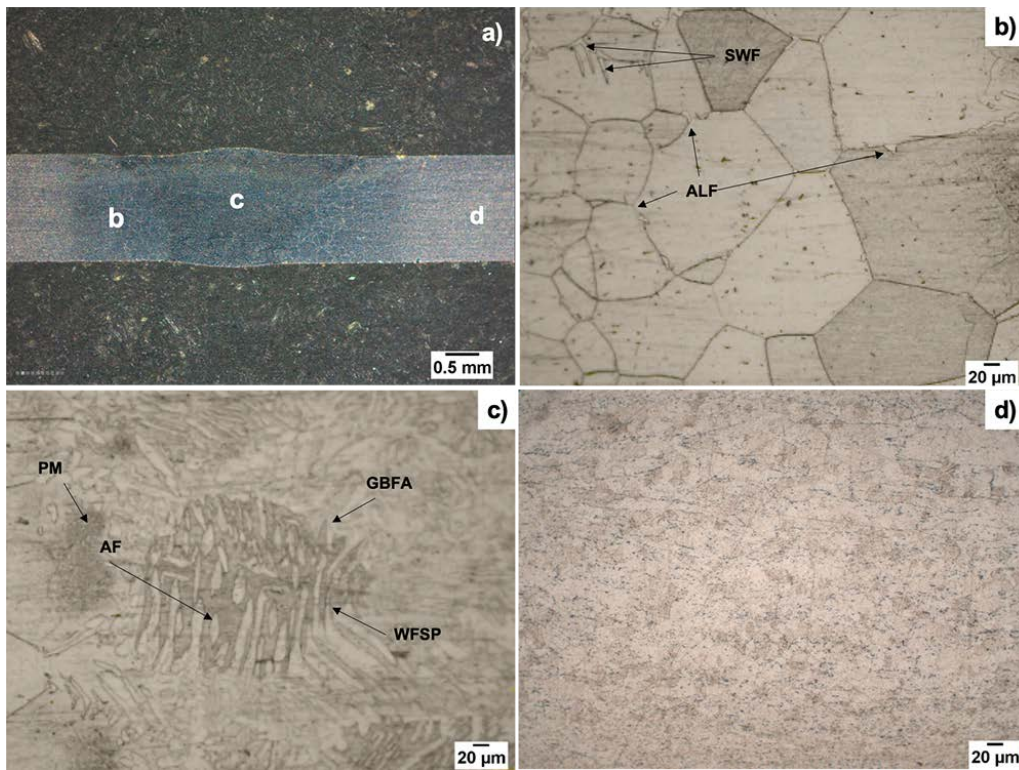
#### **4.2.3.2 Evolución microestructural**

El cambio en las características microestructurales varió según la combinación de parámetros de soldadura robotizada en cada una de las veinte uniones soldadas. El espécimen TIG8 en vista a 16x muestra varios granos gruesos bien definidos dentro de la ZAC y granos más grandes en metal fundido (Fig. 4.14a). Entonces, la ZAC recristalizada exhibe granos ferríticos gruesos cerca de la línea de fusión y otros granos con tamaños medios y finos al lado del metal base. Con más detalles, se encuentra la baja presencia de ferrita secundaria de placa lateral Widmanstätten (SWSF) y ferrita alotriomórfica (ALF) dentro de los límites de grano [71] debido al cambio de fase durante la soldadura y solidificación del metal [23], como puede ser visto en la figura 4.14b. así mismo, el metal fundido mostró fases como la placa lateral de ferrita Widmanstätten (WFSP), ferrita acicular (AF) y ferrita alotriomórfica en el límite de grano (GBFA) según lo reportado por Tomasz et al. [97] para estructuras típicas de soldadura de baja aleación, además, hay “*pepery martensita*” [13] como isla gris, ver Figura 4.14c.

Finalmente, el metal base está compuesto por una matriz de granos ferríticos que muestran diferentes tamaños y orientaciones que siguen la dirección de la soldadura (Figura 4.14d). Por lo tanto, este comportamiento microestructural indujo una

resistencia mecánica superior de la unión soldada TIG8, como lo es el valor la resistencia máxima a la tensión, el límite elástico, así como la mayor dureza Vickers con un incremento del 68% (endurecimiento tipo A) para el metal fundido en comparación con los otras diecinueve corridas.

Esta correlación entre la microestructura y las propiedades favoreció el valor  $Q_{net}$  medio adecuado de 0.168 kJ / mm, derivado de la mejor combinación de parámetros de soldadura robotizada (120 A, 15 Hz y 15 plg/min).

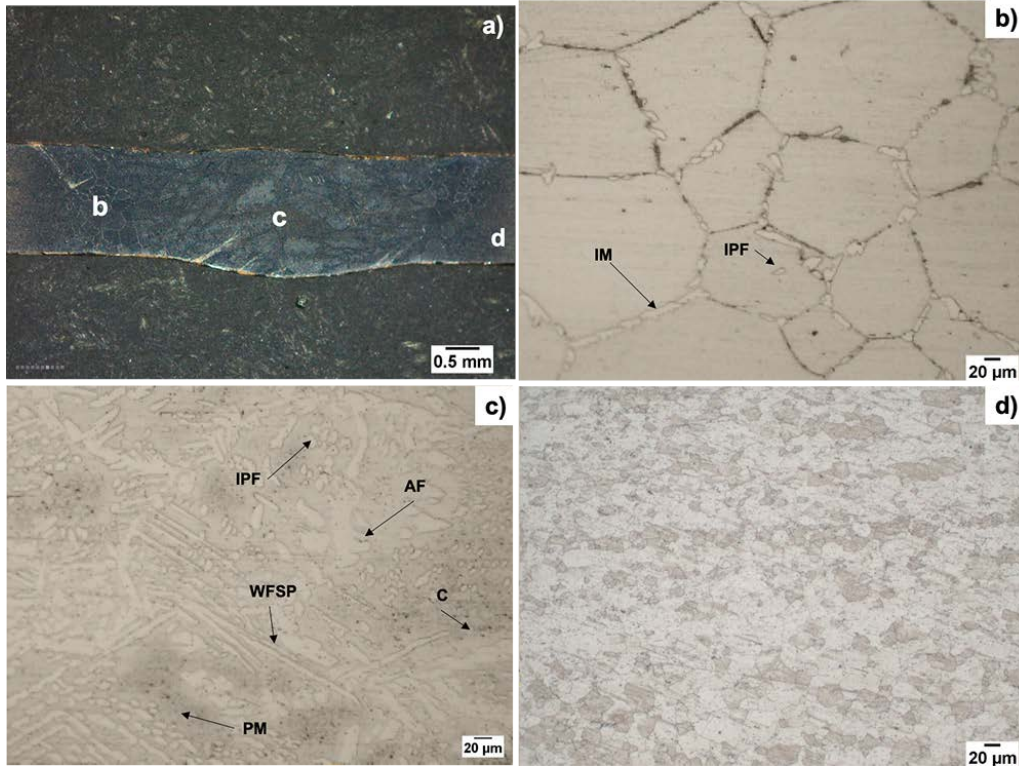


**Figura 4.14** Probetas transversales obtenidas a través de microscopía óptica de la junta soldada robotizada GTAW-P TIG8: a) dos zonas microestructurales de la unión, b) ferrita alotriomórfica en la ZAC, c) ferrita de placa lateral Widmanstätten dentro de metal fundido, d) matriz ferrítica en metal base.

En la unión identificada como TIG10 se observan claramente granos columnares alargados con la dirección del flujo de calor hacia el centro de la junta, esto se debe al proceso de enfriamiento durante la solidificación, lo que resulta en el metal fundido.

La ZAC muestra granos ferríticos con un crecimiento notable a ambos lados de la unión (Figura 4.15a) con respecto al metal base, los granos exhibieron diferentes tamaños. Con respecto a la ZAC presentó ferrita poligonal intragranular en los límites de grano (IPF), así como la martensita intergranular (IM) similar a las reportadas por Amuda [23] ver Figura 4.15b). El metal de fusión (Figura 4.15c) mostró ferrita columnar a partir de la cual crecen placas laterales de ferrita Widmanstätten (WFSP), ferrita poligonal intragranular (IPF), ferrita acicular (AF) y gran crecimiento de “*pepery martensita*” (PM) en mayor cantidad que los reportados por Devendranath et al [13] y ha sido documentado por Lippold y Kotecky afirmando que la martensita es una transformación de austenita formada a alta temperatura durante el enfriamiento y la precipitación de carburos (C) [21, pp. 95,96] El metal base presentaba matriz ferrítica con granos de diferentes tamaños, ver Figura 4.15d).

Estas zonas microestructurales complejas de la ZAC y el metal fundido se produjeron con un valor  $Q_{net}$  más alto (0.242 kJ / mm) resultante de los parámetros de soldadura (140 A, 10 Hz y 13 plg/min). Además, las fases heterogéneas de la ZAC derivaron en el endurecimiento tipo B con un incremento del 52% en comparación con el metal base. Finalmente, esta unión de soldadura TIG10 alcanzó el segundo valor de resistencia máxima a la tensión de las veinte uniones como consecuencia de las fases microestructurales explicadas para el ZAC y el metal fundido.



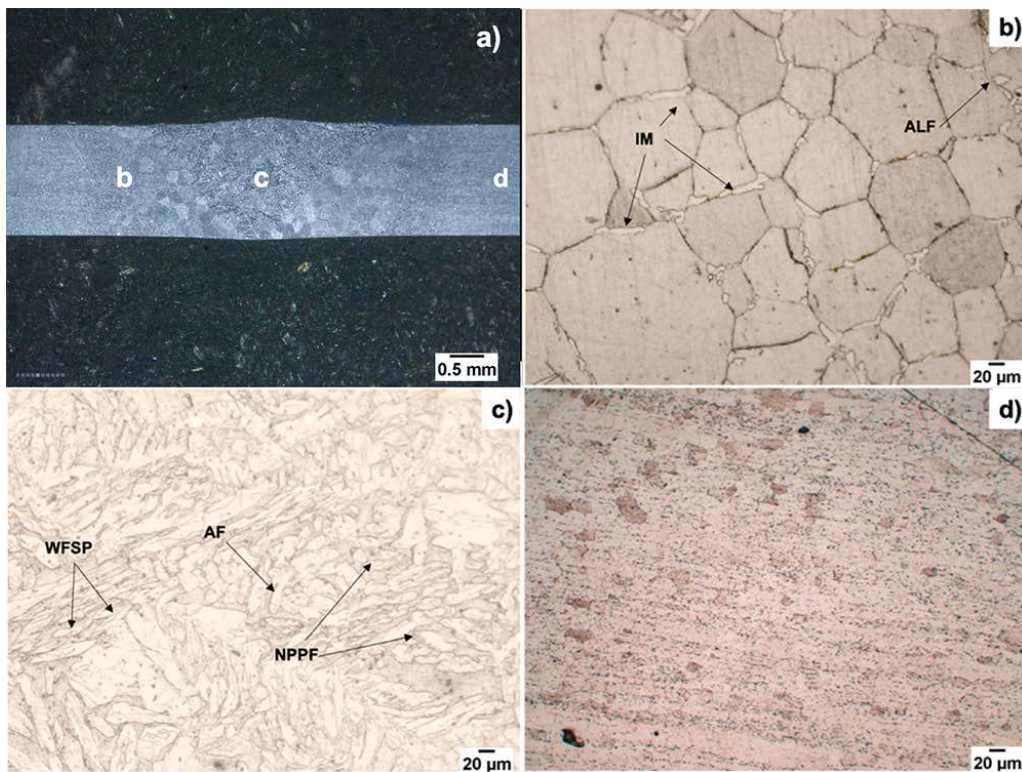
**Figura 4.15** Probetas transversales obtenidas por estereoscopia y microscopía óptica de una junta soldada robotizada GTAW-P TIG10: a) Macroscopía a 16x granos columnares en el metal fundido, b) martensita intergranular dentro del ZAC, c) placas laterales de ferrita Widmanstätten de metal fundido, y d) granos ferríticos en el metal base.

La condición de soldadura TIG14 muestra simetría en la geometría del cordón fundido con granos ferríticos, así como la ZAC exhibe granos gruesos con diferentes tamaños (Figura 4.16a). La ZAC recristalizada presenta granos gruesos de ferrita que contienen ferrita alotriomórfica (ALF) en los límites de grano y martensita intergranular (IM), ambos en una cantidad menor que la probeta TIG10, como se ve en la Figura 4.16b). El metal fundido se caracteriza por estructuras como placas laterales de ferrita Widmanstätten intragranular (WFSP), ferrita poligonal, ferrita primaria poligonal no alineada (NPPF) [97] así como islas de martensita (M) [17], [59].

En cuanto al metal base está formado por granos ferríticos. Estas microestructuras generadas a partir de la soldadura TIG14 por un valor  $Q_{net}$  medio (0.158 kJ / mm) resultantes de los parámetros de soldadura (90 A, 18.4 Hz y 13 plg/min), que explican



su comportamiento en la prueba de tensión y su resistencia máxima, así como microdureza inferior a la de las condiciones TIG8 y TIG10.



**Figura 4.16** Imágenes transversales obtenidas por estereoscopia y microscopia óptica de la unión soldada robotizada GTAW-P TIG14: a) granos gruesos en la ZAC, b) ferrita alotriomórfica en la ZAC, c) ferrita acicular de metal fundido, d) matriz ferrítica para la base metal.

#### **4.2.3.3 Número de tamaño de grano *G* ASTM en la ZAC y tamaño de grano promedio en la ZAC**

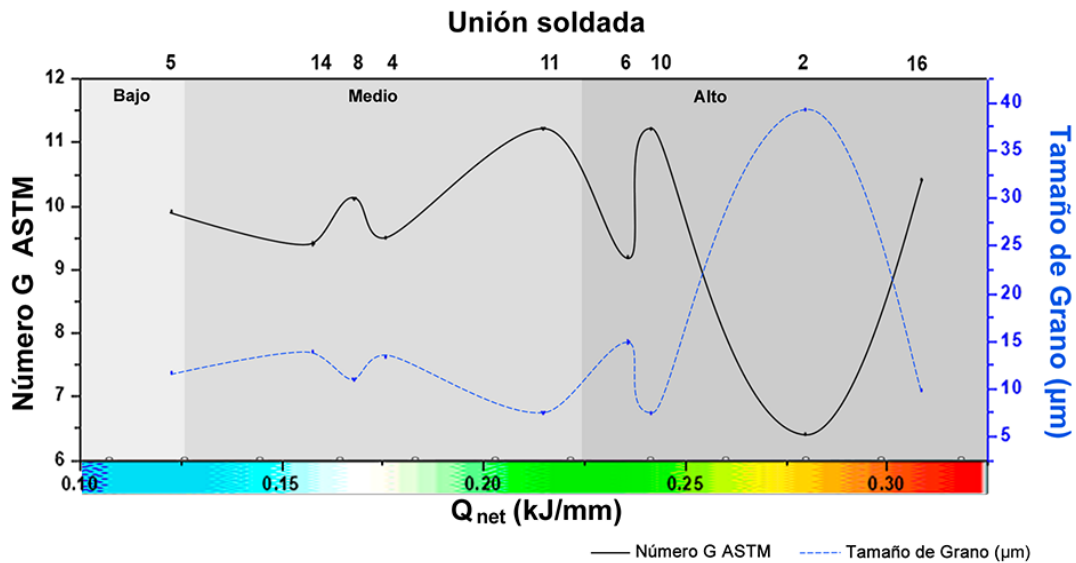
La caracterización cuantitativa de la ZAC consistió en tres parámetros promedio: ancho de ZAC, tamaño de grano y número de tamaño de grano ASTM *G* para soldadura robotizada GTAW-P en acero inoxidable ferrítico.

Se logró determinar el tamaño de grano aumentó junto con el calor de entrada, así que los números *G* tuvieron una variación inversamente proporcional en decrecimiento [66] [67].

La Figura 4.17 muestra el tamaño de grano promedio por  $\text{plg}^2$  y el número de tamaño de grano ASTM G dentro de la ZAC con respecto al calor entrante ( $Q_{\text{net}}$ ), donde es notable que hubo dos cambios significativos.

El tamaño de grano alcanzó un rango de  $7.42 \mu\text{m}$  (TIG10) a  $39.22 \mu\text{m}$  (TIG2), mientras que el número ASTM G mostró un intervalo de 11.2 a 6.4 para las corridas TIG10 y TIG2, respectivamente. Es evidente que el comportamiento del número G es inversamente proporcional a los valores de tamaño de grano.

El tamaño de grano aumentó ligeramente en función del incremento en el  $Q_{\text{net}}$ , alcanzando un tamaño de grano máximo en el valor de  $0.280 \text{ kJ/mm}$  para la condición TIG2 logrando una fusión completa e incremento de 13.5 veces con respecto al tamaño de grano del metal base ( $2,9 \mu\text{m}$ ), como se puede ver en la gráfica (figura 4.17), un aumento en el calor de entrada generó el considerable crecimiento de los granos de ferrita.



**Figura 4.17** Curva continua entre los valores del tamaño de grano y el número ASTM G con respecto al calor de entrada para soldaduras robotizadas GTAW-P.

En consecuencia, el número ASTM G exhibió un comportamiento opuesto [67] resultando en un valor mínimo de 6.4 para la corrida TIG2 que representa una

reducción del 53% en comparación con  $G = 13.7$  para el acero 430 recibido, lo que afecta las propiedades mecánicas (Resistencia máxima a la tensión de 420 MPa), como lo demuestran Amuda y Mridha [23].

Con respecto a la unión soldada TIG8 obtuvo un tamaño de grano promedio de  $10.84 \mu\text{m}$  y  $G$  de 10.1, ambos, cercanos al valor mínimo de los rangos reportados en la literatura [66] lo que comprobó el mayor rendimiento mecánico de tracción y del tipo de endurecimiento A del metal fundido (ver Fig. 4.25) con calor de entrada ( $Q_{\text{net}}$ ) más bajo que el reportado en la literatura analizada para el presente estudio [5], [23], [59].

La condición TIG14 está en el segundo lugar en la Figura 4.14, cuyo calor de entrada fue medio-bajo ( $0.158 \text{ kJ/mm}$ ) y un tamaño de grano de  $13.82 \mu\text{m}$ . es decir, 4.8 veces más grande que el metal base. Esta probeta mostró fusión y penetración completas con una resistencia máxima a la tensión de 440 MPa.

La ZAC de la corrida TIG10 (140 A, 10 Hz y 13 plg/min) exhibió el tamaño de grano más reducido ( $7.42 \mu\text{m}$ ) así como el menor ancho de ZAC ( $1.29 \text{ mm}$ ), segundo lugar en resistencia máxima a la tensión, el tipo de endurecimiento más alto B generado dentro de la ZAC y mayor que el del metal base.

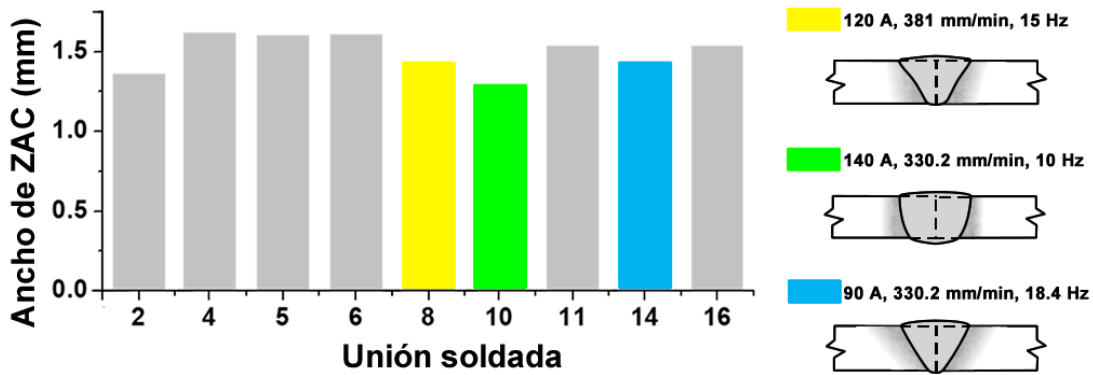
Todas estas propiedades mecánicas críticas y parámetros microestructurales se vincularon a la fase endurecida como la martensita en los límites de grano que se observa claramente en las micrografías. Este comportamiento se relaciona con el calor de entrada alto ( $0.242 \text{ kJ / mm}$ ) y la aplicación de corriente pulsada de 140 A, que causó distorsión térmica (deformación) en ambas láminas en la unión soldada y la geometría del metal fundido, como se ha descrito.

#### **4.2.3.4 Ancho de ZAC desde la microestructura**

El ancho de ZAC que fue reportado en el DOE, fue aquel que se midió de la sección transversal de las micrografías panorámicas. Las medidas del ancho de la ZAC recristalizada para las nueve corridas con fusión completa y penetración de la

soldadura se muestran en la figura 4.18, que se encuentran en el rango de 1.29 mm (TIG10) a 1.62 mm (TIG4).

Este parámetro no varió con respecto a los valores de  $Q_{net}$  (figura 4.18), su crecimiento estuvo proporcionalmente relacionado con la corriente de soldadura aplicada. Se observa que el ancho de ZAC más bajo se logró mediante la unión TIG10, seguido de las corridas TIG2 (1.36 mm), TIG14 (1.4 mm) y TIG8 (1.43 mm), que se relacionó al  $Q_{net}$  de 0.242 kJ / mm. Estas cuatro corridas tuvieron valores sobre el ancho de ZAC más ceñidos, es decir, una reducción de 20, 16, 14 y 12%, respectivamente, con respecto a la muestra TIG4. El ancho y la forma de la ZAC para las corridas experimentales TIG10, TIG14 y TIG8 están representadas con imágenes vectorizadas insertadas en la Figura 4.18. Estos cuatro casos tienen una gran similitud con los resultados de Amuda et al [23] quienes lograron este ancho de la ZAC mediante la aplicación de enfriamiento criogénico. En el presente estudio, fue posible reducir el ancho de la ZAC con la disipación de calor usando pulsos de 10 a 18.4 Hz y una velocidad de soldadura en el rango de 13 y 15 plg/min, este último fue mayor que el valor utilizado por Amuda [23]. Por lo tanto, la mejor condición en términos de ancho ZAC fue la unión soldada TIG10, que exhibió el menor ancho.



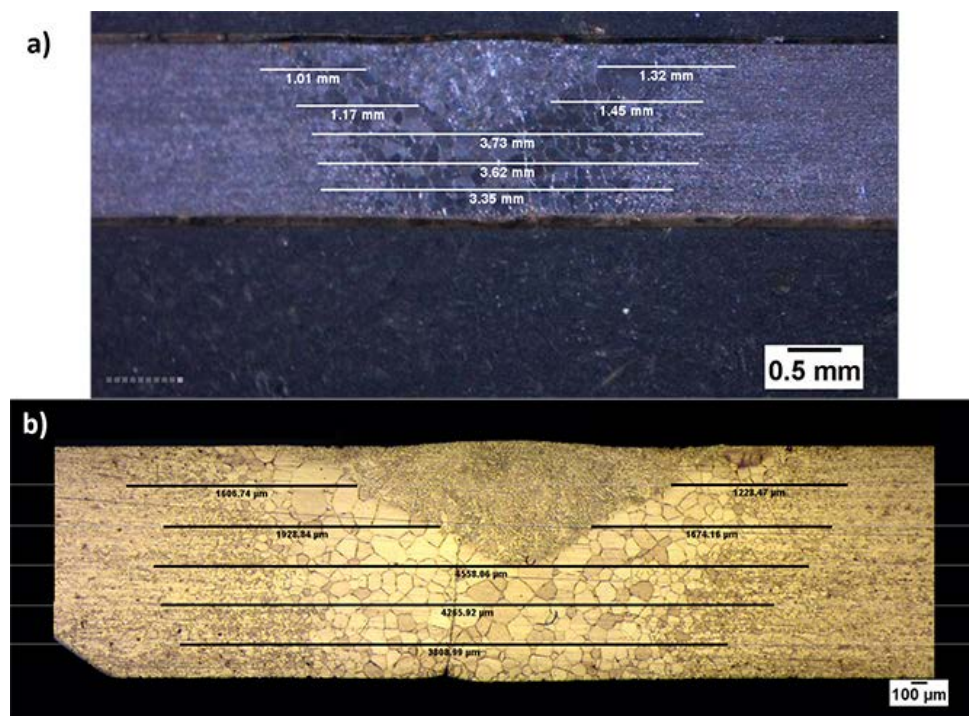
**Figura 4.18** Evaluación del ancho de la ZAC de las uniones soldadas robotizadas GTAW-P, donde las muestras TIG10, TIG14 y TIG8 exhibieron valores más bajos, como se puede ver en las imágenes vectorizadas de elaboración propia ®.



#### 4.2.3.5 Diferencia Ancho de ZAC macro y micro

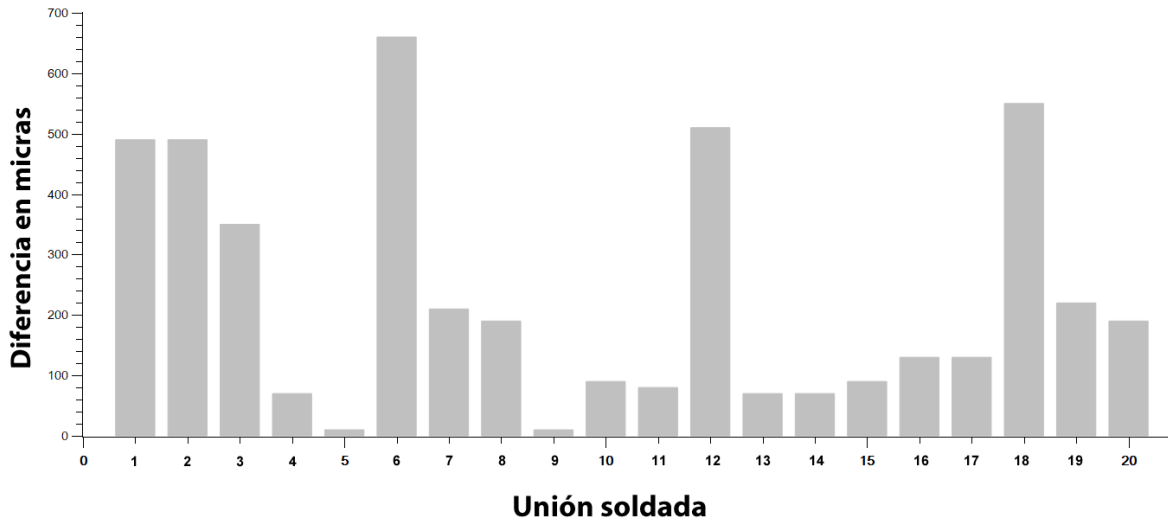
Las mediciones del ancho ZAC además de ayudar a recabar mayor cantidad de datos para la optimización, sirvió para idear de forma comparativa la diferencia entre una medida micrográfica obtenida por estereoscopia y las micrografías gran formato (panorámicas). Este último que es una técnica de fotografía, se logró adecuar a las necesidades del presente proyecto mediante procesamiento digital de imágenes [65], a fin de hacer un aporte significativo.

Con las micrografías transversales en gran formato o llamadas panorámicas, se logró determinar que las mediciones por estereoscopia de muestras transversales tienen una diferencia promedio de  $230\mu\text{m}$  con respecto a las mismas mediciones en gran formato obtenidas por microscopía óptica a 50x, tendiendo una desviación estándar de 0.19 (figura 4.19) que resulta de gran importancia para la caracterización [50], [66] de este tipo de uniones tan particulares [21].



**Figura 4.19** Comparativa de mediciones ancho de ZAC, a) macrografía transversal a16x de la muestra TIG 1, b) micrografía panorámica a 50x de la muestra TIG 1

Así mismo esta diferencia permite tener mayor exactitud en la evaluación de respuestas en modelos estadísticos y matemáticos. Los pormenores de las diferencias entre las mediciones estereoscópicas (16x) y las panorámicas o en gran formato (50x) en micrómetros del ancho de la ZAC, de las muestras transversales de uniones soldadas de acero inoxidable ferrítico sin metal de aporte con técnica GTAW-P, se muestran en la figura 4. 20, donde se determina que los datos obtenidos por estereoscopia no tienen la exactitud requerida es este caso específico, pero si funcionan adecuadamente para la caracterización macroscópica, como lo demuestra la muestra TIG 6, que tiene una diferencia en mediciones de casi 700µm, es decir, mayor a medio centímetro que representa la tercera parte del grosor de la lámina.



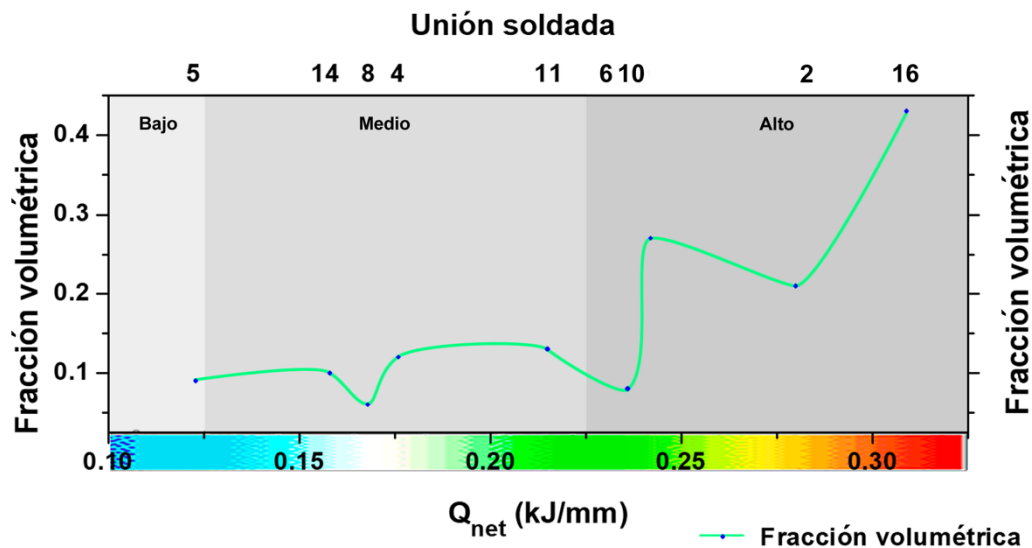
**Figura 4.20** Gráfica de diferencial en µm del ancho de ZAC en mediciones por estereoscopia (16x) y micrografías panorámicas (50x).

**4.2.3.6 Fracción volumétrica de martensita intergranular**

La fracción volumétrica de martensita intergranular en la zona afectada térmicamente de las uniones con fusión completa, mostró el comportamiento que se ha descrito en la literatura [21], [23], [9] que describe a mayor calor de entrada mayor fue el porcentaje de martensita intergranular, este comportamiento se puede observar

claramente en la figura 4.21. Toda vez que la corrida TIG5 (60 A, 11 plg/min, 15Hz) que se encuentra en primer lugar de la gráfica converge también en la zona de Qnet bajo, con un porcentaje de martensita de 0.9%.

La mejor condición donde se obtuvo el menor porcentaje de martensita intergranular, fue la unión TIG8 (120 A, 15 plg/min, 15Hz) con un 0.8%, existiendo congruencia con las pruebas mecánicas, ya que esta condición fue la que alcanzó la máxima resistencia mecánica. Ambas condiciones (TIG5 y TIG8) tienen en común que los pulsos aplicados fueron de 15Hz, que ayudó a reducir la presencia de esta fase no deseable y el primer caso ayudó a que se diese la fusión completa del metal de soldadura.



**Figura 4.21** Curva continua de la evaluación de la fracción volumétrica de martensita intergranular en relación al calor de entrada en uniones soldadas GTAW-P robotizadas.

En sentido opuesto se encuentra la corrida TIG16 (90 A, 13 plg/min, 10 Hz) que mostró el mayor porcentaje de martensita intergranular en la ZAC 4.3%, siendo la única corrida del bloque central [57] del DOE que tuvo fusión completa y cuyo calor de entrada fue el más alto (0.309 kJ/mm) hecho atribuible a dos factores, el aumento en el espacio entre la pieza de trabajo y electrodo (3.71 mm) y por lo tanto un aumento

en el voltaje de 22.3V, que derivó en mayor presencia de martensita intergranular durante la recristalización del metal de soldadura, que se confirmó con el perfil de microdureza.

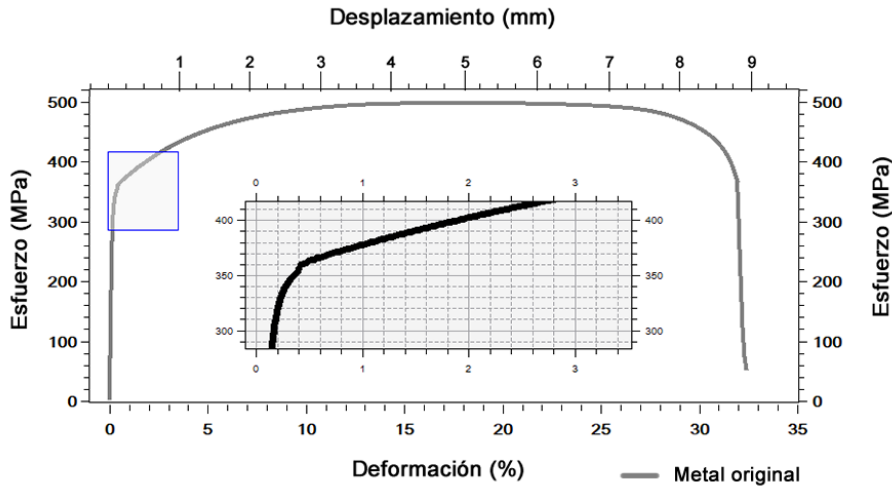
## 4.3 Análisis mecánico

Las respuestas de las pruebas mecánicas a las que sometieron tanto el metal original como los cupones de soldadura, se describen en las siguientes secciones.

### 4.3.1 Resistencia mecánica bajo tensión

#### 4.3.1.1 Curvas esfuerzo- deformación ingenieril del metal base.

Antes del proceso de soldadura se ejecutaron las pruebas mecánicas bajo tensión para determinar su resistencia mecánica, teniendo una elongación superior al 32%, así como resistencia máxima a la tensión de 497 MPa y un esfuerzo de cedencia de 347.9 MPa (figura 4.22).



**Figura 4.22** Gráfica esfuerzo- deformación de las probetas de caracterización inicial del metal AISI 430.

### 4.3.1.2 Curvas esfuerzo- deformación ingenieril de las uniones soldadas.

Después de analizar los resultados de las propiedades de tracción (Resistencia máxima a la tensión -UTS-, esfuerzo de cedencia -YS- y porcentaje de elongación) de las veinte uniones soldadas robóticas GTAW-P sin metal de aporte, que se compararon con el estándar ASTM A240 [98], se determinó que dos corridas (TIG8 y TIG10) que lograron y superaron la resistencia máxima a la tensión (UTS) mínimo requerido en(450 MPa) el estándar citado, como se puede ver en la Tabla 4.3, que muestra seis pruebas de soldadura robotizada que representan el rango de esfuerzo alcanzado (201 a 457 MPa).

Este intervalo disperso se relaciona con las diferentes combinaciones de parámetros de soldadura (corriente de soldadura, velocidad de soldadura y pulsos de corriente) derivados del DOE y que para efectos de lectura ágil de la presente tesis se muestran enseguida.

**Tabla 4.3** Propiedades mecánicas bajo tensión de juntas soldadas robóticas GTAW-P para acero inoxidable 430 más representativas.

Unión	Combinación de parámetros (A, plg/min, Hz)	Resistencia máxima a la tensión – UTS- (MPa)	Esfuerzo de cedencia -Ys- 0.2% (MPa)	Elongación (%)
TIG8	120, 381, 15	457	333	31
TIG10	140, 330, 10	452	331	28
TIG14	90, 330, 18.4	440	310	30
TIG3	60, 381, 5	295	276	2
TIG7	60, 381, 15	289	163	2
TIG20	90, 330, 10	201	121	1
Metal original		498	348	32

El comportamiento típico de tracción axial expresado por las curvas de S-e para tres muestras (TIG8, TIG10 y TIG14) se puede ver en la Figura 4.23, que mostró un incremento en los valores en la resistencia máxima a la tensión (UTS) de acuerdo con la combinación de los parámetros de soldadura aplicada, como la soldadura por pulsos corriente mayor que 120 A (unión TIG8) y 10 Hz (cupón TIG10).

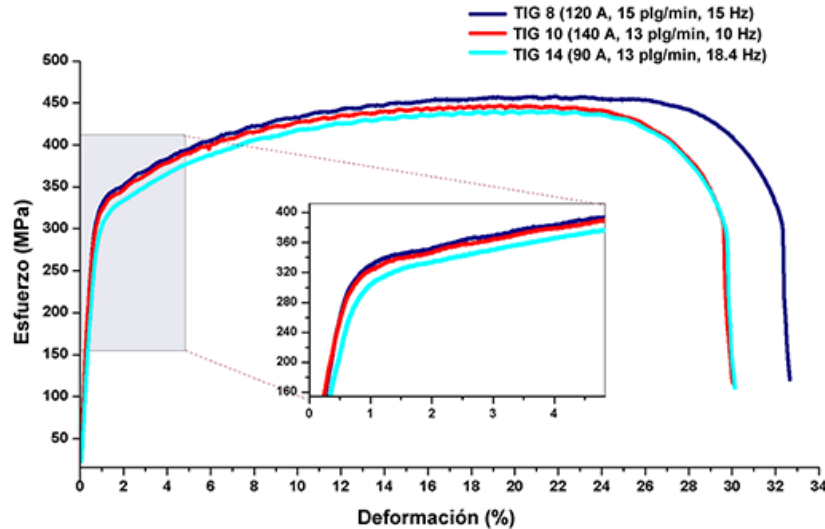
Además, se logró el mejor rendimiento con la condición TIG8 que muestra una mayor elongación y los mayores valores UTS como consecuencia de los mejores parámetros agrupados (15plg/min de velocidad de soldadura y 15 Hz de pulsos).

El límite elástico y el límite elástico se definieron claramente para las tres condiciones de soldadura, como se puede ver en el zoom insertado desde la zona de transición entre el comportamiento plástico-elástico, lo que resultó en que la unión TIG8 exhibió el límite elástico más grande (compensación del 0.2%), seguido de las uniones TIG 10 y TIG14 con un rendimiento de tensión inferior vinculado a 90 A, 18,4 Hz y 330 mm / min.

La unión TIG8 sometida a pruebas de tracción mecánica alcanzó el mayor valor de UTS, así como el límite elástico y el alargamiento, en comparación con otras diecinueve juntas, lo que se asoció con la mejor combinación de parámetros de soldadura robótica (120 A, 15 Hz y 381 mm / min) resultando en un valor  $Q_{net}$  medio de 0.168 kJ / mm, así como el mejor rendimiento de tracción que excede el margen de seguridad de la norma ASTM A240 [98]. Resultados similares fueron reportados por Gurrana et al [60] con el conjunto del valor óptimo (457 MPa) para UTS en este tipo de juntas soldadas. Sin embargo, hubo disminuciones de 8% para UTS, 4% de límite elástico y 3% para alargamiento, en comparación con estas propiedades originales del acero inoxidable 430.

La segunda mejor soldadura identificada como TIG10 excedió las propiedades de tensión límite permitidas en la norma ASTM A240 [98], mostró un comportamiento de tracción similar al del espécimen TIG8, lo que resultó en reducciones de 9% para UTS, 5% a límite elástico y 13% para alargamiento, con respecto a la chapa de acero

430 caracterizada inicialmente, como consecuencia de los parámetros de soldadura aplicados (140 A, 10 Hz y 330 mm / min) dando un  $Q_{net}$  más alto de 0.242 kJ / mm según lo informado por Gurruma et al [60].

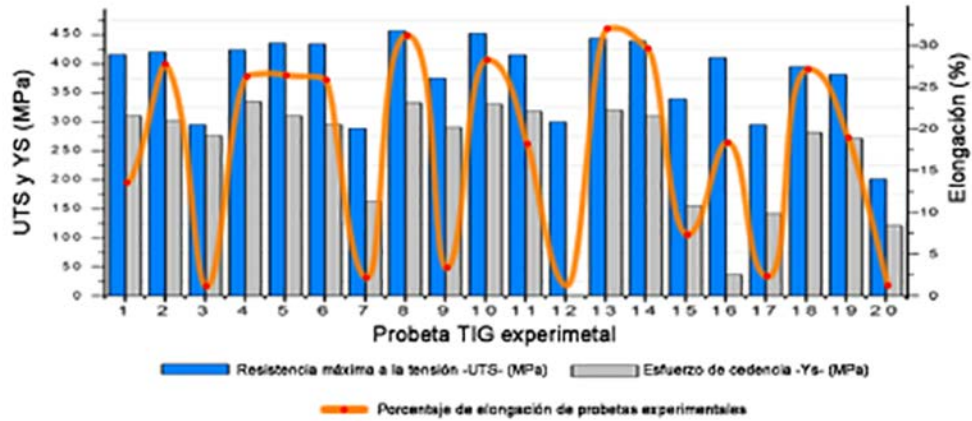


**Figura 4.23** Gráfica S-e para las tres condiciones de soldadura con mejor desempeño en la prueba de tensión.

Es importante señalar que las veinte uniones soldadas resultantes de la matriz experimental, fueron sometidas a pruebas mecánicas de tensión, tal como se observa en la tabla 4.3 pese a no todas tuvieron fusión completa debido a que era de suma importancia conocer el desempeño en esta prueba de las uniones soldadas que son tan singulares.

El rango de resistencia máxima (UTS) a la tensión antes de la optimización del proceso fue de 201.12 y la máxima de 457. 18, observándose que más del 50% superan los 400 MPa aún sin tener fusión completa, como fue el caso de la junta por fusión TIG 1 que alcanzó los 416 MPa de resistencia máxima pero una muy pobre elongación (13%). Otra que llamó la atención fue la probeta TIG 13 que teniendo una fusión menor al 50% tuvo un desempeño notable a la tracción con resistencia máxima del 444 MPa, esfuerzo a la cedencia de 320 MPa y una elongación del 32.11, que sin lugar a dudas es muy alto para una probeta que no se fusionó completamente, hecho atribuible a la combinación de 13 plg/min de velocidad y 1.6 Hz de pulsos, como se

comprueba más adelante en las gráficas de contorno, siendo esta unión incluso, la de elongación más alta en todas las corridas experimentales, como puede observarse en la tendencia de la Figura 4.24.



**Figura 4.24** Resistencia máxima a la tensión, esfuerzo a la cedencia y curva continua del porcentaje de elongación en las veinte corridas experimentales de soldadura robotizada GTAW-P sin metal de aporte.

### 4.3.2 Resistencia a la indentación Vickers

Las nueve probetas que tuvieron fusión completa fueron sometidas a un barrido para medir la distribución de las durezas [59].

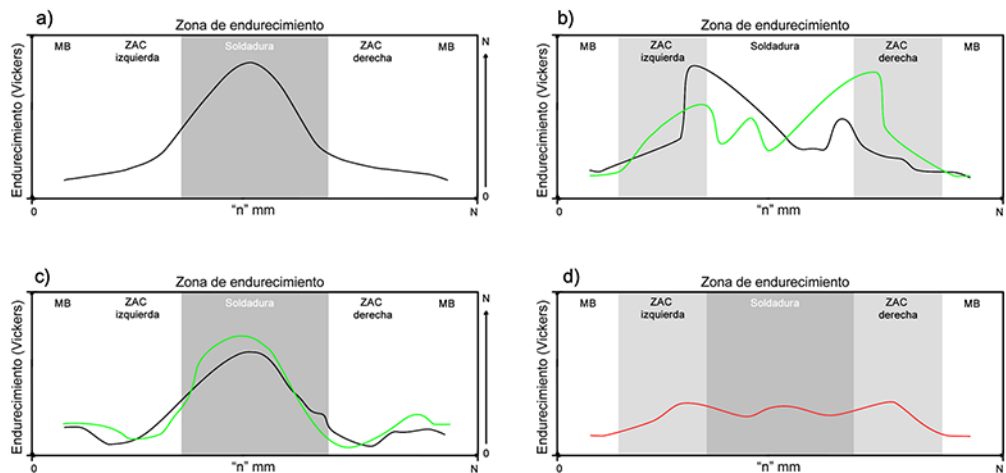
Durante el análisis de los datos se observaron cuatro tipos de endurecimientos, mismos que se ilustran en la figura 4.25, donde se muestra que la dureza durante el proceso de recristalización del acero inoxidable ferrítico con soldadura sin metal de aporte y proceso GTAW-P robotizado fue distribuida en distintas zonas, dependiendo la combinación de parámetros.

El primero denominado tipo A descrito por Vargas-Arista [109], tuvo un comportamiento “*in crescendo*” del metal base a la ZAC (uni o bilateral) alcanzando mayor dureza en la soldadura, decayendo en el mismo orden (Figura 4.25a). El segundo tipo fue endurecimiento tipo B, en el que la distribución en las micro durezas se comporta sinusoidalmente “*in crescendo*” hasta alcanzar el punto más alto en la



ZAC teniendo una caída en el metal fundido o cordón (Figura 4.25b) hasta llegar al punto más bajo en el metal base.

El tercero (endurecimiento tipo C) tiene un comportamiento de decrecimiento de la dureza, es decir el punto más bajo está en la ZAC (izquierda, derecha o ambas) y por debajo del metal base llegando al punto más alto en la soldadura (Figura 4.25c). Finalmente se encuentra el tipo D, que tiene menor o igual dureza en el metal fundido que la ZAC, teniendo durezas no mayores al 23% del metal base (Figura 4.25d).

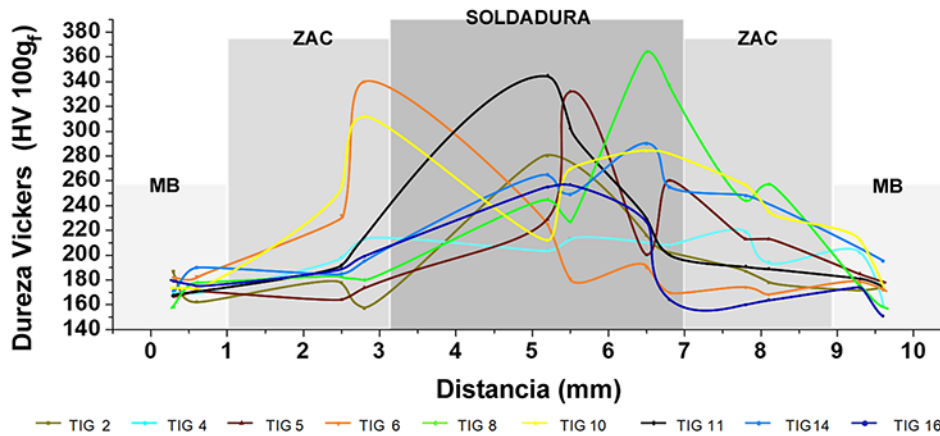


**Figura 4.25** Tipos de endurecimiento en soldadura de acero inoxidable AISI 430 sin metal de aporte.

En la figura 4.26, se muestra el comportamiento global de las durezas en metal base, ZAC y soldadura de las 9 probetas evaluadas. La probeta TIG11, (que en la figura 4.22 se observa con línea de color negro) es muestra de un tipo de endurecimiento tipo A ideal, donde la dureza es semejante a una campana. Este perfil es congruente con los resultados de la prueba de tensión, ya que su desempeño se vio afectado por el endurecimiento teniendo una resistencia máxima a la tensión de 415.93 MPa y una elongación de tan solo 18%, así como la probeta TIG8, que mostró la dureza más alta en la soldadura, aunque se mostró con un comportamiento sinusoidal en la garganta de la soldadura (240 Vickers), bajando a 220 para

finalmente subir al punto más alto en el lado derecho del cordón, decreciendo sinusoidalmente hasta el metal base.

Esto explica que la resistencia mecánica de esta probeta fuera la mejor (>457 MPa), el endurecimiento tipo A, también se observa en la probeta TIG14, aunque con un decrecimiento cercano al 17% con respecto al punto más alto del espécimen TIG8.



**Figura 4.26** Perfil de micro-dureza, donde se observa que la probeta TIG11 tuvo el mejor desempeño en la distribución de dureza.

Las probetas TIG6 y TIG10 mostraron un endurecimiento tipo B, siendo la zona afectada por el calor la más dura. Para el caso de la primera es notorio el aumento en la dureza con respecto a la segunda. La probeta TIG6 (en amarillo en la figura 4.26) muestra que hay una disminución importante en la dureza del cordón, esto explica su comportamiento en las pruebas de tensión y las fases presentes en la microestructura, así como la presencia de carburos de precipitados.

En tanto la probeta TIG10 pese a tener ese tipo de endurecimiento es 11% menor que la punta de TIG6, así mismo, tiene un endurecimiento en metal fundido superior a la TIG6, lo que explica que la probeta TIG10 estuviese en segundo lugar en resistencia mecánica y una de las tres con mayor porcentaje de martensita intergranular en la ZAC.

## 4.4 Optimización y simulación

Los resultados experimentales sirvieron como base para la modelación y simulación de la optimización de parámetros de soldadura GTAW-P robotizada en acero inoxidable ferrítico AISI 430.

### 4.4.1 Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico [57], [58], [77], para establecer cuales son parámetros que tienen mayor importancia para obtener uniones soldadas con sanidad, en láminas de acero inoxidable ferrítico. Se estudiaron las relaciones e interacciones de parámetros de Corriente ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y pulsos ( $P_s$ ), para determinar cuál o cuáles resultan de mayor o menor relevancia para a optimización. Los niveles de probabilidad utilizados, fueron nivel  $\alpha=0.05$  y significación  $p$ , como se expresa en los siguientes puntos. Los datos son muy escasos, se contó con pocas muestras, por lo que la población de este apartado tiene acotamiento en sus aplicaciones estadísticas, por ello el valor  $T$  no es disertado [78], [99].

#### **4.4.1.1 Análisis de Varianza de la Resistencia máxima a la tensión (UTS) con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )**

Esta relación fue la de mayor complejidad, toda vez que, el modelo mostró que la velocidad de soldadura al cuadrado es la de mayor jerarquía con respecto a la resistencia máxima a la tensión, mientras que la interacción de dos variables distintas, como la velocidad de soldadura por los pulsos del arco, tiene mayor influencia dentro de la hipótesis [56] seguida de la corriente de soldadura por pulsos (tabla 4.4). Lo que resultó en una falta de ajuste del modelo  $>0.9$ , por lo cual se debió hacer la optimización mediante redes neuronales.

**Tabla 4.4** Análisis de varianza de la regresión *UTS vs Cw, Sw, Ps*

Fuente	GL	SC Ajuste.	MC Ajuste.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	9	61964.2	6884.9	2.07	0.136
<b>Lineal</b>	3	27612.2	9204.1	2.77	0.097
<b>Cw (A)</b>	1	13563.1	13563.1	4.09	0.071
<b>Sw (Plg/min)</b>	1	13843.1	13843.1	4.17	0.068
<b>Ps (Hz)</b>	1	205.9	205.9	0.06	0.808
<b>Cuadrado</b>	3	23296.9	7765.6	2.34	0.135
<b>Cw (A)*Cw (A)</b>	1	8386.8	8386.8	2.53	0.143
<b>Sw (Plg/min)*Sw (Plg/min)</b>	1	210.8	210.8	0.06	0.806
<b>Ps (Hz)*Ps (Hz)</b>	1	16796.2	16796.2	5.06	0.048
<b>Interacción de 2 factores</b>	3	11055.1	3685.0	1.11	0.390
<b>Cw (A)*Sw (Plg/min)</b>	1	10906.9	10906.9	3.29	0.100
<b>Cw (A)*Ps (Hz)</b>	1	141.9	141.9	0.04	0.840
<b>Sw (Plg/min)*Ps (Hz)</b>	1	6.3	6.3	0.00	0.966
<b>Error</b>	10	33186.8	3318.7		
<b>Falta de ajuste</b>	5	2009.2	401.8	0.06	0.995
<b>Error puro</b>	5	31177.5	6235.5		
<b>Total</b>	19	95151.0			

**Regresión de  $UTS = f(C_w, S_w, P_s)$**

$$UTS = 1733 - 12.10 C_w - 101 S_w - 27.8 P_s + 0.0271 C_w * C_w + 1.13 S_w * S_w + 1.362 P_s * P_s + 0.615 C_w * S_w + 0.028 C_w * P_s - 0.09 S_w * P_s$$

**Resumen estadístico del modelo  $UTS = f(C_w, S_w, P_s)$**

Valor S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	R <sup>2</sup> (pred)
57.6080	65.12%	33.73%	36.32%

#### 4.4.1.2 Análisis de Varianza de la $Y_s$ con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )

El esfuerzo de cedencia desde el punto de vista estadístico, muestra que la velocidad de soldadura ( $S_w^2$ ) es significativa con un valor de 0.9, y en la interacción de dos variables la de mayor significancia la corriente por los pulsos, seguida de la velocidad por los pulsos (tabla 4.5), lo cual demuestra que esta respuesta es muy difícil lograr un aumento importante en su optimización.

**Tabla 4.5** Análisis de varianza de la regresión  $Y_s$  vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	9	129222	14358.0	1.97	0.153
<b>Lineal</b>	3	34583	11527.8	1.58	0.255
<b><math>C_w</math> (A)</b>	1	5518	5518.2	0.76	0.405
<b><math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	27636	27636.0	3.79	0.080
<b><math>P_s</math> (Hz)</b>	1	1429	1429.1	0.20	0.668
<b>Cuadrado</b>	3	83891	27963.7	3.83	0.046
<b><math>C_w</math> (A)*<math>C_w</math> (A)</b>	1	44517	44517.2	6.10	0.033
<b><math>S_w</math> (Plg/min)*<math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	122	122.3	0.02	0.900
<b><math>P_s</math> (Hz)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	46733	46733.0	6.41	0.030
<b>Interacción de 2 factores</b>	3	10748	3582.7	0.49	0.696
<b><math>C_w</math> (A)*<math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	7938	7938.0	1.09	0.321
<b><math>C_w</math> (A)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	1352	1352.0	0.19	0.676
<b><math>S_w</math> (Plg/min)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	1458	1458.0	0.20	0.664
<b>Error</b>	10	72963	7296.3		
<b>Falta de ajuste</b>	5	28936	5787.2	0.66	0.672
<b>Error puro</b>	5	44027	8805.4		
<b>Total</b>	19	202185			

#### Ecuación de regresión $Y_s = f(C_w, S_w, P_s)$

$$Y_s = 1827 - 18.25 C_w - 80 S_w - 37.7 P_s + 0.0624 C_w * C_w + 0.86 S_w * S_w + 2.272 P_s * P_s + 0.525 C_w * S_w + 0.087 C_w * P_s - 1.35 S_w * P_s$$

#### Resumen del modelo $Y_s = f(C_w, S_w, P_s)$

Valor S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	R <sup>2</sup> (pred)
85.4183	63.91%	31.43%	0.00%

### 4.4.1.3 Análisis de Varianza de la Elongación con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )

En el análisis de este modelo lineal se observa que los pulsos del arco son importantes en relación con el porcentaje de elongación de la probeta, mientras que en la velocidad al cuadrado ( $S_w^2$ ) se indica cómo relación de importancia [17], [56]. La varianza de esta regresión se muestra en la tabla 4.6.

En cuanto a la interacción de dos valores sobre la elongación de las muestras acero inoxidable ferrítico, soldadas por fusión, la interacción de velocidad de soldadura por pulsos del arco es la más relevante, seguida de corriente por pulsos [77], tal como se observará en las superficies de respuesta de estas relaciones en los puntos subsiguientes.

**Tabla 4.6** Análisis de varianza de la regresión *Elongación vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	9	2072.32	230.257	3.60	0.029
<b>Lineal</b>	3	1172.21	390.737	6.12	0.012
<b><math>C_w</math> (A)</b>	1	893.54	893.543	13.98	0.004
<b><math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	266.99	266.990	4.18	0.068
<b><math>P_s</math> (Hz)</b>	1	11.68	11.679	0.18	0.678
<b>Cuadrado</b>	3	668.68	222.895	3.49	0.058
<b><math>C_w</math> (A)*<math>C_w</math> (A)</b>	1	22.96	22.963	0.36	0.562
<b><math>S_w</math> (Plg/min)*<math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	11.23	11.232	0.18	0.684
<b><math>P_s</math> (Hz)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	640.58	640.577	10.03	0.010
<b>Interacción de 2 factores</b>	3	231.42	77.140	1.21	0.357
<b><math>C_w</math> (A)*<math>S_w</math> (Plg/min)</b>	1	209.61	209.613	3.28	0.100
<b><math>C_w</math> (A)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	16.45	16.445	0.26	0.623
<b><math>S_w</math> (Plg/min)*<math>P_s</math> (Hz)</b>	1	5.36	5.363	0.08	0.778
<b>Error</b>	10	638.95	63.895		
<b>Falta de ajuste</b>	5	83.34	16.669	0.15	0.971
<b>Error puro</b>	5	555.61	111.122		
<b>Total</b>	19	2711.27			

**Ecuación de regresión  $Elongación = f(C_w, S_w, P_s)$** 

$$Elongación = 91 - 0.998 C_w - 2.4 S_w - 3.21 P_s + 0.00142 C_w * C_w - 0.261 S_w * S_w + 0.2660 P_s * P_s + 0.0853 C_w * S_w - 0.0096 C_w * P_s - 0.082 S_w * P_s$$

**Resumen del modelo  $Elongación = f(C_w, S_w, P_s)$** 

Valor S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	R <sup>2</sup> (pred)
7.99344	76.43%	55.22%	43.18%

**4.4.1.4 Análisis de Varianza de la ZAC con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )**

En esta regresión, la corriente de soldadura al cuadrado resulta significativa [79] para el análisis de ancho de ZAC, toda vez que es  $> 0.9$  como se muestra en la tabla 4.7 y de la interacción de dos factores las de mayor importancia es la corriente de soldadura por los pulsos, seguido de corriente por velocidad. Este modelo matemático tuvo una falta de ajuste del 0.2 [56], [57].

**Tabla 4.7** Análisis de varianza de la regresión ZAC vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$ 

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1.40007	0.155563	2.72	0.067
Lineal	3	0.94774	0.315912	5.53	0.017
$C_w$ (A)	1	0.56060	0.560598	9.82	0.011
$S_w$ (Plg/min)	1	0.08904	0.089042	1.56	0.240
$P_s$ (Hz)	1	0.29810	0.298098	5.22	0.045
Cuadrado	3	0.33868	0.112894	1.98	0.181
$C_w$ (A)* $C_w$ (A)	1	0.00030	0.000299	0.01	0.944
$S_w$ (Plg/min)* $S_w$ (Plg/min)	1	0.30791	0.307907	5.39	0.043
$P_s$ (Hz)* $P_s$ (Hz)	1	0.02225	0.022254	0.39	0.546
Interacción de 2 factores	3	0.11365	0.037883	0.66	0.593
$C_w$ (A)* $S_w$ (Plg/min)	1	0.01620	0.016200	0.28	0.606
$C_w$ (A)* $P_s$ (Hz)	1	0.09245	0.092450	1.62	0.232

**Tabla 4.7** Análisis de varianza de la regresión ZAC vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Sw (Plg/min)*Ps (Hz)	1	0.00500	0.005000	0.09	0.773
Error	10	0.57091	0.057091		
Falta de ajuste	5	0.39382	0.078765	2.22	0.200
Error puro	5	0.17708	0.035417		
Total	19	1.97097			

**Ecuación de regresión de ZAC = f ( $C_w, S_w, P_s$ )**

$$ZAC = -2.13 - 0.0228 C_w + 0.991 S_w - 0.158 P_s - 0.000005 C_w * C_w - 0.0433 S_w * S_w + 0.00157 P_s * P_s + 0.00075 C_w * S_w + 0.000717 C_w * P_s + 0.00250 S_w * P_s$$

**Resumen del modelo ZAC = f ( $C_w, S_w, P_s$ )**

Valor S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	R <sup>2</sup> (pred)
0.238936	71.03%	44.97%	0.00%

**4.4.1.5 Análisis de Varianza de la Tamaño de grano (Gz) con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )**

Desde la perspectiva estadística, el aumento en el tamaño de grano en la ZAC (Gz) se ve influenciado por el cuadrado de los pulsos del arco ( $P_s^2$ ), siendo el valor más significativo, y derriba la hipótesis de que la corriente es la responsable de este fenómeno, esto se explica porque corriente del modelo lineal = 0.182, mientras que la relación de la corriente al cuadrado  $C_w^2=0.438$  en ninguna de sus interacciones con otros factores es superior a 0.7, tal como se observa en todo el análisis estadístico de la tabla 4. 8. El modelo tuvo una falta de ajuste de 0.007.



**Tabla 4.8** Análisis de varianza de la regresión  $G_z$  vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$ 

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	9	494.145	54.905	1.19	0.391
<b>Lineal</b>	3	114.245	38.082	0.83	0.508
<b>C<sub>w</sub> (A)</b>	1	94.547	94.547	2.06	0.182
<b>S<sub>w</sub> (PLG/MIN)</b>	1	6.919	6.919	0.15	0.706
<b>P<sub>s</sub> (Hz)</b>	1	12.779	12.779	0.28	0.610
<b>Cuadrado</b>	3	67.942	22.647	0.49	0.695
<b>C<sub>w</sub> (A)*C<sub>w</sub> (A)</b>	1	30.067	30.067	0.65	0.438
<b>S<sub>w</sub> (PLG/MIN)*S<sub>w</sub> (PLG/MIN)</b>	1	34.710	34.710	0.75	0.405
<b>P<sub>s</sub> (Hz)*P<sub>s</sub> (Hz)</b>	1	0.088	0.088	0.00	0.966
<b>Interacción de 2 factores</b>	3	311.958	103.986	2.26	0.144
<b>C<sub>w</sub> (A)*S<sub>w</sub> (PLG/MIN)</b>	1	105.415	105.415	2.29	0.161
<b>C<sub>w</sub> (A)*P<sub>s</sub> (Hz)</b>	1	126.405	126.405	2.75	0.128
<b>S<sub>w</sub> (PLG/MIN)*P<sub>s</sub> (Hz)</b>	1	80.138	80.138	1.74	0.216
<b>Error</b>	10	459.906	45.991		
Falta de ajuste	5	425.976	85.195	12.55	0.007
Error puro	5	33.930	6.786		
Total	19	954.051			

**Ecuación de regresión de  $G_z = f(C_w, S_w, P_s)$** 

$$G_z = 23 + 1.431 C_w - 10.0 S_w - 1.99 P_s - 0.00162 C_w * C_w + 0.459 S_w * S_w + 0.0031 P_s * P_s - 0.0605 C_w * S_w - 0.0265 C_w * P_s + 0.317 S_w * P_s$$

**Resumen del modelo  $G_z = f(C_w, S_w, P_s)$** 

Valor S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	R <sup>2</sup> (pred)
6.78164	51.79%	8.41%	0.00%

**4.4.1.6 Análisis de Varianza del número G ASTM ( $N_g$ ) con Corriente de soldadura ( $C_w$ ), Velocidad de soldadura ( $S_w$ ) y Pulsos del arco ( $P_s$ )**

Este modelo resultó inválido absolutamente [56]. Lo anterior se determina con la simple lectura de la influencia de la velocidad del soldadura ( $S_w$ ) en modelo lineal  $>0.985$ , que resulta irreal, que en teoría el Número G ASTM es inversamente proporcional al tamaño de grano, en consecuencia, debería ser inversamente proporcional al modelo  $G_z = f(C_w, S_w, P_s)$  y en ninguna de sus interacciones se muestra así, como si se observa en la figura 4.17 esta relación recíproca, del tamaño de grano caracterizado por el estándar ASTM E-112 [66] y el número G ASTM. Por lo tanto este modelo es ineficaz.

**Tabla 4.9** Análisis de varianza de la regresión  $N_g$  vs  $C_w$ ,  $S_w$ ,  $P_s$

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	11.8934	1.32149	0.95	0.525
Lineal	3	2.4635	0.82117	0.59	0.635
$C_w$ (A)	1	2.4532	2.45320	1.77	0.213
$S_w$ (Plg/min)	1	0.0098	0.00980	0.01	0.935
$P_s$ (Hz)	1	0.0005	0.00052	0.00	0.985
Cuadrado	3	3.7561	1.25204	0.90	0.474
$C_w$ (A)* $C_w$ (A)	1	2.6056	2.60556	1.88	0.201
$S_w$ (Plg/min)* $S_w$ (Plg/min)	1	0.9209	0.92090	0.66	0.434
$P_s$ (Hz)* $P_s$ (Hz)	1	0.0401	0.04010	0.03	0.868
Interacción de 2 factores	3	5.6737	1.89125	1.36	0.310
$C_w$ (A)* $S_w$ (Plg/min)	1	1.7113	1.71125	1.23	0.293
$C_w$ (A)* $P_s$ (Hz)	1	2.7612	2.76125	1.99	0.189
$S_w$ (Plg/min)* $P_s$ (Hz)	1	1.2012	1.20125	0.87	0.374

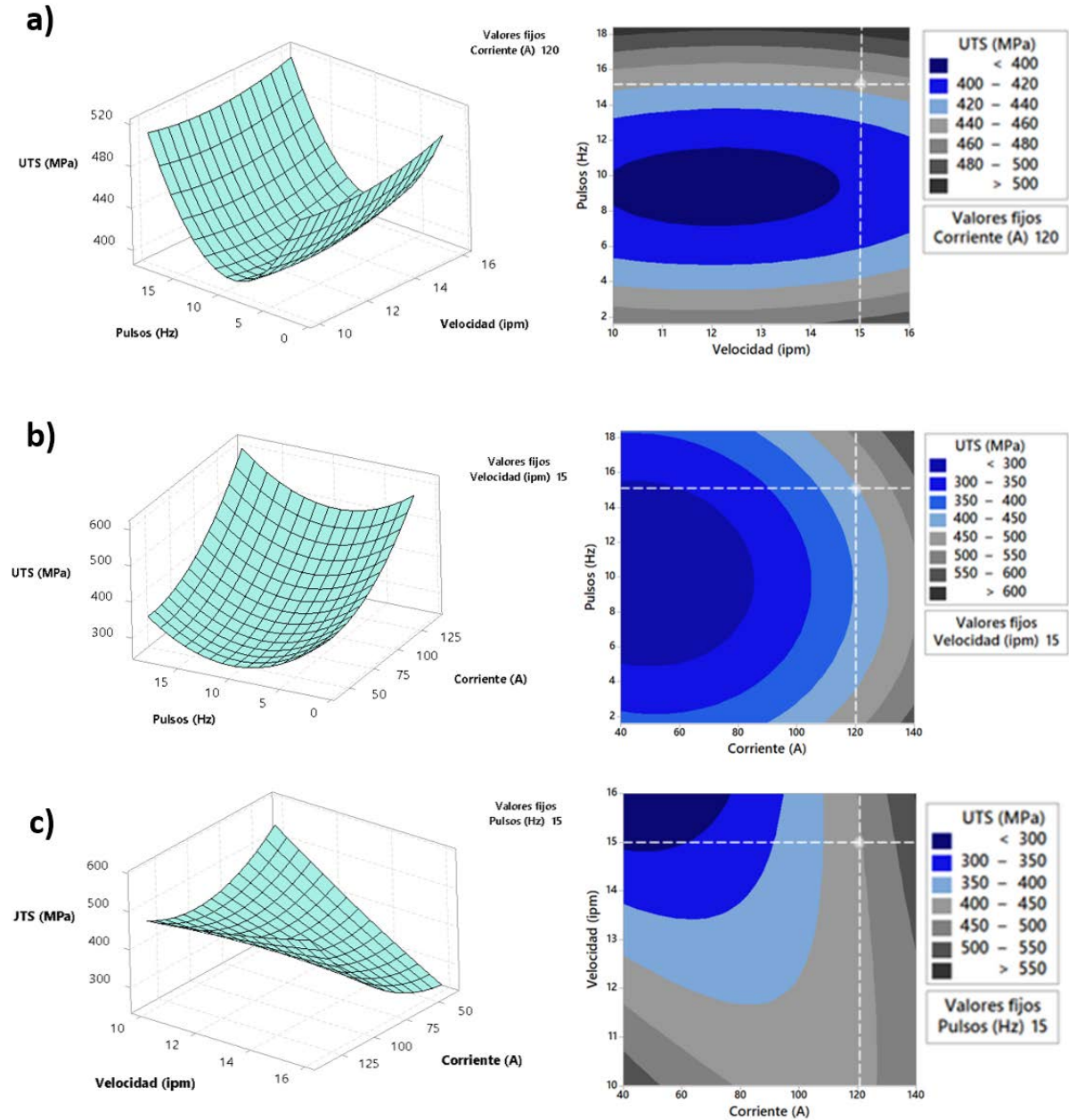
**Tabla 4.9** Análisis de varianza de la regresión  $Ng$  vs  $Cw$ ,  $Sw$ ,  $Ps$ 

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Error	10	13.8841	1.38841		
Falta de ajuste	5	12.3308	2.46616	7.94	0.020
Error puro	5	1.5533	0.31067		
Total	19	25.7775			

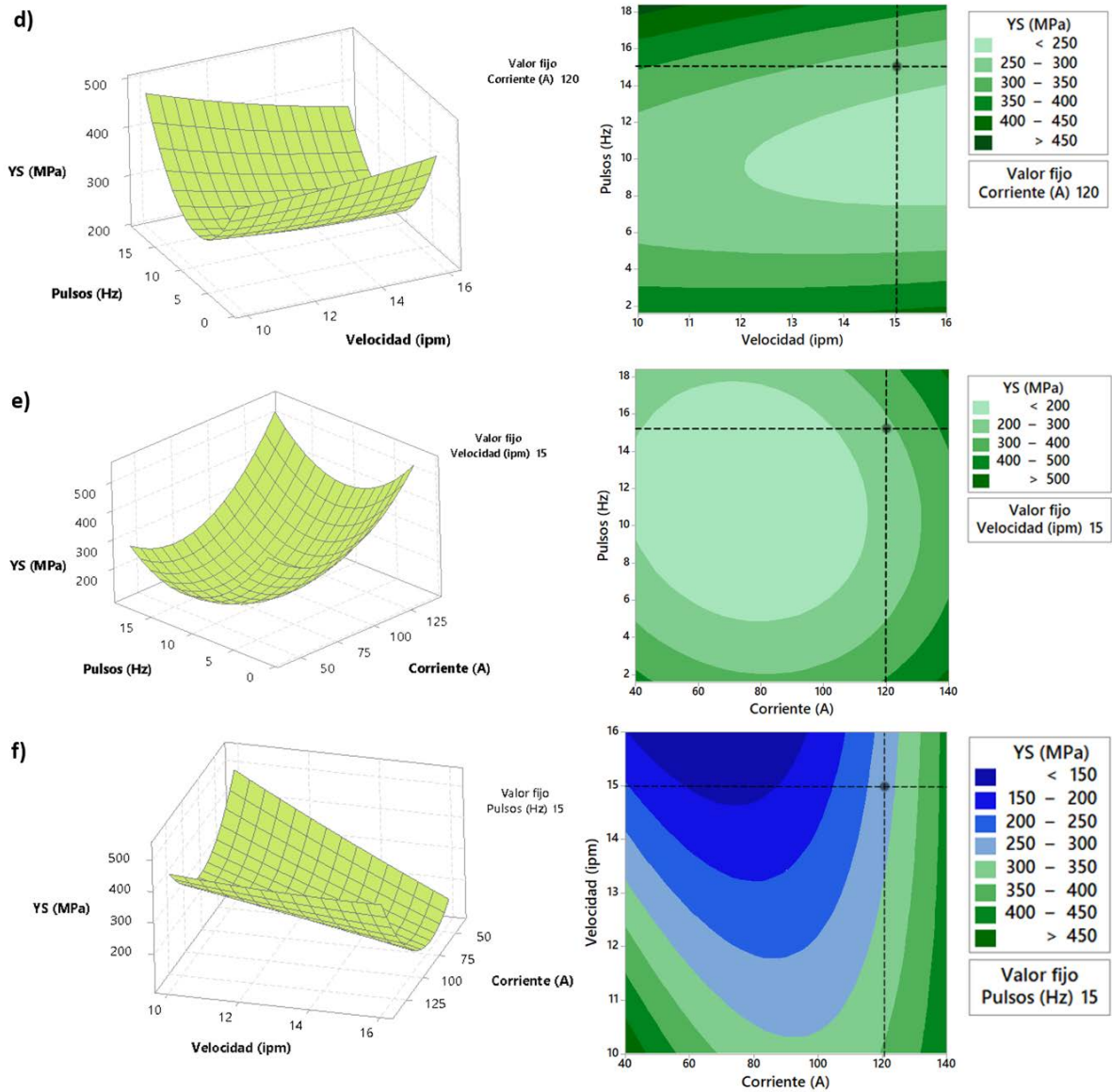
#### 4.4.2 Superficie de respuesta

Con las respuestas promedio de la experimentación se lograron construir las topologías mediante metodología de superficie de respuesta [57], esto sirvió para determinar gráfica y numéricamente los puntos optimizables logrando acotar a un rango más estrecho la combinación de parámetros de soldadura multicitados.

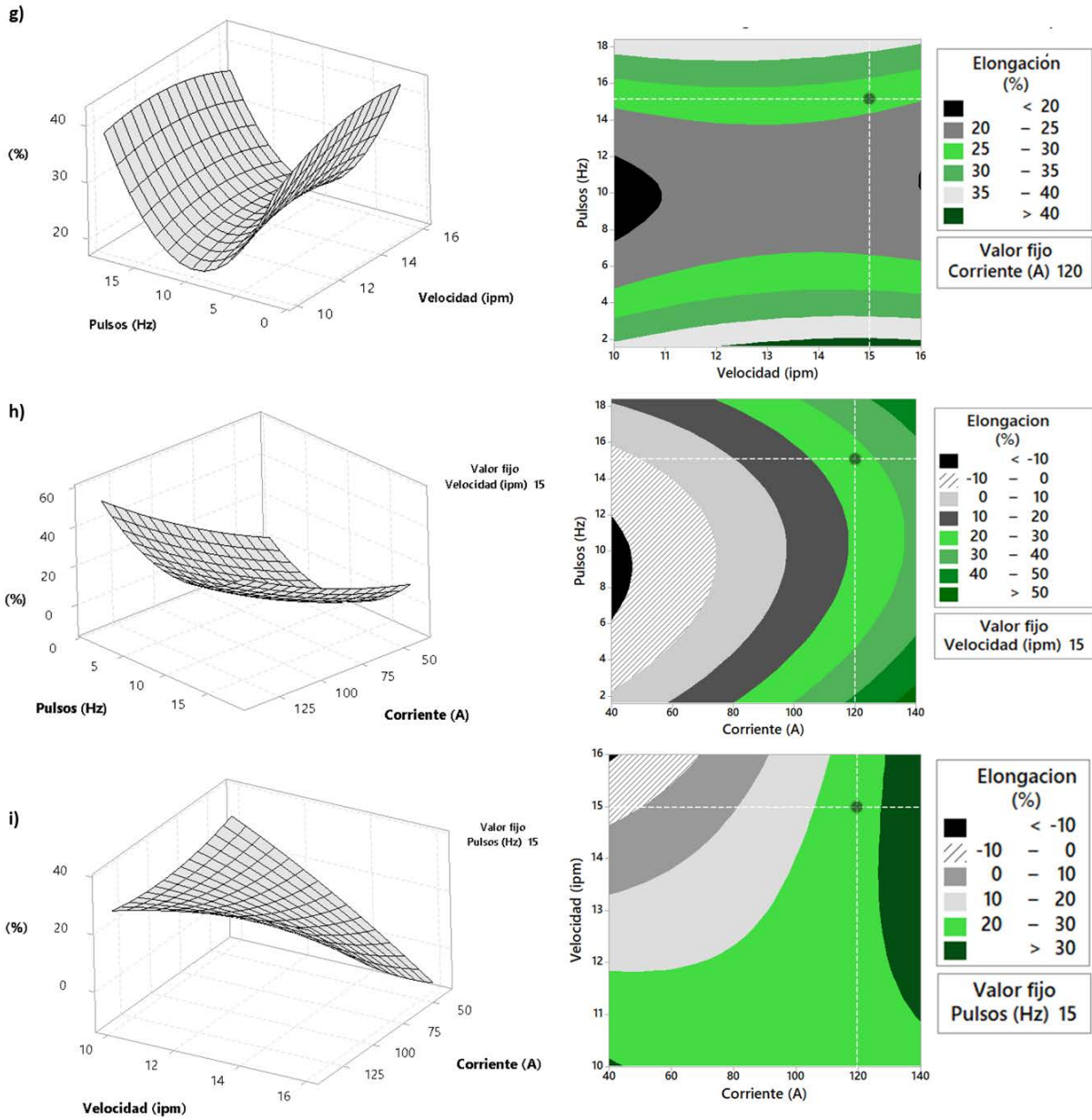
La resistencia máxima a la tensión fue la primera respuesta evaluada y aquella que tuvo un comportamiento estadístico no deseado. Las gráficas de superficie de respuesta y de contorno con respecto a la variables de entrada demuestran **grosso modo** que, los valores centrales del diseño de experimentos no ideales para este tipo de soldadura, pero si los valores más altos, dicho de otra forma con corriente de soldadura  $\geq 120(A)$  (Figura 4.27a), velocidad  $\geq 15$  plg/min (Figura 4.27b), así como pulsos superiores a 15Hz (Figura 4.27c), se obtiene mejor resistencia máxima a la tensión, como es el caso de las probetas TIG8 y TIG 14.



**Figura 4.27** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de la resistencia máxima a la tensión: **a)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **b)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **c)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.

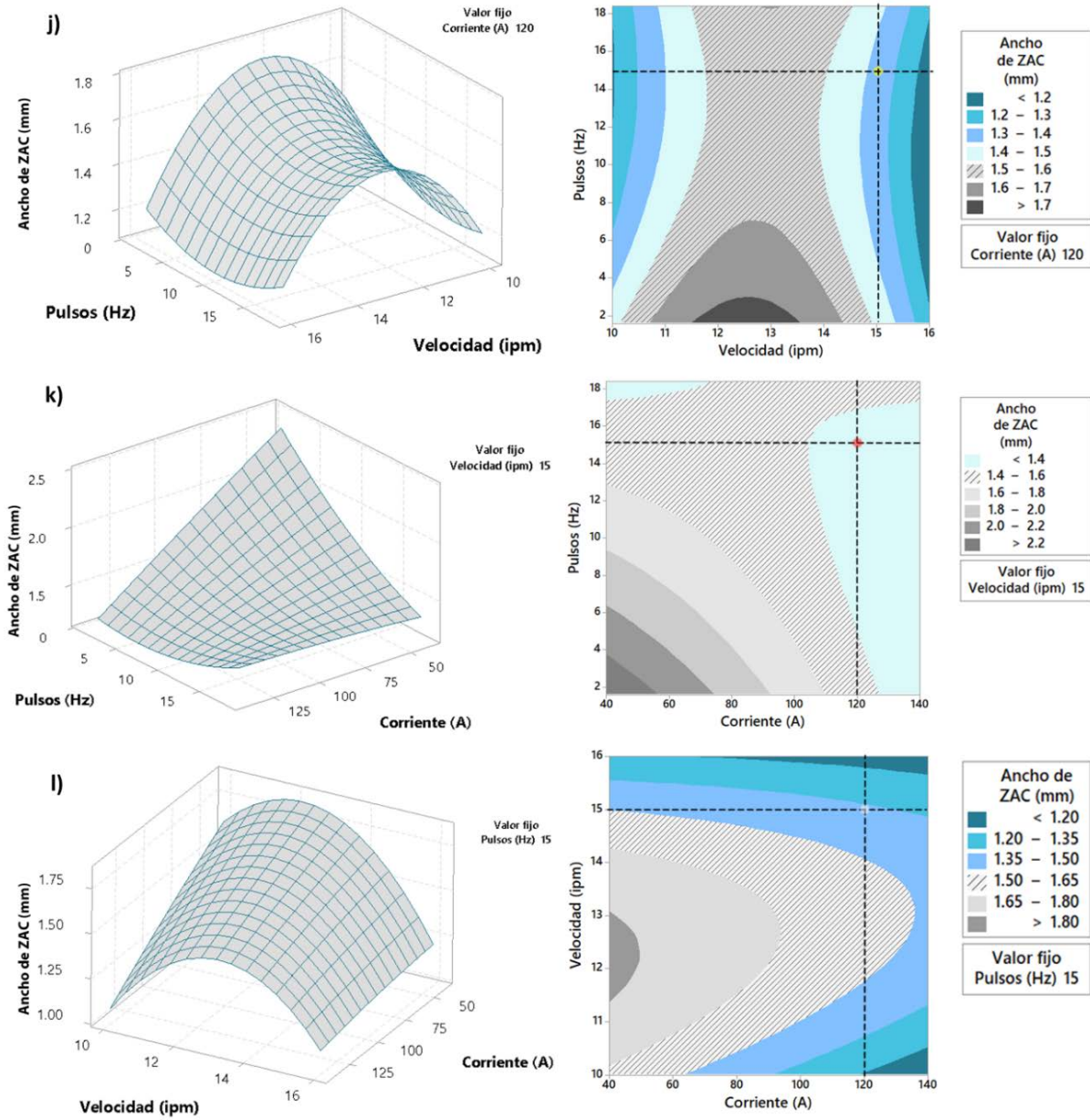


**Figura 4.28** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de esfuerzo de cedencia: **d)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **e)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **f)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.

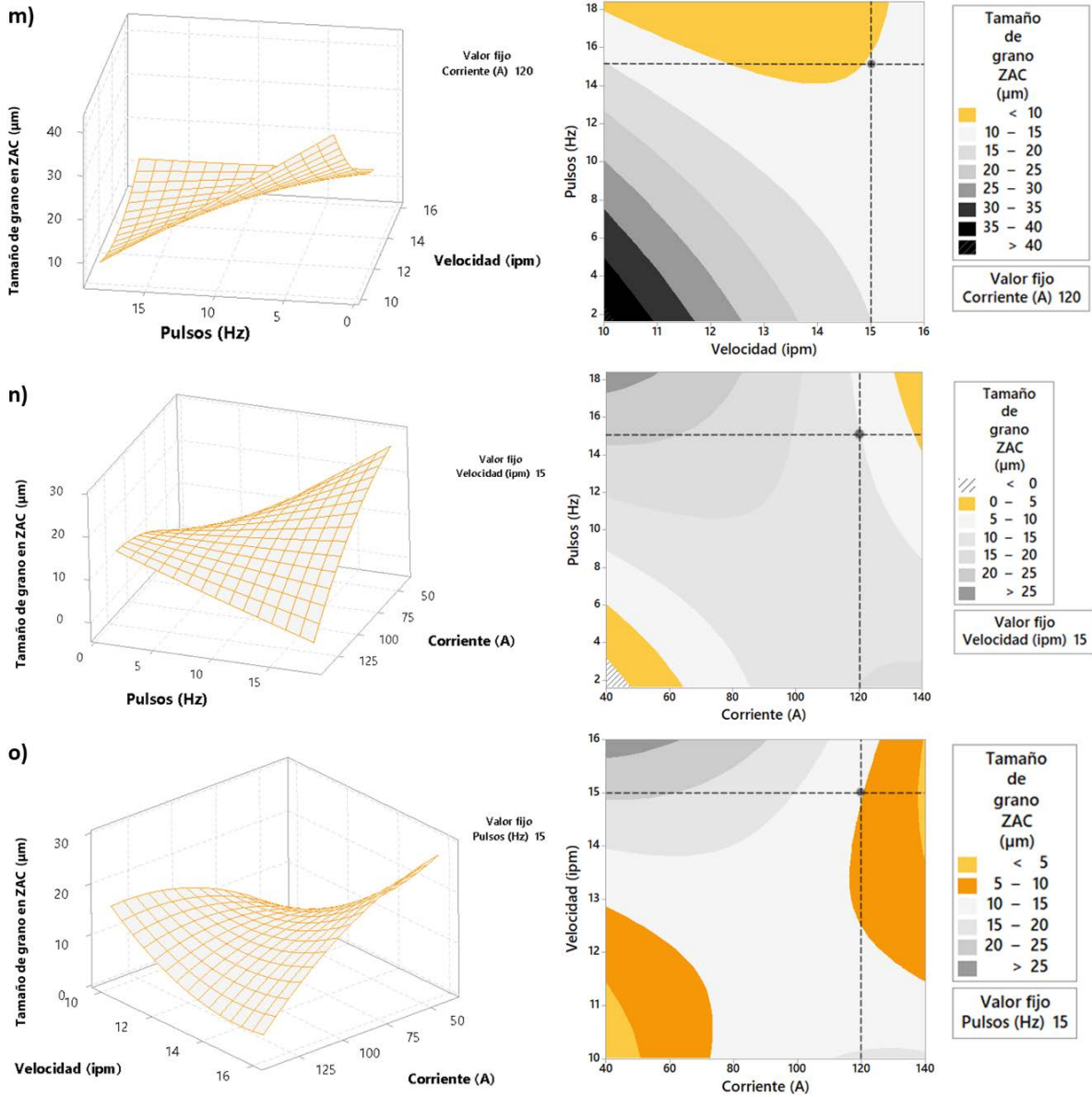


**Figura 4.29** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental de elongación: **g)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **h)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **i)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.



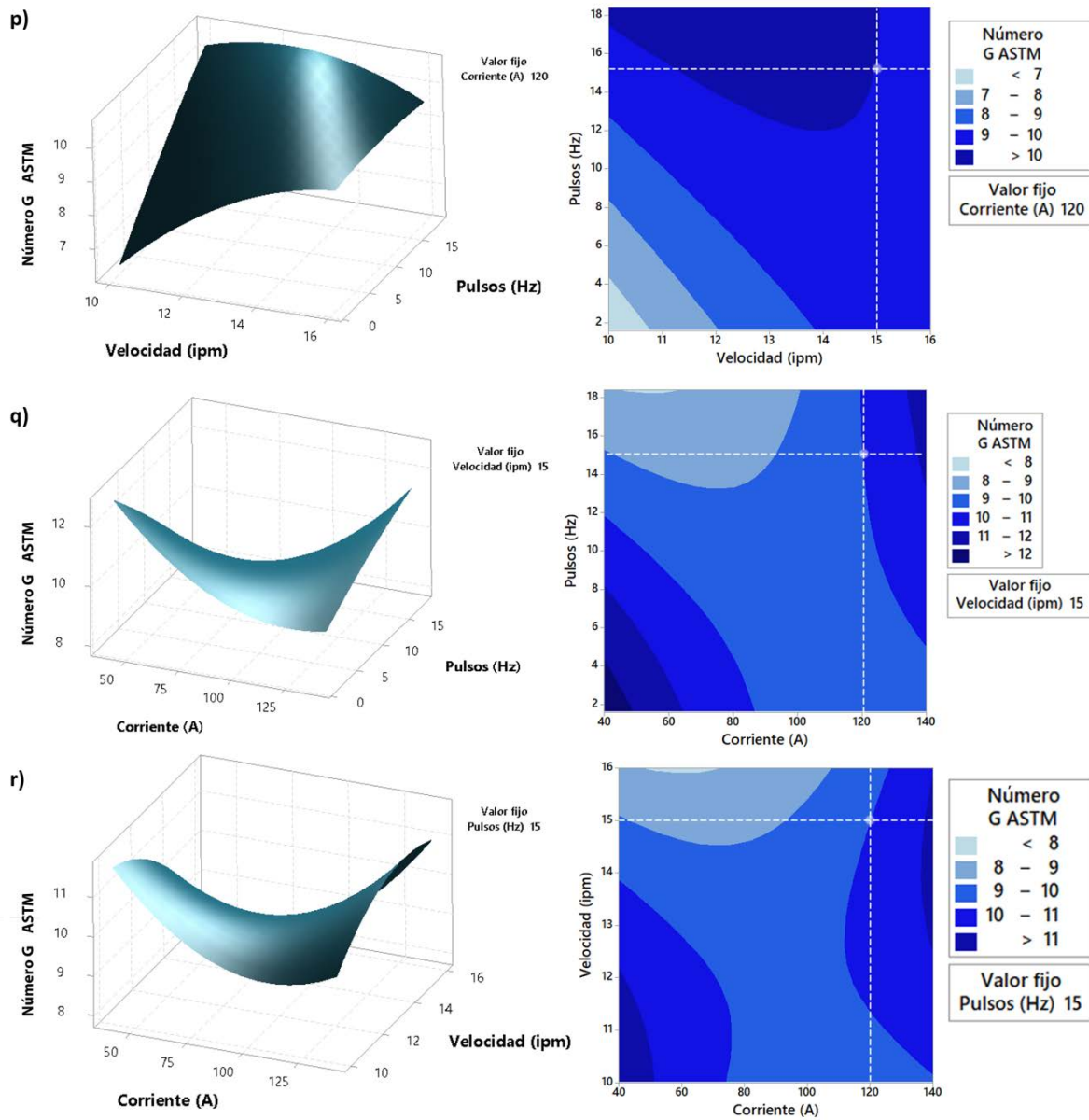


**Figura 4.30** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho de la ZAC: **j)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **k)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **l)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.



**Figura 4.31** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho del tamaño de grano en la ZAC: **m)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **n)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **o)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.





**Figura 4.32** Gráficas de superficie y contorno de la región experimental del ancho del número G ASTM: **p)** Pulsos vs velocidad con valor fijo de 120 A de corriente, **q)** Pulsos vs corriente con valor fijo de 15 plg/min de velocidad, **r)** Velocidad vs corriente con valor fijo de 15Hz de pulsos.

### 4.4.3 Redes neuronales

Una vez realizado el análisis estadístico, conocida la topología de las regiones experimentales, acotadas las combinaciones de parámetros de soldadura del estudio y teniendo las respuestas teóricas deseables, se alimentó la red neuronal como se ha descrito anteriormente, ya que la población muestra real experimental era muy pobre. Una vez realizada la inyección de datos reales y artificiales, se lograron determinar cinco combinaciones de parámetros con sus respectivas predicciones de respuestas optimizadas (ver tablas 4.10 y 4.11), estas, fueron seleccionadas con selección teórica [8], [56], [83], [84], [98], [100].

Las combinaciones de parámetros fueron cercanas a las probetas experimentales TIG 8 y TIG 10, y son aquellas que se mostraron en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.10** Combinaciones optimizadas de parámetros para soldadura robotizada GTAW entregadas por las redes neuronales

ID optimizado	Corriente de soldadura - $C_{ar}$ (A)	Velocidad (plg/min)	Pulsos (Hz)
Sm1	124.9	15.5	16.4
Sm2	133	14.9	13.4

**Tabla 4.11** Predicciones iniciales de respuestas de la combinación de parámetros, entregadas por las redes neuronales con selección teórica

ID optimizado	UTS	$Y_s$	Elongación (%)	Ancho de ZAC (mm)	Tamaño de grano en ZAC (mm)	Número G ( $\mu\text{m}$ )	$Q_{net}$	Fv
Sm1	494.1	335	32	1.2	9.2	1.5	M	$\leq 1.20$
Sm2	478	333	29.9	1.3	7.6	10	A	$\geq 1.21$

Estas combinaciones se filtraron nuevamente contra variables categóricas teóricas, tales como distorsión de la lámina por aumento en el calor de entrada, socavado por la recristalización, así como respaldo superior al 20% del espesor de la lámina. Este último fue disperso debido a que se les dio acceso libre las redes neuronales a la base de datos SQL para que se alimentaran y ello generó esa polarización, que se resolvió con error cuadrático medio. Las combinaciones seleccionadas se representan gráficamente mediante la Figura 2.33 cuyos datos y detalles se encuentran en las Tablas 4.12 y 4.13.

Es importante señalar que, dentro del modelo de las redes neuronales, se generaron nodos correspondientes a Corriente Pico ( $C_P$ ), Corriente Base ( $C_b$ ), Corrección del arco ( $C_{X_{ar}}$ ) a fin de determinar un valor de la Corriente Aritmética ( $C_{ar}$ ) que es mostrada como variable del modelo de las redes. La relación de estas corrientes se expresa mediante la ecuación 4.1.

$$C_{ar} = \sum C_b + C_p \times X_{ar} \quad (4.1)$$

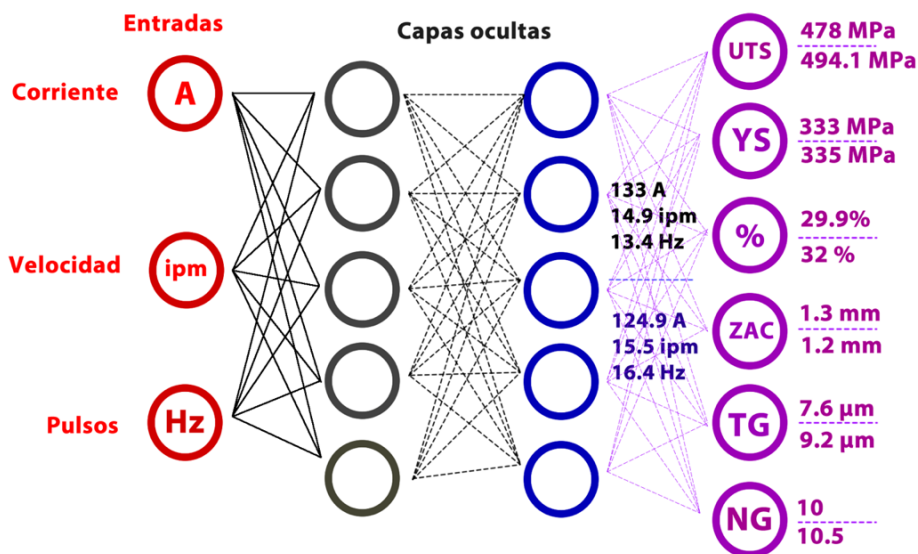
Del modelo y las respuestas obtenidas, se logró determinar que existen dos posible combinaciones de parámetros óptimas, una físicamente real y otra que solo puede comprobarse mediante experimentación. La primera corresponde a la combinación  $Sm_1$ , que puede ser, en términos físicos posible, toda vez que se encuentra cercana a los parámetros ejecutados en la experimentación y dentro de parámetros utilizados por la industria, que han sido probados en experimentaciones del presente estudio. La segunda combinación es un tanto temeraria, toda vez que cruza los límites de experimentaciones, literatura y experiencia industrial. Por lo que resulta difícil aseverar que los resultados pueden ser físicamente reales. Las combinaciones de estas relaciones de parámetros se muestran en las tablas 4.12 y 4.13.

**Tabla 4.12** Combinaciones de parámetros explicitando la corriente de soldadura y predicciones de las redes neuronales optimizadas

ID optimizado	Corriente pulsada de soldadura (A)			Velocidad (plg/min)	Pulsos (Hz)
	Corriente Base (C <sub>b</sub> )	Corriente Pico (C <sub>p</sub> )	Corriente Aritmética (C <sub>ar</sub> ) con Corrección del arco (X <sub>ar</sub> ) 17.2 %		
Sm1	67.33	79.04	124.9	15.5	16.4
Sm2	71.7	84.17	133	14.9	13.4

**Tabla 4.13** Respuestas optimizadas obtenidas de las predicciones de las redes neuronales

ID optimizado	UTS	Ys	Elongación (%)	Ancho de ZAC (mm)	Tamaño de grano en ZAC (mm)	Número G (μm)
Sm1	494.1	335	32	1.2	9.2	10.5
Sm2	478	333	29.9	1.3	7.6	10



**Figura 4.33** Representación gráfica de las redes neuronales y selección de predicciones. Elaboración propia ®

Se puede observar que la combinación 1 (Sm1) predicha por las redes neuronales artificiales de 124.9 A de corriente de soldadura, 15.5 Hz de pulsos y velocidad de 16.4 plg/min **es la óptima para soldadura robotizada sin metal de aporte con técnica GTAW-P en lámina de acero inoxidable ferrítico AISI 430 de 1.5 mm de espesor** y encuentra su validación con gráficas de contorno de la región experimental (Figuras 4.27 a 4.32), siendo muy cercana a la combinación TIG 8 (120 A, 15plg/min, 15Hz) pero lejana positivamente en sus resultados, toda vez que las respuestas mecánicas se ven favorecidas acercándose más a las características del metal original, reduciendo el tamaño de grano en la ZAC un 14.9% equivalente a una reducción de 1620  $\mu\text{m}$  con respecto a la corrida TIG 8 que, experimentalmente fue la mejor. El calor de entrada teórico para esta combinación un  $Q_{\text{net}}$  medio (teniendo como 10.5 V y una distancia entre la pieza de trabajo 1.75 mm) obteniendo una fracción volumétrica de martensita intergranular teórica menor a 0.1 con base en los datos experimentales, sin presencia de deformación en la lámina.

Mientras que la combinación 2 (Sm2) predicha por las redes neuronales artificiales (133 A, 14.9 plg/min y 13.4 Hz) resulta en una optimización de la resistencia máxima a la tensión de 5% con respecto a la probeta TIG 8 y logrando una reducción en el tamaño de grano en la ZAC del 28% con respecto al tamaño de grano de esta última cuyas características microestructurales son las mejores de toda experimentación.

Estas combinaciones seleccionadas junto con el análisis de resultados y consideraciones teóricas propias de la soldadura, permitió la simulación de las respuestas optimizadas predichas por las redes neuronales artificiales.

Derivado de la evaluación anterior la combinación óptima de parámetros de soldadura robotizada GTAW-P sería 124.9 (A), 15.5 (plg/min), 16.4 (Hz), cuyos detalles se encuentran vertidos en la tabla 4.14

**Tabla 4.14** Combinación óptima de parámetros, obtenida de ANN para modelar y simular unión soldada

Parámetros optimizados						
ID optimizado	Corriente pulsada de soldadura (A)				Velocidad (plg/min)	Pulsos (Hz)
	Corriente Base (C <sub>b</sub> )	Corriente Pico (C <sub>p</sub> )	Corrección del arco (X <sub>ar</sub> ) %	Corriente Aritmética (C <sub>ar</sub> )		
Sm1	67.33	79.04	17.2	124.9	15.5	16.4
	Respuesta optimizada					
	UTS (Mpa)	Ys (Mpa)	Elongación (%)	Ancho de ZAC (mm)	Tamaño de grano en ZAC (mm)	Número G (µm)
494.1	335	32	1.2	9.2	1.5	

Ángulo de la antorcha a 90°, trayectoria de empuje, valores fijos de frecuencia de 1.5 seg, distancia de trabajo 1.75 mm, voltaje de soldadura 10.5 V, gas de protección de atmósfera Ar del 99.9% industrial a 12 L/min sin gas de respaldo, sobre placa de acero HSLA.

#### 4.4.4 Simulación de respuestas optimizadas

##### 4.4.4.1 Simulación de propiedades mecánicas

El software desarrollado para simulación de resistencia mecánica logró entregar cuatro pares de datos para lograr la simulación, de las curvas esfuerzo deformación de dos especímenes teóricos. Estos pares correspondieron a S-e y esfuerzo desplazamiento respectivamente, tal como se observa en la figura 4.34 y en la tabla 4.15.

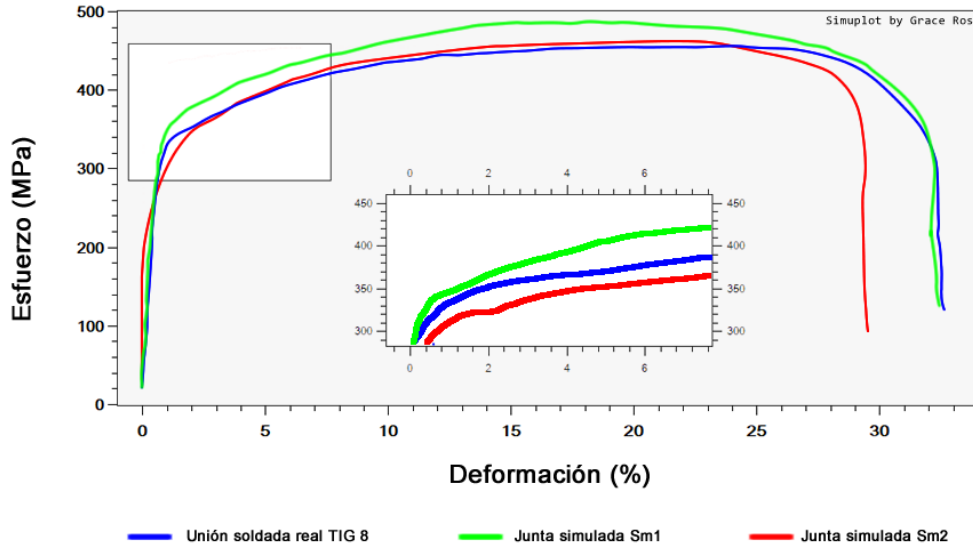


**Figura 4.34** Pares de datos obtenidos del software desarrollado® para simulación de curva S-e. Elaboración propia ®

**Tabla 4.15** Resumen de los datos entregados por el software desarrollado para la simulación de resistencia mecánica optimizada.

Simulación	Deformación (%)	Esfuerzo (MPa)	ID Simulación	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo (MPa)
Sm1	987 filas	987 filas	SM1	987 filas	987 filas
Sm2	678 filas	678 filas	SM2	423 filas	423 filas

Con base en los pares de datos se lograron graficar las curvas S-e (Figura 4.35) de forma comparativa con la obtenida de las uniones soldadas simuladas con respecto a la corrida experimental real TIG 8 cuya resistencia máxima, esfuerzo de cedencia y elongación (en los tres casos) fueron las mejores experimentalmente estando por encima del mínimo especificado en el estándar ASTM A240 [98].



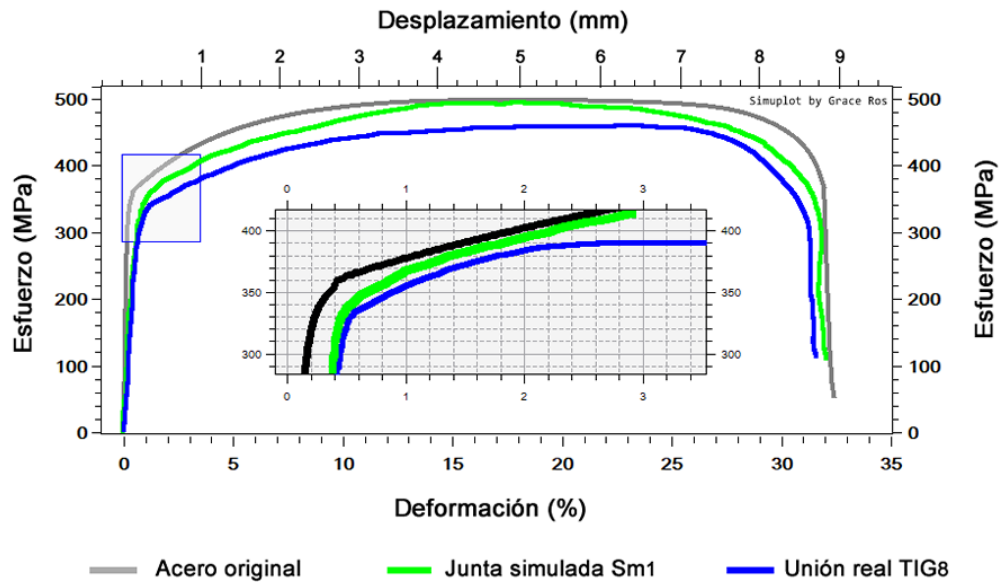
**Figura 4.35** Gráfica S-e de la probeta experimental TIG 8 y las simulaciones Sm1 y Sm2 de parámetros optimizados. Elaboración propia ®

Este análisis mediante simulación permitió determinar que la combinación Sm1 (124.9 A, 15.5 Hz, 16.4 plg/min) es la combinación óptima [101], [102], [103], [104], logrando una diferencia del 0.75% con respecto a la resistencia máxima a la tensión del metal original y por encima de la probeta TIG 8 que se encuentra un 8.17% por debajo de las condiciones del metal sin soldar (Figura 4.36)

La resistencia la cedencia tuvo una mejora de 2Mpa con respecto a la probeta experimental TIG8 y la elongación está tan solo 0.4% por debajo del metal original y 0.9% por encima de la mejor condición de la experimentación, estos comportamientos se pueden observar en la Figura 4.36.

Estos resultados superaron los reportados por Gurrana et al [60] y los establecidos por el estándar ASTM A240 [98].





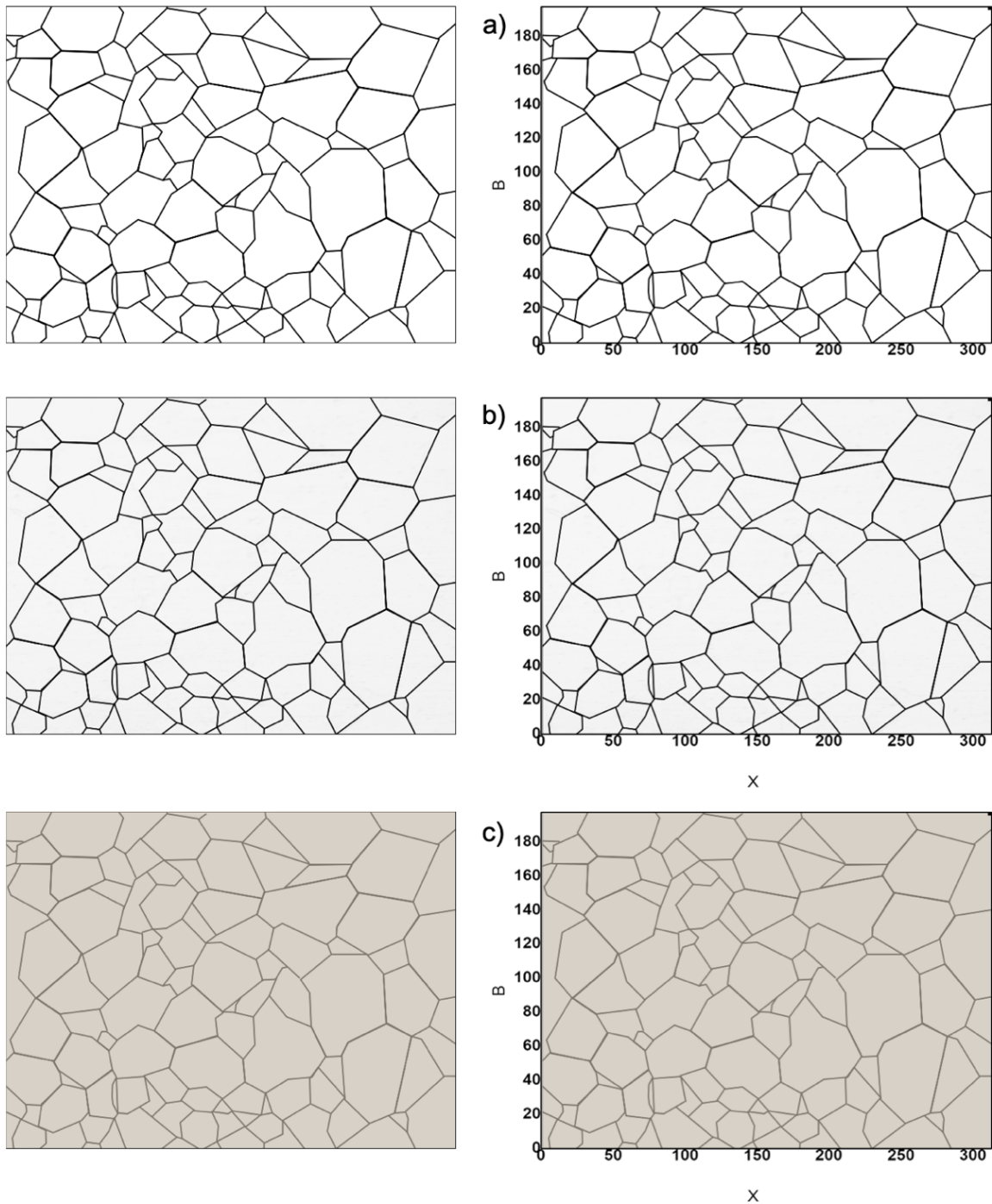
**Figura 4.36** Gráficas esfuerzo deformación del metal original, mejor probeta experimental y mejor combinación optimizada por redes neuronales. Elaboración propia ®

#### 4.4.4.2 Simulación de microestructural

El trabajo de Montayo y su módulo de software desarrollado en Matlab denominado “Microestructura1” [20, p. 82], sirvió para determinar los puntos de posible nucleación de los polígonos de Voronoi que sirvieron para hacer la evolución geométrica con la cual se logró emular la microestructura ferrítica de la ZAC reducida [105], [106] y por lo tanto optimizada con mínima presencia de segundas fases tal como martensita intergranular.

La evolución geométrica se dio de los puntos de nucleación de polígonos de Voronoi descritos en capítulo anterior (Figura 3.37a), posteriormente se logró generar la región de Voronoi que se muestra en la Figura 4.32a, cuyas geometrías representan los límites de grano en líneas negras en un área de  $61,870.39 \mu\text{m}^2$  (Figura 4.37b), de los granos ferríticos optimizados o reducidos de la ZAC para la condición Sm1, posteriormente la región gris (Figura 4.37c) y el color base (figura 4.37c) determinaron las profundidades de los valles y la altura de las crestas de los

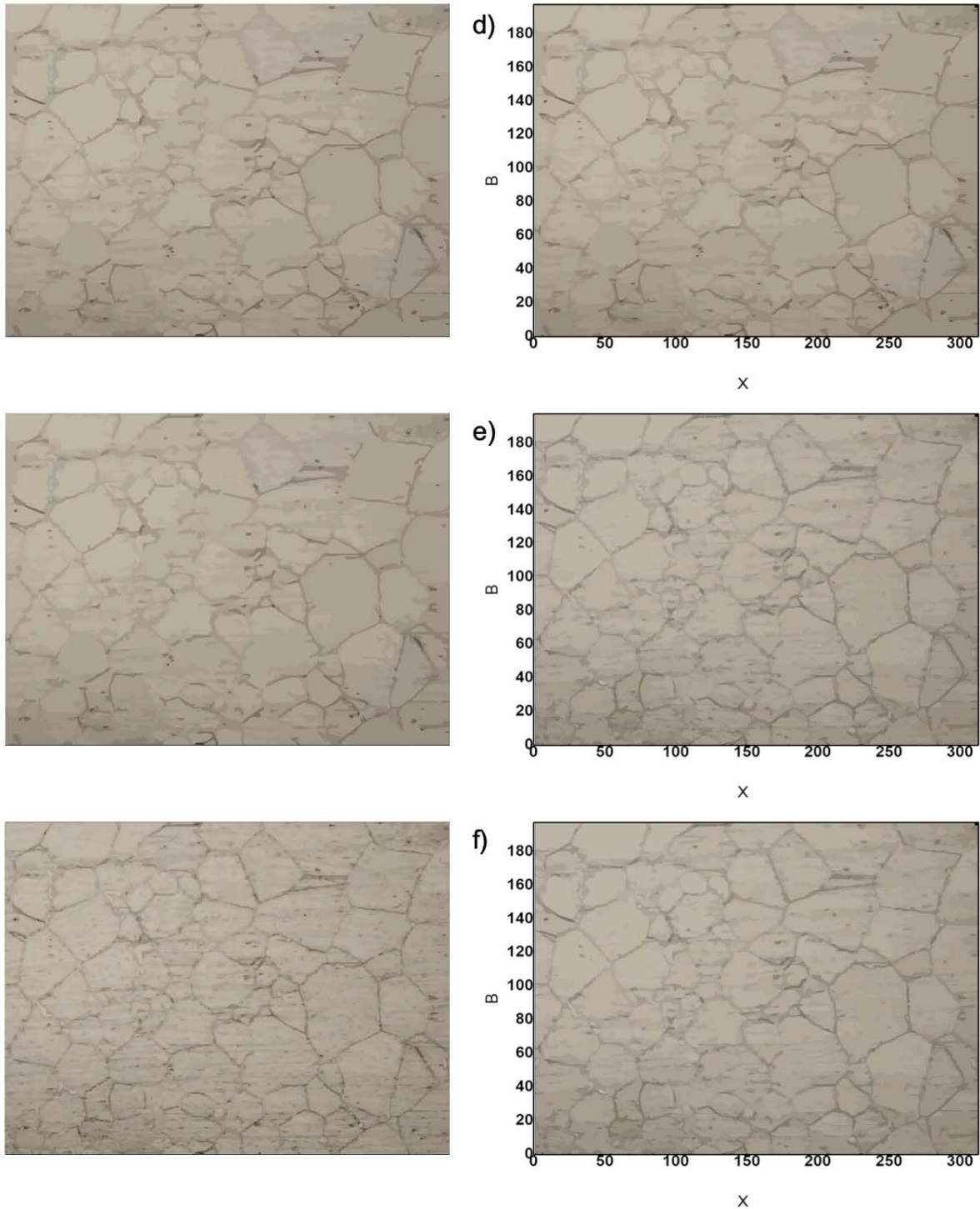
granos ferríticos cuyas topologías se encuentran embebidas en la imagen por medio de código en los ejes X (312.7927  $\mu\text{m}$ ) Y (198.8  $\mu\text{m}$ ), a fin de lograr



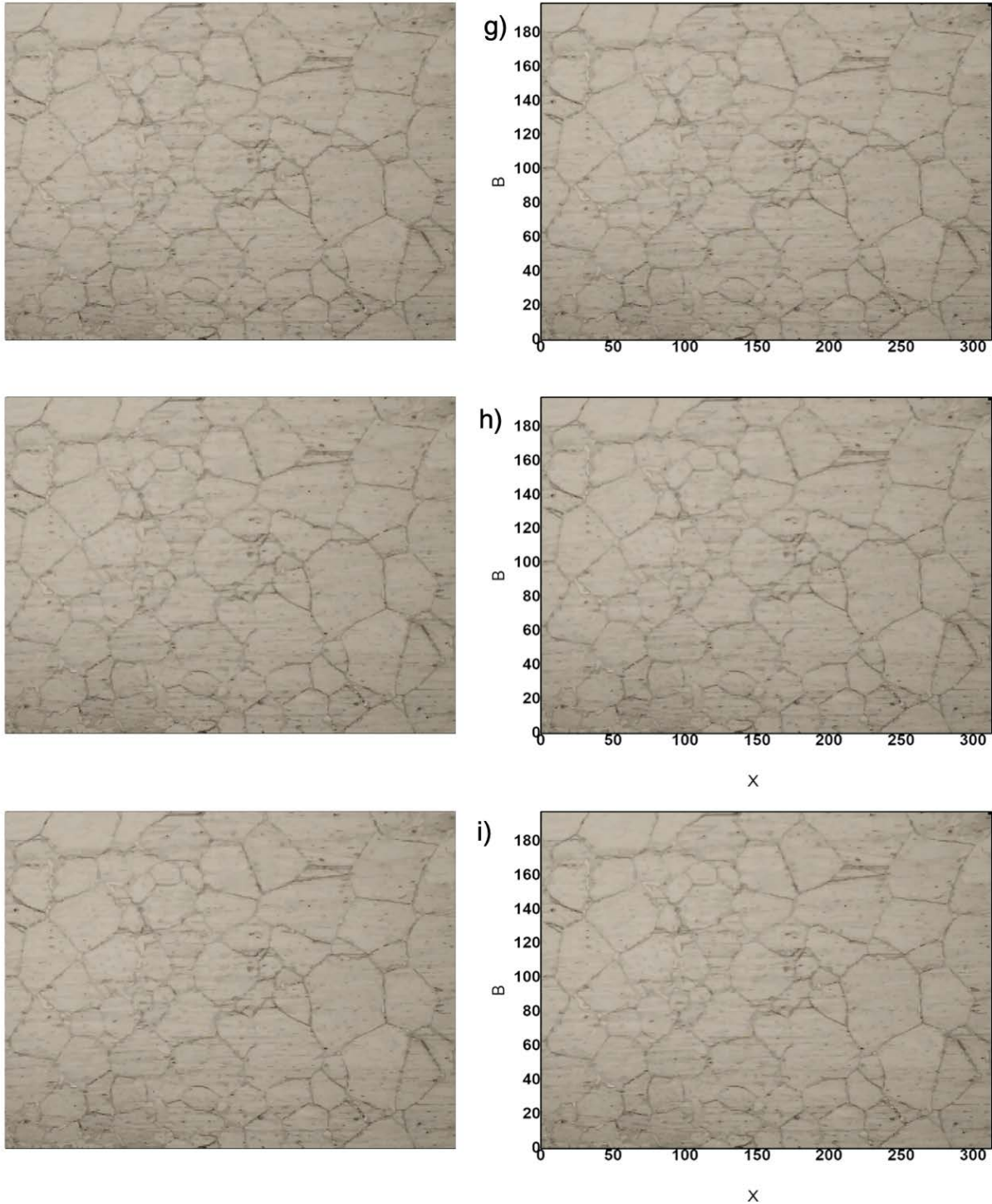
**Figura 4.37** Evolución geométrica de la región de Voronoi para la simulación de estructura ferrítica optimizada, donde los límites de grano se observan burdos. Elaboración propia ®

La simulación de la microestructura de granos ferríticos de la ZAC reducidos de tamaño, fue exitosamente realizada con mediante el algoritmo de corte gráfico definiendo las estructuras de ferrita gruesa (figura 4.38d), mientras que los delicados cambios de color en los límites de grano (Figura 4.38e) derivados de algoritmo *mean shift clustering* [65], [91], se aplicaron de forma correcta, de igual manera las texturas programadas mediante *pixel intensity clustering* [92] (Figura 4.38f) así como las segundas fases que se simularon lograron semejanza con las micrografías reales de la experimentación mediante estilismo (Figura 4.39 g-i).

Esto significa que la microestructura que emula la ZAC optimizada [106] contiene granos ferríticos reducidos en comparación con los de la experimentación, tal como se observa en la Figura 4.40 donde se compara la micrografía de la ZAC de la probeta TIG 8 con la simulada, que logra un aspecto aceptable.

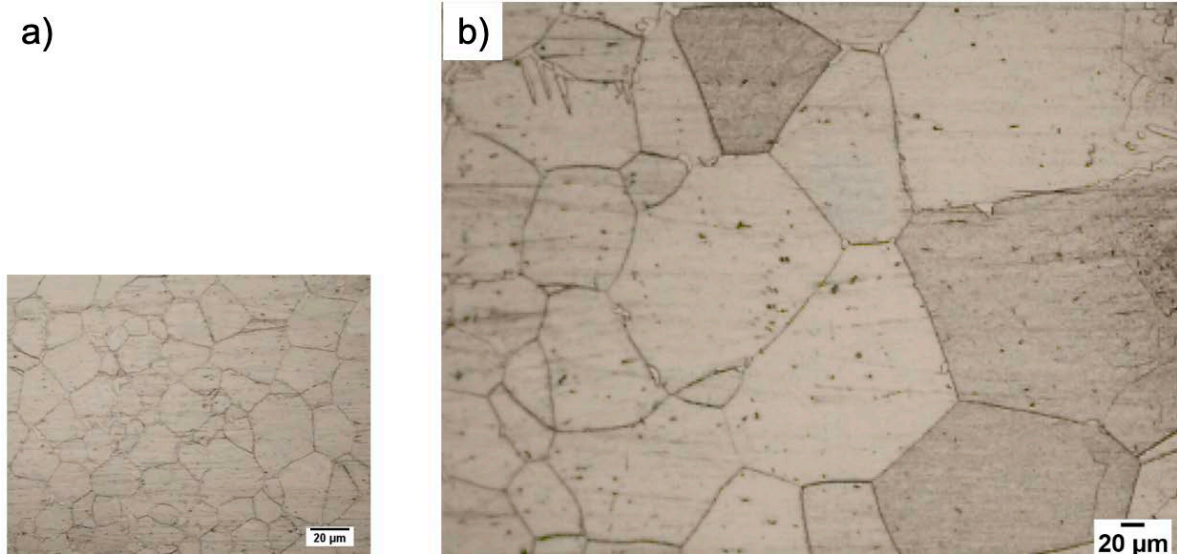


**Figura 4.38** Evolución de los algoritmos de procesamiento digital, donde se observa la aplicación de colores reales obtenidos de micrográficas y estilización de la región de Voronoi. Elaboración propia ®



**Figura 4.39** Evolución del procesamiento digital sobre la microestructura simulada, donde se incluyeron segundas fases, texturas y colorimetría semejantes a las reales observadas por microscopía óptica. Elaboración propia ®

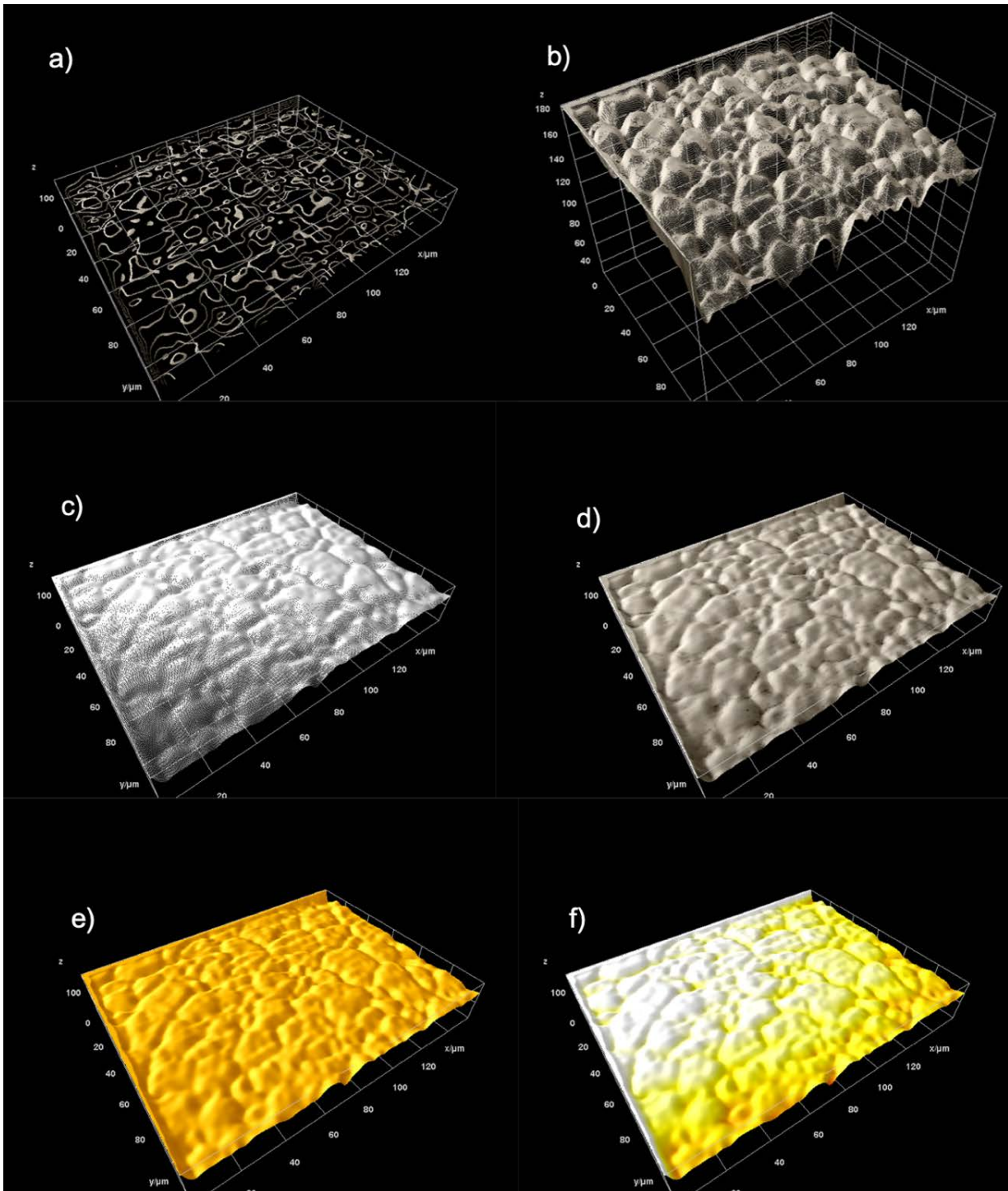




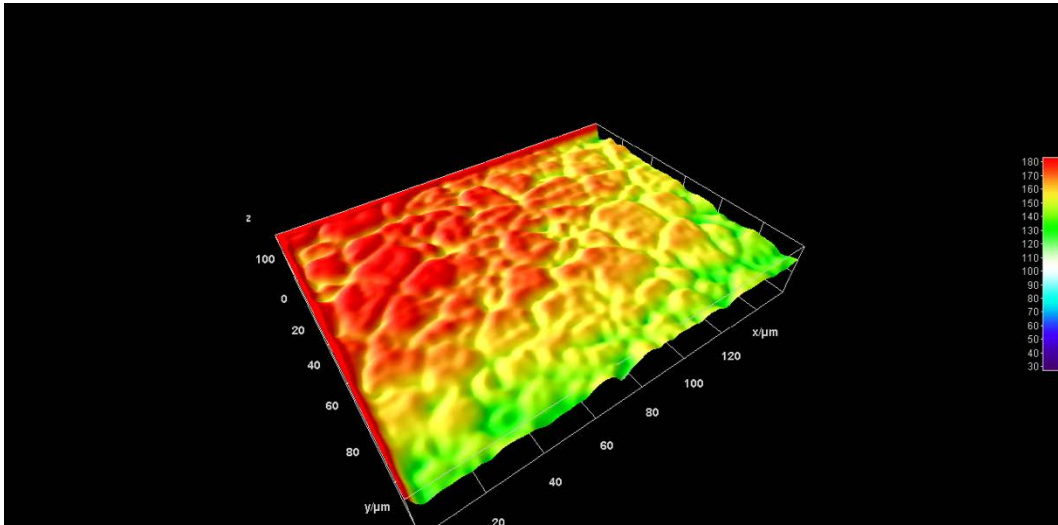
**Figura 4.40** Comparativa de: a) la imagen obtenida por medio de simulación y b) micrografía del espécimen TIG 8 experimental. Elaboración propia ®

La aplicación de los algoritmos de procesamiento digital de imágenes [65] sobre la imagen de microestructura simulada y código embebido en ella (Figura 4.41a), resultó positiva, incluso detectando errores en los bordes de la imagen que al ojo humano de la autora no fueron posibles detectar, así mismo, se lograron obtener crestas y valles propios de especímenes de soldadura robotizada en acero inoxidable ferrítico sin metal de aporte con técnica GTAW-P (Figura 4.41 b-f), así como texturas propias y cuya comparación se muestra en la Figura 4.40).

Esta evolución geométrica a partir de la aplicación de programación entorno a la geometría y algoritmos de procesamiento digital de imágenes no solo resultó cercana a la realidad, también se logró obtener que la topología obtenida de la imagen simulada, mostrará los granos ferríticos engrosados más cercanos al metal fundido [105] de la soldadura tal como se observa en la Figura 4.42.



**Figura 4.41** Test en 3D por PDI de la micrografía simulada en 2D, donde se logró el relieve propio de la ZAC de una unión soldada, con un defecto de borde; a) región vectorizada, b) extrusión de granos ferríticos simulados, c),d) evaluación de topología, e) rugosidad y f) simulación de mayor tamaño de grano por calor.



**Figura 4.42** Micrografía de la ZAC simulada que muestra granos ferríticos gruesos y en color rojos aquellos que emulan estar más cercanos al metal de soldadura.

## 4.5 Correlación de resultados

La combinación óptima de los parámetros de soldadura por fusión de veinte uniones soldadas robóticas GTAW-P se logró mediante la condición TIG8 con la combinación de parámetros de soldadura medios (120 A de corriente de soldadura, frecuencia de arco pulsado de 15 Hz y 15plg/min de velocidad de soldadura ) ya que alcanzó una fusión y penetración completas del metal fundido, mejor rendimiento mecánico bajo tensión, es decir, una resistencia a la tracción máxima de 457 MPa, un límite elástico y valores de alargamiento cercanos a estas propiedades del acero inoxidable 430 recibido.

Además, mostró un endurecimiento adecuado del metal fundido. Todos estos estaban unidos por ferrita alotriomórfica en la ZAC recristalizada con un ancho reducido de 1,43 mm (12%) y un tamaño de grano moderado (10,84 μm), y Widmanstätten secundario de placa lateral de ferrita dentro del metal fundido. Este comportamiento metalúrgico se atribuyó a la entrada de calor medio (0.168 kJ / mm).



El efecto de los valores medios de la entrada de calor de soldadura se observa en las zonas microestructurales y las propiedades mecánicas, ya que el ancho y el tamaño de grano de la ZAC aumentaron ligeramente con el incremento del calor, así como mejoraron la resistencia a la tracción final e indujeron moderado endurecimiento del metal fundido.

Sin embargo, los valores de  $Q_{net}$  más altos (0.280 kJ / mm) indujeron un notable crecimiento de grano con el mayor tamaño de grano (39.22  $\mu\text{m}$ ) y la dureza Vickers más baja en la ZAC (175 HV), como se puede ver en la corrida TIG 2 con frecuencia de arco pulsada media (5 Hz).

Con respecto a la unión, TIG10 mostró el ancho de ZAC más bajo, así como el tamaño de grano promedio, las fases endurecidas como la martensita intergranular y la ferrita poligonal, lo que resultó en el segundo lugar de los valores de UTS y el mayor endurecimiento dentro de la ZAC recristalizada, como consecuencia del mayor calor entrante. (0.242 kJ / mm) derivado de la mayor corriente de soldadura (140 A), arco de pulso medio (10 Hz) y velocidad media de soldadura (13 plg / min). Sin embargo, todos estos resultados metalúrgicos produjeron una distorsión térmica en la unión soldada durante el proceso de enfriamiento de la soldadura, afectando su calidad.

Los perfiles de dureza Vickers de las uniones soldadas robotizadas GTAW-P fueron influenciados por la frecuencia de arco pulsado, porque para valores mayores (15 Hz) generaron una microdureza promedio mayor de 293 y 216 HV para el metal fundido y la ZAC, respectivamente para la unión TIG8, relacionada con la entrada de calor medio (0.168 kJ / mm). Mientras que para los casos de valores más bajos (5 Hz) favoreció decremento en la dureza Vickers de 228 y 175 HV en el metal de fusión y la ZAC, respectivamente para la unión TIG2 asociada con mayor  $Q_{net}$  (0.280 kJ / mm).

Además, este comportamiento de arco pulsado estaba relacionado con la combinación de los tres parámetros de soldadura discutidos.

De las anteriores disertaciones, se logró identificar la combinación ideal para este tipo de uniones soldadas sin metal de aporte, con base en ello, se analizaron los puntos óptimos teóricos y se logró la optimización de los parámetros de soldadura con sus respectivas predicciones por medio de redes neuronales, siendo la predicción SM1 la más apegada a las gráficas de superficie de respuesta y por lo tanto, la que físicamente puede comprobarse.

La correlación de los datos de caracterización de las veinte corridas experimentales GTAW-P robotizadas, así como los aspectos cualitativos y los cuantitativos con la programación de redes neuronales, desarrollo de software orientado a objetos y a la geometría, así como la relación de datos artificiales inducidos y aplicados en algoritmos de pixel clustering y corte gráfico fueron el cimiento del exitoso modelamiento y simulación de la unión SM1, que mostró una curva S-e ideal con resistencia máxima de 491 MPa y la microestructura de la ZAC simulada emuló los granos ferríticos gruesos más cercanos al cordón de soldadura.

Capítulo

# 5

## Conclusiones y recomendaciones

---

### 5.1 Conclusiones

La mejor combinación de parámetros de soldadura robotizada por fusión GTAW-P se logró con la condición TIG 8 corriente de soldadura de 120 A (61Cb/84Cp), velocidad de avance de 15 plg/min y arco pulsado de 15 Hz, ya que tuvo fusión completa del metal, teniendo un excelente desempeño en las pruebas mecánicas bajo tensión, mostrando una resistencia máxima a la tensión de 457 Mpa, esfuerzo de cedencia y elongación 4.3% y 4% menor que el metal sin soldar mostrando buena ductilidad, también mostró decremento del 60% en el calor de entrada teniendo como efecto un refinamiento de grano en la ZAC del 27% en comparación con la condición TIG2 (120 A, 11 plg/min, 5Hz). La condición TIG 8 tuvo cambios microestructurales benéficos, ya que se mostró tan solo el 0.8% de martensita en las micrografías, aunque si granos gruesos ferríticos en la ZAC.

El efecto de la velocidad de soldadura *per se*, se observa en el ancho de la ZAC, ya que con la combinación 90 A, 16 plg/min, 10 Hz, se logró reducir a 0.9mm, pero al no tener pulsos superiores a 15 Hz no logró fusión completa. Aunque los beneficios de esta se obtienen aumentando la corriente de soldadura, que es consistente con la literatura, los pulsos del arco o ambos en cuyo caso la combinación TIG 10 (140 A, 13 plg/min, 10 Hz) mostró el menor ancho ZAC.

La presencia de martensita intergranular se vio influenciada por el aumento en el calor de entrada, funcionó idealmente el método utilizado para cuantificarle.

La corriente superior a 140 A causó distorsión en la unión soldada durante el proceso de enfriamiento del metal de soldadura y presencia de martensita en la soldadura, aunque la resistencia mecánica estuvo dentro de los márgenes de seguridad establecidos en el estándar ASTM A240/A240M – 14.

Los perfiles de dureza se vieron influenciados por la frecuencia del arco pulsado, tal es el caso de las condiciones TIG2 (120 A, 11 plg/min, 5Hz) cuyo promedio de micro dureza en la ZAC fue de 175 y en la soldadura de 227.7, así como la condición TIG4 (120 A, 15 plg/min, 5Hz) que mostró promedios 206 HV en ZAC y soldadura. Estos perfiles contrastan con la condición TIG8 (120 A, 15 plg/min, 15Hz) que sus durezas promedio son de 216 Vickers para la ZAC y 293 Vickers para la soldadura.

El modelo de superficie de respuesta, fue adecuado para evaluar la experimentación y trazar la optimización cimentando el modelo de redes neuronales artificiales (ANN) con las que, se logró optimizar una combinación de parámetros que se valida con las superficies de respuesta de las regiones experimentales, así como se lograron predecir los valores óptimos de resultados en resistencia máxima a la tensión, esfuerzo de cedencia, elongación, Tamaño de Grano, Ancho de ZAC y número G para soldadura sin metal de aporte en acero inoxidable ferrítico de 1.5 mm de espesor. Este modelado permitió obtener resultados dentro de intervalos de confianza (>95%) en la combinación determinado como óptima 124.9 A, 16.4, 15.5 Hz de parámetros en soldadura robotizada, resultando el modelo satisfactorio, ya que

la resistencia máxima se encuentra 3 MPa por debajo del metal en condiciones originales y márgenes de seguridad establecidos por ASTM.

La programación orientada a objetos y a geometría funcionaron de manera exitosa para la simulación de respuestas de la unión optimizada así mismo se logró emular una microestructura con esa programación y las texturas y apariencias en 2D y 3D se lograron de manera significativa mediante el uso de algoritmos de corte gráfico y pixel clustering y otras técnicas mencionadas de PDI.

## 5.2 Recomendaciones

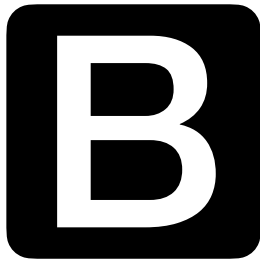
Se recomienda hacer pruebas experimentales sobre los parámetros determinados como combinación óptima para confirmar la validez del modelo, documentando en cada momento las variaciones de corriente pico y corriente base de acuerdo al equipo utilizado.

Así mismo, complementar el estudio con Microscopía electrónica de barrido y transmisión, análisis de fractura, metalografía a color y pruebas de ductilidad.

Sobre las muestras exploradas en este estudio, también es recomendable hacer estudios de corrosión en relación con la presencia determinada de martensita intergranular.

**NO** es recomendable reportar un solo valor de corriente para soldadura de arco pulsado, es recomendable hacer diseño de experimentos incluyendo corriente pico y corriente base GTAW-P.





# ibliografía

---

- [1] S. Novo (2013) “1961” [Internet]. Disponible en: <http://amediavoz.com/novo.htm>
- [2] AWS, *Chapter 5. Stainless And Heat Resisting Alloys*, en *Welding Handbook 9ª ed., Vol.4*, American Welding Society, Miami: Florida, 2011.
- [3] Gilet Jean-Yves (2007). “*La solución ferrítica*”, [Internet]. Disponible en: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF\\_The\\_Ferritic\\_Solution\\_Spanish.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_The_Ferritic_Solution_Spanish.pdf).
- [4] E. Bayraktar, J. Moiron, D. Kaplan, “Effect of welding conditions on the formability characteristics of thin sheet steels: Mechanical and metallurgical effects,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.175, pp 20–26, 2006.
- [5] M.O.H. Amuda, E. T. Akinlabi, S. Mridha, “Influences of Energy Input and Metal Powder Addition on Carbide Precipitation in AISI 430 Ferritic Stainless Steel Welds,” *Materials Today, Proceedings 4* p.p 234–243, 2017.
- [6] M. H. Cobb, *The History of Stainless Steel*, ASM International, Ohio: ASM International, 2010, pp 1-176, 235-239.

- 
- [7] M. Sarmiento Castillo, *El inox-color en la evolución de las vanguardias*, Tesis Ph.D, Universidad Complutense de Madrid: Madrid, 2016, pp. 9, 15-64, 106-108,118, 126, 205.
- [8] Akhilesh Kumar Singh, Vidyut Dey, Ram Naresh Rai, "Techniques to improve weld penetration in TIG welding (A review)," *Materials Today: Proceedings*, Vol.4, n.º 2, Part A, p.p 1252-1259, 2017.
- [9] M.O. Amuda, S. Mridha, "Grain Refinement in Ferritic Stainless Steel Welds: The Journey so Far," *Advanced Materials Research*, Vol.83-86, 2010, pp 1165-1172.
- [10] J. E. Gallo Chacón y V. A. Mero Mendoza, "*Estudio experimental de la soldabilidad en el acero inoxidable ferrítico AISI 430 con material de aporte austenítico mediante proceso de soldadura GTAW*" Tesis BA, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, 2017.
- [11] American Welding Society, *D1.6/D1.6M Structural Welding Code—Stainless Steel*, AWS, Miami, FL: (2007), p.p. 1-9,17-21, 24-74, 115-119, 126, 138-140,159, 223-251.
- [12] S. Tavares, L. Souza, T. Chuvas, C. Machado, B. Almeida, Influence of heat treatments on the microstructure and degree of sensitization of base metal and weld of AISI 430 stainless steel," *Revista Materia*, Suplemento, 2017, doi 10.1590/s1517-707620170005.0275.
- [13] K. Devendranath Ramkumar, Aditya Chandrasekhar, Aditya Kumar Singh, Sharang Ahuja, Anurag Agarwal, N. Arivazhagan, Arul Maxiumus Rabel, "Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.20, Part 1, 2015, pp, 54-69. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.09.008.



- [14] G. Mallaiah, A. Kumar, P. Ravinder Reddy, G. Madhusudhan Reddy, "Effect of cooper and aluminium addition on mechanical properties and corrosion behaviour of AISI 430 ferritic stainless steel gas tungsten arc welds," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol.2, n.º3, pp. 238-249, 2013. doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.009.
- [15] G. Mallaiah, P. Ravinder Reddy, A. Kumar, "Influence of Titanium Addition on Mechanical Properties, Residual Stresses and Corrosion Behaviour of AISI 430 Grade Ferritic Stainless Steel GTA Welds," *Procedia Materials Science*, Vol.6, pp. 1740-1751, 2014. Doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.204.
- [16] J. E. Raja-Dhas, S. J. Hexley Dhas, "A review on optimization of welding process", *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp 544-554, 2012. Doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.068.
- [17] P.K. Giridharan, N. Murugan, "Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.40, pp. 478-489, 2009. Doi: 10.1007/s00170-008-1373-0, 2009.
- [18] J. M. Vitek, Y.S. Iskander, E.M. Oblow, "Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks -- Part 1: Neural network development.," *Welding research*, Vol.1 de 2, *Suplement to the welding journal*, pp 33s-40s, 2000.
- [19] J. M. Vitek, Y.S. Iskander, E.M Oblow. "Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using artificial neural networks -- Part 2: Neural network results." *Welding Journal*, WELD J. 79, 2000.
- [20] I. M. Montayo Zuñiga, *Simulación de la recristalización en aceros BCC*, Tesis Ph. D, ESQUIE, Instituto Politécnico Nacional, México, 2010, pp1-14, 24-34, 37,41-43, 56,73, 76, 81 y 82.
- [21] J. C. Lippold, D.J Kotecki, *Welding metallurgy and Weldability of stainless steels*, New Jersey: Wiley-Interscience, 2005 pp. 1-20, 87-137.
- [22] D. Kotecki, F. Armao, *Stainless steels, welding guide*. Cleveland: Lincoln Electric Company, 2003, pp 2-14, 30, 32-34.

- 
- [23] M.O.H. Amuda, S. Mridha, "Comparative evaluation of grain refinement in AISI 430 FSS welds by elemental metal powder addition and cryogenic cooling," *Materials and Design*, Vol.35, 2012, pp. 609–618. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.066
- [24] ITEA, *Acero Inoxidable*, Instituto Técnico de la Estructura en Acero. España: ESDEP TOMO 22, pp.4-8, 11-17, 29-31,33.
- [25] UTDP (26 Julio 2012), "Metalografía" *Universidad Tecnológica de Pereira*, WordPress. [Internet]. Disponible en: <http://blog.utp.pedu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>.
- [26] AWS. *Welding Inspection Technology –WIT-* , 4a ed. American Welding Society, Miami: Florida, IHS, 2000, pp, 3-3, 6-11, 1-2 - 3-20.
- [27] T. Chator. *Aciers inoxydables: Generalités et vitesses de fissuration*. Clamart: EDF, Electricité de France, 1992, pp. 8-12-30, 34-36.
- [28] Real Academia de la Lengua Española, Diccionario de la lengua española, Vigésima Primera Edición (v15.0) ePUB v1.2, España: RAE, 2014, pp. 11342,11383,11415,11416,11418,11732,11718
- [29] J. Pérez Quiroz, J. Terán, E. Alonso, W. Martinez, M. Rendón, A. Torres, M. Martínez, "Determinación de la soldabilidad dentro de un acero inoxidable austenítico y un acero al carbono para aplicaciones estructurales," Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro: México, 2014, pp 2,5-11, 22-23.
- [30] Avner S. H., *Introducción a la metalurgia física*, México: Mc Graw-Hill, (1988) pp. 17-229, 260-273, 360-383.
- [31] R. Crookes Sheffield, "Decapado y Pasivado del acero inoxidable.," *Serie Materiales y sus Aplicaciones*, Vol.1 de 24. Editorial Euro Inox: Gran Ducado de Luxemburgo, 2004, pp. 2-16.
- [32] "Design & Execution Requirements for Production Weld Fixture (Metals)" Johnson Control Automotive Experience, Global Supplier Standards Manual, JCI GSSM Weld Fixture, 2015, pp.23-31.

- [33] M. Vasudevan, A.K Bhaduri, B. Raj, K. Prasad Rao, "Delta ferrite prediction in stainless steel welds using neural network analysis and comparison with other prediction methods," *J Mater Process Technol*, Vol.142, 2003, pp 20–28.
- [34] R. Sudhakaran, V. VeL Murugan, P.P.S. Sivasakthivel. et al., "Modeling and analysis of ferrite number of stainless steel gas tungsten arc welded plates using response surface methodology," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol.64, 2013, pp.1487-1504.DOI: 10.1007/s00170-012-4117-0
- [35] Lincoln Electric Company, *Guide de soudage. Apprenez à souder (LTW1)*, Cleveland OH: Lincoln Global, Inc., 2013, pp. 4-11.
- [36] H. Corrales, H. Parra, R. López, "Soldabilidad en Aceros Inoxidables y Aceros Disímiles," *Scientia et Technica*, 2007. pp. 273-278.
- [37] P. Guiraldenq, O. Hardouin-Duparc, "The genesis of the Schaeffler diagram in the history of stainless," *Metallurgical Research & Technology*, Vol.114. 613, 2017.
- [38] J. Chapuis, *Une aproche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc*, Tesis Ph.D, Mécanique, Université Montpellier II – Sciencies et Techniques du Languedoc, Français, 2011, pp. 13-110, 112-116.
- [39] J. Camacho-González, *Estudio comparativo del proceso de soldadura MIG y TIG en un acero inoxidable 416 utilizado en la industria alimenticia y de generación de calor*, Tesis BA, ESIME, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México: México, 2011, pp. 20-22, 37-60.
- [40] C. Godin, Guide. Prévention pour le soudage et le coupage, *Multi prevention ASP*, Québec: ASPHME, 2014, pp.1-8, 10, 15, 21, 43-49.
- [41] S. González Gutiérrez, *Efecto de la velocidad de alimentación y Voltaje sobre las propiedades mecánicas y microestructuras en uniones soldadas GMAW en acero ASTM A66*. Tesis MA, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, México, 2012, 8-20, 40-70.
- [42] *Manual del soldador*, OXGASA, San salvador, pp.7, 28-34, 41-48.

- 
- [43] J. Tello Rico, *Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno protegido con gas (GTAW/TIG)*, Querétaro, México: CIDESI, 2010.
- [44] S. García-Chinchilla. *Robótica Programación*, FANUC Robotics Ibérica S.L., Barcelona: SEAT automotriz, 2012. pp. 5-73.
- [45] G. Romani Labanda, *Desarrollo de un sistema interactivo de gestión integral de parámetros de influencia en procedimientos de soldadura robotizada para procesos de soldadura por arco eléctrico con protección de gas, MIG/MAG y TIG*, Tesis Ph.D, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales: Madrid, 2005, pp. 2-32, 74-80, 142-147.
- [46] R. Dualé, A. Mizrahi. T. Carrere, J. Pietri, "Robotisation – mode d'emploi, Réussir son projet de robotisation" *Syndicat des entreprises de technologies de production, Techniques de l'Ingénieur*, Paris, 2011, pp.8-21, 31-47.
- [47] E. Boudreault B. Hazel, J. Côté y S. Godin, "Traitement thermique localisé après soudage pour une roue de turbine en acier inoxydable martensitique au moyen d'un procédé robotisé de chauffage par induction développé pour les aplicaciones in situ," de *Institut de recherche d'Hydro-Québec*: Quebec, 2014.
- [48] *Operator's manual*, FANUC Robotics, Japón, 2007.
- [49] *Rj3i model B, Handing tool*. FANUC Robotics.
- [50] D.C. Zipperian, *Metallography Handbook*, Tucson: Arizona, PACE Technologies, 2011, pp.11-22, 35-44, 55-78, 104-106, 139, 143-153, 165-169, 247-254 y 324.
- [51] G.F. Vander Voort, *Metallography, Principles And Practice*, McGraw-Hill Book Co., NY, 1984 and ASM International, Materials Park, Ohio, 1999, pp. 2, 7,13-35, 60, 71-127, 165-180, 267-318,509, 610.
- [52] G.F. Vander Vootr, *Metallography and Microstructures*, ASM Handbook, Vol. 9, ASM International, 2004, pp.589-724

- [53] “Ensayo de dureza,” 2011. [Internet]. Disponible: <http://materias.fi.uba.ar/6716/Dureza.pdf>.
- [54] ASTM. E353-14 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Stainless, Heat-Resisting, Maraging, and Other Similar Chromium-Nickel-Iron Alloys, ASTM International, PA: West Conshohocken, 2014. DOI: 10.1520/E0353-14
- [55] Lincoln Electric Company, “Soldadura GTAW por Lincoln,” Lincoln Electric Company, 2000. [Internet]. Available: <https://www.slideshare.net/rozure/soldadura-gtaw-por-lincoln/66?smtNoRedir=1>.
- [56] E. Box George, J. Hunter Stuart G. Hunter William, *Estadística para Investigadores. Diseño, innovación y descubrimiento*. Segunda edición, Barcelona. España: Reverté, 2008, pp. 7-13, 17-62, 157- 173.
- [57] C. Montgomery Douglas, *Diseño y análisis de experimentos*, México: LIMUSA, 2004, pp. 126-466
- [58] R.O. Kuehl, *Diseño de experimentos*, 2ª. Ed. Internacional Thomson Editores, Thomson Learning, México, 2000, pp. 123-225, 423-467.
- [59] M.O.H Amuda, S. Mridha “Grain refinement and hardness distribution in cryogenically cooled ferritic stainless steel welds,” *Materials and Design*, Vol. 47, 2013, pp 365–371. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.12.008
- [60] M. Gurrana , A. Kumar P.P Ravinder Reddy , G. Madhusudhan Reddy, “Influence of grain refining elements on mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel weldments – Taguchi aproach,” *Materials & Design*, Vol.36, pp 443-450, 2012.
- [61] Woochan Seok, Gwan Hoon Kim, Jeonghwa Seo, Shin Hyung Rhee, “Aplication of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement,” *Journal of marine science and engineering*, Vol.7, nº 7, 2019, pp. 226, DOI: 10.3390/jmse7070226
- [62] I. Guzman-Flores, B. Vargas-Arista, J.J. Gasca-Dominguez, C. E. Cruz-Gonzalez, M.A. González-Albarrán, J. del Prado-Villasana, “Effect of Torch

- 
- Weaving on the Microstructure, Tensile and Impact Resistances, and Fracture of the HAZ and Weld Bead by Robotic GMAW Process on ASTM A36 Steel,” *Soldagem & Inspeção*, Vol.22, nº 1, pp. 2017, 72-86.
- [63] ASTM, *E-3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*, West Conshohocken, EU: ASTM International, 2011.
- [64] J. Hedgecoe, *The book of photography*, London: DK, 2005, pp., 210-212, 239-273.
- [65] C. R. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital Image Processing (Second Edition)*, New Jersey: Prentice Hall, 2002, pp. 34-200.
- [66] ASTM, *E112-96 Standard test methods for determining average grain size*, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [67] B. Vargas Arista, A. Albitar, C. Angeles-Chavez, J. Hallen, , “Effect of Artificial Aging Time on the Mechanical Properties of Weldment on API 5L X-52 Line Pipe Steel,” *Metallurgical and materials transactions*, Vol.37A, 2006, pp. 2683-2690
- [68] E. Karadeniz, U. Ozsarac, C. Yildiz, “The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes,” *Materials and Design*, Vol.28, nº2, 2007, pp 649–656. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.07.014.
- [69] D. Camarena Arellano, E. Vargas Rojas, H. Hernández Moreno, “Medición de Fracciones Volumétricas en Materiales Compuestos C-Ep y G-Ep por Digestión y Calcinación de Resina,” de *5º CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS*, Ciudad de México, 2008.
- [70] J. Márquez-Flores, *Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes*, México: Curso Procesamiento y Análisis de Imágenes - CCADET-UNAM 2013, 2013.
- [71] G. Thewlis, “Classification and quantification of microstructures in steels,” *Materials Science and Technology*, Vol.161, nº 20, 2004, pp. 143-, DOI: 10.1179/026708304225010325

- [72] Wainschenker Rubén , Massa José María, Tristan Paula , *Clase Teórico Práctica, Procesamiento Digital de Imágenes*, Ciudad de México: UNICEN, 2011.
- [73] ASTM, *E8-E8M: Standard test methods for tension testing of metallic materials*,” West Conshohocken: ASTM, 2008, p.p 7-18.
- [74] ASTM, *A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, West Conshohocken: ASTM International.
- [75] ASTM, *E-384M: Standard test method for microidentacion hardness of materials*, West Conshohocken, EU: ASTM International, 2005, p.p 1-8.
- [76] M. Rivas O. Asanza B. Wilmer, *Redes neuronales artificiales aplicadas al reconocimiento de patrones (Capítulo 1)*, Ecuador: UTMATCH, 2018.
- [77] R. Montero Granados, *Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de trabajo en economía aplicada*, Granada: Universidad de Granada. España, 2016.
- [78] R. A. Sánchez Turcios, “t-Student: Usos y abusos,” *Revista mexicana de cardiología*, Vol.26, nº 1, 2015, pp 59-61.
- [79] M. Molina Arias, “¿Qué significa realmente el valor de p?,” *Rev Pediatr Aten Primaria*, Vol.19, 2017, pp. 377-381.
- [80] E. Martínez-Conesa, M. Eguía, “Aplicación de Método Numérico y Optimización De Z.A.T en Soldadura por Arco Eléctrico Mediante la Metodología de Superficie de Respuesta,” de *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Valencia, España, 2012.
- [81] Minitab Inc., “minitab.com,” 2017. [Internet]. Disponible en: <http://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab18-GettingStarted-ESMX.pdf>.
- [82] G. Golemund, H. Wickham, *R for Data Science*, O'Reilly Media; Edición: 1, 2017, pp. 20-200.

- 
- [83] D. Matich, *Redes Neuronales: Conceptos básico y aplicaciones. Cátedra: Informática aplicada a la ingeniería de procesos.*, Rosario: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Rosario, 2001.
- [84] I. Gilfillan, *La biblia de SQL*, España: ANAYA, 2009, 119-260, 321-375.
- [85] J. Sharp, *Microsoft Visual C# Step By Step*, 9th Edition, Microsoft Press; 2018, pp. 329-700
- [86] Kendal Simon, *Object Oriented programming using C#*, Ventus Publishing ApS, 2011. Pp.31-96, 113-26, 166-184.
- [87] J. Rumbaugh, I. Jacobson, G. Booch, *El lenguaje unificado de modelado. Manual de referencia*, Madrid: Pearson Education, 2000, pp. 8-22, 37-53, 103-498.
- [88] M. Ortiz, *Procesamiento digital de Imágenes*, Puebla, México: BUAP, 2013, pp. 3-94.
- [89] C. Expósito Rodríguez, "Los diagramas de Voronoi. La forma matemática de dividir el mundo". Pp.3-77
- [90] Shilpa Gambhir, Comparison of k-means Clustering Algorithm with Pixel based Image Segmentation Algorithm, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol.5, nº 11, 2015, pp 617-620.
- [91] J.M Lopez Vera, F. Luna Perejon, "Segmentación de imágenes mediante el algoritmo de K-medias," [Internet]. Disponible en: <http://opera.eii.us.es/pid/public/uploads/pid/entregables/2013-2014/G2013-2014-15/Grupo15Documentacin57.pdf>
- [92] M. Kharinov, "Hierarchical Pixel clustering for image segmentation," [Internet]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/259875217\\_Hierarchical\\_pixel\\_clustering\\_for\\_image\\_segmentation](https://www.researchgate.net/publication/259875217_Hierarchical_pixel_clustering_for_image_segmentation)
- [93] A. Oliver, X. Munoz, J. Batlle, L. Pacheco and J. Freixenet, "Improving clustering algorithms for image segmentation using contour and region



- information,” *2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, 2006, pp. 315-320, DOI: 10.1109/AQTR.2006.254652.
- [94] O. Oludayo, E. Adetiba, S. A. Oyewole “Pixel intensity clustering algorithm for multilevel image segmentation,” *Mathematical Problems in Engineering*, p.p 1-19, 2015.
- [95] R. Kachouri, M. Soua and M. Akil, "Unsupervised image segmentation based on local pixel clustering and low-level region merging," *2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Monastir, 2016, pp. 177-182, DOI: 10.1109/ATSIP.2016.7523091.
- [96] C.E. Cruz-González, H.I. Gala-Barrón, J.D. Mosquera-Artamonov, H. Gámez-Cuatzin, “Efecto de la corriente pulsada en el proceso de soldadura GTAW en titanio 6Al4V con y sin metal de aporte,” *Revista de Metalurgia*, Vol.52, nº 3, 2016, DOI: 10.3989/revmetalm.071.
- [97] W. Tomasz, J. Piwnik, S. Stali, M. Chłodzeniem, “Low Alloy Steel Welding with Micro-Jet Cooling,” *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol.57, nº 2, 2012. DOI: 10.2478/v10172-012-0056-x.
- [98] ASTM, *A240/A240M – 14 Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [99] Scientific European Federation Osteopaths., “*scientific-european-federation-osteopaths.org*,” SEFO, 2019. [Internet]. Disponible en: [www.scientific-european-federation-osteopaths.org/wp-content/uploads/2019/01/Prueba-t-de-Student.pdf](http://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/wp-content/uploads/2019/01/Prueba-t-de-Student.pdf).
- [100] J.P. Planckaert, *Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc*, Tesis Ph.D, Robotique. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Français, 2008, pp. 67-123

- 
- [101] A. García Sánchez, *Optimización de los parámetros de soldadura en el proceso de arco eléctrico con protección de gas (GMAW) para soldar un acero a-27*, Tesis MA, Corporación Mexicana de Investigación de Materiales, México, 2009.
- [102] J. Juarez-Garcia, J. Yañez-Limón, A. Manzano-Ramirez, H. Rojas-Chavez, A. Rodriguez-López, F. Mercader-Trejo, R. Herrera-Basurto, "Characterization and Quantification of the Phases Concentration of Cu60–Zn40 Alloy as Candidate Reference Material," *Metallography. Microstructure, Analysis*, Vol.6, nº 1, 2017. DOI 10.1007/s13632-017-0340-2.
- [103] E. J. Martínez-Conesa, M. Estrems , "Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable," *Revista de Metalurgia*, Vol. 46, No 6, 2010.
- [104] L. Ríos Vargas, *Estudio del efecto de los parámetros de soldadura en un componente estructural de aceros disímiles por medio de GMAW*, Tesis MA, CIATEQ, Estado de México, 2017, pp.70-1120 [104]
- [105] C. Capdevila, F. Caballero, C. García de Andrés, Carlos. Aspectos relevantes de la transformación de austenita en ferrita alotriomórfica e idiomórfica. *Revista de Metalurgia*. Vol. 41, 2005. DOI: 10.3989/revmetalm.2005.v41.iExtra.1027.
- [106] A. Kumar, "Optimization of Gas Metal Arc Welding Process Parameters," de *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, India, 2016.