



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA

**“ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS
AUTOMOTRICES DUAL PHASE (DP)
EMPLEANDO EL PROCESO RSW Y SU EFECTO
EN LAS PROPIEDADES METALÚRGICAS Y
MECÁNICAS”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

PRESENTA

M. EN I. ROGELIO VENCES HERNÁNDEZ

NÚMERO DE CONTROL: D12121664

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO REYES CALDERÓN

MORELIA, MICHOACÁN.

MARZO DEL 2021





Instituto Tecnológico de Morelia
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Morelia, Michoacán, **09/marzo/2021**

OFICIO N° DEPI/111/2021

ASUNTO: AUTORIZACION DE IMPRESIÓN
DEFINITIVA DE TESIS

ROGELIO VENCES HERNÁNDEZ
EGRESADO DEL DOCTORADO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

Le comunico que el jurado designado para que obtenga el grado de **DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación, su aceptación para la impresión definitiva de su trabajo de tesis, el cual lleva por nombre: **“ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS AUTOMOTRICES DUAL PHASE (DP) EMPLEANDO EL PROCESO RSW Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES METALÚRGICAS MECÁNICAS”**.

Por lo anterior se le autoriza la impresión de su trabajo, esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica
"Técnica, Progreso de México"®



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE MORELIA

C. HÉCTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo

HJVH*1aa.



Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguito,
C.P. 58120, Morelia, Michoacán. Tel. (443) 3-12-
15-70 Ext. 316 / Email: depi@morelia.tecnm.mx
tecnm.mx | morelia.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Morelia
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Morelia, Michoacán, **01/marzo/2021**

OFICIO N° DCI. 026/2021

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la ciudad de Morelia, Michoacán, siendo las **13:00** horas del día 01 de marzo de 2021, se reunieron los Miembros del Comité Tutorial de Tesis, designados por el Claustro del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, para examinar la tesis de grado titulada:

“ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS AUTOMOTRICES DUAL PHASE (DP) EMPLEANDO EL PROCESO RSW Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES METALÚRGICAS Y MECÁNICAS”

Presentada por el(la) alumno(a):

M. I. ROGELIO VENCES HERNÁNDEZ, con número de Control D12121664

Aspirante al grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la comisión manifestaron su **APROBACIÓN PARA LA IMPRESIÓN FINAL DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

Presidente y Asesor:

Dr. Francisco Reyes Calderón
D. en C. en Metalurgia y Ciencias de los Materiales
Cédula Profesional 09059862

Secretario y Co-asesor:

Dr. Héctor Javier Vergara Hernández
D. en Ingeniería
Cédula Profesional 7562512

Vocal:

Dr. Leonel Ceja Cárdenas
D. en C. en Metalurgia y Ciencias de los Materiales
Cédula Profesional 09059692

Vocal:

Dr. Juan Alfonso Salazar Torres
D. en C. en Ingeniería Electrónica
Cédula Profesional 10074046

Vocal:

Dr. José Sergio Pacheco Cedeño
D. en C. en Ingeniería y Ciencia de Materiales
Cédula Profesional 12020068

Vocal Suplente:

Dr. Julio César Alzobobos Brito
D. en Ing. y Ciencias Aplicadas (Tecnología de Materiales) Cédula Profesional 11534042



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DOCTORADO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA

C.c.p. Archivo



Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguito, C.P. 58120,
Morelia, Michoacán. Tel. (443) 3-12-15-70 Ext. 316 / Email:
depi@morelia.tecnm.mx
tecnm.mx | morelia.tecnm.mx





Agradecimientos

A mis papás, J. Rogelio Vences Martínez y Migdalia Hernández Pérez, quienes me han apoyado en todo momento y me han dado los mejores consejos, siendo no sólo mis papás sino también grandes amigos en este camino llamado vida.

A mi hermana Karol Karime Vences Hernández por su cariño y acompañarme en los desvelos para la escritura de este trabajo de investigación.

A mi director Dr. Francisco Reyes Calderón por el apoyo, confianza y la amistad que me ha brindado desde que la primera clase que se tuvo con él durante los estudios de Maestría, así como brindar esos buenos consejos para seguir por un camino adecuado durante este trabajo de investigación.

A los integrantes de mi comité revisor: Dr. Héctor Javier Vergara Hernández, Dr. Julio César Villalobos Brito, Dr. Juan Alfonso Salazar Torres, Dr. Leonel Ceja Cárdenas y Dr. José Sergio Pacheco Cedeño, los cuales a través de sus comentarios y revisiones objetivas me alentaron a seguir superándome en cada momento.

A mis compañeros y amigos del Instituto Tecnológico de Morelia que siempre han dado su apoyo incondicional, ayudando a no perder el rumbo y metas, así como compartiendo excelentes momentos de la vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Tecnológico de Morelia, ya que sin estas grandes instituciones no hubiese podido desarrollar plenamente este trabajo de investigación.



Índice

Resumen.....	I
Abstract.....	III
i. Introducción.....	IV
ii. Justificación.....	VI
iii. Objetivos.....	VII
iv. Hipótesis.....	VIII
Capítulo 1. Estado del arte.....	1
Capítulo 2. Marco teórico.....	7
2.1 Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS).....	7
2.2 Aceros Dual Phase (DP).....	8
2.2.1 Composición química de los aceros DP.....	9
2.3 Soldadura de puntos por resistencia (RSW).....	10
2.4 Ciclo de la soldadura de puntos por resistencia.....	11
2.5 Resistencia eléctrica presente en la soldadura RSW.....	12
2.6 Generación de calor en el proceso RSW.....	13
2.7 Disipación de calor en el proceso RSW.....	14
2.8 Diseño de experimentos factorial completo (FFD).....	15
2.9 El método de Taguchi.....	17
2.10 Red neuronal artificial (RNA).....	18
Capítulo 3. Desarrollo experimental.....	21
3.1 Clasificación de los aceros DP en condición de llegada.....	22
3.2 Caracterización metalográfica de los aceros DP en condición de llegada.....	22
3.3 Espectroscopia de emisión óptica (OES).....	23
3.4 Cuantificación del tamaño de grano.....	23
3.5 Ensayo de microdureza en condición de suministro de los aceros DP.....	24
3.6 Ruta experimental con base en el Diseño Factorial Completo (FFD).....	24
3.7 Preparación de los aceros DP para ejecución del proceso RSW.....	26
3.8 Proceso de soldadura RSW.....	27
3.9 Ensayo de tracción.....	28
3.10 Macroexaminación de la unión soldada.....	28
3.11 Ensayo de microdureza en condición as-welded.....	29
3.12 Redes Neuronales en MATLAB®.....	30



Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.....	32
4.1 Caracterización de los aceros DP en condición de suministro.....	32
4.2 Ejecución del proceso RSW para unión de los aceros DP.....	38
4.3 Análisis de los datos por medio del Diseño Factorial Completo (FFD).....	40
4.4 Análisis con el Método de Taguchi.....	46
4.5 Análisis microestructural en los botones de soldadura.....	48
4.6 Perfil de dureza Vickers en el botón de soldadura.....	53
4.7 RNA aplicada a la predicción de la resistencia a la tracción de los botones de soldadura.....	56
4.8 Validación de los parámetros óptimos del proceso RSW.....	59
Conclusiones.....	62
Referencias.....	64
Anexos. Productividad Científica.....	69

Índice de Figuras

Capítulo 1. Estado del arte.

Figura 1.1 Esquema representativo del proceso REW [6].....	2
Figura 1.2 Esquema representativo de un botón de soldadura por REW.....	3
Figura 1.3 Diagrama de Pareto, factor más significativo.....	4
Figura 1.4 Sección transversal de un botón obtenido con 3 kA, a) tiempo de soldeo de 300 ms y b) tiempo de soldeo de 500 ms.....	5

Capítulo 2. Marco teórico.

Figura 2.1 Diagrama de formabilidad de los aceros AHSS [24].....	8
Figura 2.2 Representación de la microestructura de un acero DP [27].....	9
Figura 2.3 Representación esquemática del proceso RSW [30].....	11
Figura 2.4 Etapas del ciclo térmico de la soldadura RSW [15].....	12
Figura 2.5 Esquema analógico de las resistencias óhmicas en el proceso RSW [36]...	13
Figura 2.6 Esquema de la distribución de la resistencia y color en proceso RSW [37]	14
Figura 2.7 Disipación de calor óptimo durante el proceso RSW [38].....	15
Figura 2.8 Diagrama análogo de una neurona biológica [44].....	19
Figura 2.9 Diagrama representativo de una red neuronal artificial [45].....	20

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

Figura 3.1 Diagrama del desarrollo experimental.....	21
Figura 3.2 Microdurómetro MITUTOYO®.....	24
Figura 3.3 Traslape y posicionamiento de los aceros DP.....	26
Figura 3.4 Máquina Pirámide modelo 0357 semi-automática.....	27
Figura 3.5 Máquina universal Instron-Microest modelo 1195R.....	28
Figura 3.6 Digital Microscope empleado en la macroexaminación.....	29
Figura 3.7 Esquema de barrido marcado por la línea azul.....	30

Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.

Figura 4.1 Comparación de los aceros DP JAC270; a-g) aceros DP de la serie JAC270 y h) composición química (wt%).....	33
Figura 4.2 Perfiles de microdureza de los aceros DP JAC270.....	35

Figura 4.3 Comparación de los aceros DP JAC590-789; a-c) aceros DP JAC789TC/ JAC590 y h) composición química (wt%).....	36
Figura 4.4 Perfiles de microdureza de los aceros DP: 1) JAC789TC, 2) JAC590 y 3) JAC590R.....	37
Figura 4.5 Macrografías de las probetas: a) 3, b) 15 y c) 17.....	38
Figura 4.6 Resistencia mecánica de las 54 uniones soldadas.....	39
Figura 4.7 Diagrama de Pareto con los factores e interacción más significativos.....	42
Figura 4.8 Diagrama de probabilidad normal.....	43
Figura 4.9 Gráfico de superficie de la resistencia de tracción respecto al tiempo y espesor.....	44
Figura 4.10 Gráfico de superficie de la resistencia a la tracción respecto a la intensidad de corriente y el espesor de los aceros DP JAC270.....	45
Figura 4.11 Relación S/N de los parámetros óptimos para el proceso RSW.....	48
Figura 4.12 Imágenes del mejor botón de soldadura probeta 3: a) Botón de soldadura b) Zona de fusión, c) Micrografía del metal base superior y d) Micrografía del metal base inferior.....	49
Figura 4.13 Imágenes del botón de soldadura con desempeño medio: a) Botón de soldadura, b) ZF, c) Micrografía con GG-ZAC y GF-ZAC y d) Micrografía con ZI-ZAC y ZS-ZAC.....	52
Figura 4.14 Imágenes del peor botón de soldadura: a) Botón de soldadura, b) ZF, c) Micrografía del metal base superior y d) Micrografía del metal base inferior..	53
Figura 4.15 Perfil de microdureza de los botones de soldadura.....	54
Figura 4.16 Perfil de microdureza de la probeta 3.....	55
Figura 4.17 Interfaz de enteramiento, permite al usuario conocer el desempeño de la RNA creada.....	57
Figura 4.18 Nivel de ajuste de las predicciones creadas por la RNA contra el objetivo o salida deseada.....	58
Figura 4.19 Macrografías de: a) probeta 3 y b) probeta de verificación.....	59

Índice de Tablas

Capítulo 2. Marco teórico.

Tabla 2.1 Impacto de la adición de aleantes en los aceros [29].....	10
Tabla 2.2 Arreglo ortogonal para un experimento 3^3	18

Capítulo 3. Desarrollo experimental.

Tabla 3.1 Clasificación de los aceros DP con base en su resistencia mecánica.....	22
Tabla 3.2 Descripción de los caracteres de la serie de identificación.....	22
Tabla 3.3 Factores y variaciones para la generación de la matriz experimental.....	25
Tabla 3.4 Experimentos necesarios para el arreglo L_{27}	25

Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.

Tabla 4.1 Fracción de martensita y tamaño de grano ferrítico (ASTM) [62].....	37
Tabla 4.2 Resultados del ANOVA.....	41
Tabla 4.3 Mejor nivel de cada factor empleado en el proceso RSW.....	45
Tabla 4.4 Predicción del valor resistencia a la tracción.....	46
Tabla 4.5 Resultados de la variación de los parámetros con el método de Taguchi....	47
Tabla 4.6 Ejemplo de la normalización de las variables del proceso RSW.....	56
Tabla 4.7 Predicción de la RNA contra valor real.....	58
Tabla 4.8 Predicciones empleando la ecuación (4.1) vs valor real.....	60



Siglas

<i>Siglas</i>	<i>Inglés</i>	<i>Español</i>
AHSS	Advanced High Strength Steels	Aceros Avanzados de Alta Resistencia
ANOVA	Analysis of Variance	Análisis de Varianza
ASTM	American Society of Testing Materials	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
CP	Complex Phase	Fase Compleja
DP	Dual Phase	Fase Dual
FFD	Full Factorial Design	Diseño Factorial Completo
FW	Widmanstatten Ferrite	Ferrita Widmanstatten
HSS	High Strength Steels	Aceros de Alta Resistencia
HV	Hardness Vickers	Dureza Vickers
I	Current Intensity	Intensidad de corriente
MB	Base Metal	Metal Base
MO	Optical Microscope	Microscopio Óptico
P	Force	Fuerza
REW	Resistance Element Welding	Soldadura de Elementos por Resistencia
RNA	Artificial Neuronal Network	Red Neuronal Artificial
RSW	Resistance Spot Welding	Soldadura de Puntos por Resistencia
S/N	Signal/Noise	Señal/Ruido
t	Time	Tiempo
TRIP	Transformation-Induced Plasticity	Plasticidad Inducida por Transformación
TWIP	Transformation-Induced Plasticity	Plasticidad Inducida por Maclado
ZAC	Heat Affected Zone	Zona Afectada por el Calor
ZF	Fusion Zone	Zona de Fusión



Simbología

<i>Símbolo</i>		<i>Unidad</i>
df	Grados de libertad	--
F	Fisher	--
MS	Media cuadrática	--
p	Valor de probabilidad	--
R²	Coefficiente de determinación	%
SS	Suma de cuadrados	--
SS_{error}	Suma de cuadrados del error	--
SS_{modelo}	Suma de cuadrados del modelo	--
SS_{total}	Suma de cuadrados total	--
ωt	Peso	%
σ	Resistencia a la tracción	MPa



Resumen.

En el presente trabajo de investigación muestra la optimización de los parámetros empleados en el proceso RSW para la unión de aceros DP disímiles en espesor, tomando en cuenta que la unión soldada adecuada no tiene únicamente como base los parámetros de soldeo, sino también requiere de caracterizar el botón de soldadura para establecer los efectos del aporte térmico del proceso RSW sobre los aceros DP. Los aceros DP fueron caracterizados antes de aplicarse el proceso RSW en la unión de las láminas, de tal manera que, se logrará obtener el análisis de la microestructura de los aceros DP y seleccionar los aceros que serían empleados durante la experimentación, los cuales tienen diferentes espesores y valores de resistencia a la tracción que varían desde los 270 hasta los 789 MPa.

Mediante el diseño de experimentos FFD y el método de Taguchi, se lograron establecer el análisis estadístico necesario para determinar los valores óptimos de los parámetros de soldeo y la experimentación adecuada para su análisis. Una vez que se llevó a cabo el proceso de unión de las láminas de acero DP se evaluaron los botones de soldadura mediante análisis de comportamiento mecánico a través del ensayo de tracción, de tal manera que, se obtuviera una variable de respuesta que permitiera conocer el desempeño de los botones de soldadura. Posteriormente al ensayo de tracción, se realizó el ensayo de dureza en escala de Vickers para corroborar el comportamiento e identificar el mejor botón de soldadura producido con la experimentación. Por otra parte, con el motivo de estimar y verificar los valores de predicción de la resistencia de los botones de soldadura obtenidos mediante el diseño de experimentos se creó una red neuronal, la cual permitió corroborar los valores establecidos con los métodos estadísticos y tener un valor más de comparación con los resultados obtenidos en la experimentación. La red neuronal fue programada de tipo perceptrón multicapa a través del algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Los resultados muestran que el uso de los diseños de experimentos y el análisis estadístico permiten identificar los parámetros óptimos para la unión de los aceros DP, así como una buena predicción del comportamiento de los botones de soldadura respecto a la resistencia del material. Se estableció que el parámetro que más efecto tiene sobre el resultado



del desempeño de los botones de soldadura es el espesor de los aceros DP, entre mayor diferencia exista en el espesor de las láminas de acero, mayor será el detrimento de sus propiedades mecánicas y metalúrgicas.



Abstract.

In the present research work the optimization of the parameters used in the RSW process for the union of DP steels dissimilar in thickness was performed. It should be taken into account that the adequate welded union is not only based on the welding parameters, it also requires the characterization of the weld button to establish the effects of the heat input of the RSW process on DP steels. The DP steels were characterized before applying the RSW process in the union of the sheets, in such a way that, it would be possible to obtain the microstructural analysis of the DP steels and select the steels that would be used during the experimentation. This is because there is a series of DP steels with different values of mechanical resistance, which range from 270 to 789 MPa with different thicknesses.

Through the FFD and the Taguchi method, it was possible to establish the statistical analysis necessary to determine the optimal values of the welding parameters and the appropriate experimentation for their analysis. Once the process of joining the DP steel sheets was carried out, the welding buttons were evaluated employing mechanical behavior analysis through the tensile test, in such a way that, there was a response variable that allowed to know the performance of welding buttons. After the tensile test, the Vickers scale hardness test was carried out to corroborate the behavior and identify the best weld button produced with the experimentation. On the other hand, to estimate and verify the prediction values of the resistance of the welding buttons obtained through the design of experiments, a neural network was created, which allowed to corroborate the established values with the statistical methods and have a value more in comparison with the results obtained in experimentation. The neural network was programmed as a multilayer perceptron through the Levenberg-Marquardt algorithm.

The results show that the use of experimental designs and statistical analysis allow identifying the optimal parameters for the joining of DP steels, as well as a good prediction of the behavior of the welding buttons in relation to the resistance of the material. It was established that the parameter that has the greatest effect on the result of the performance of the welding buttons is the thickness of the DP steels, the greater the difference in the thickness of the steel sheets, the greater the detriment of their mechanical and metallurgical properties.



i. Introducción.

Las autopartes metálicas, comúnmente láminas, ensambladas en las plantas dedicadas a la fabricación de automóviles utilizan en su proceso de producción máquinas soldadoras RSW para la unión de las autopartes, las cuales normalmente permiten formar el chasis y otras partes estructurales de los vehículos. Por lo que, la industria automotriz tiene una notable importancia en la sección de los materiales para que cumplan con todos los requerimientos de seguridad y bajo peso [1].

Las estructuras o chasis de los automóviles se componen en gran medida por los AHSS, los cuales combinan resistencia y ductilidad mediante la transformación de fases y el endurecimiento por deformación, logrando una buena relación resistencia/peso para aplicaciones ligeras. El acero DP es uno de los AHSS más comunes y utilizados en la industria automotriz debido a la buena formabilidad y ductilidad con una resistencia relativamente alta, un rendimiento continuo seguido de un endurecimiento rápido, una baja relación de rendimiento en deformación por tracción y un comportamiento de no envejecido a temperatura ambiente [2, 3]. A pesar de las grandes ventajas con las que cuentan los aceros DP, normalmente se emplean en forma de hoja de lámina como partes de metálicas en la estructura de diversos vehículos, por lo que, tendrán que unirse mediante algún tipo de soldadura y habrá cambios microestructurales sin importar el proceso de soldadura que se aplique para la unión de las hojas de lámina, modificando las propiedades mecánicas y metalúrgicas de los aceros DP [4].

El proceso de soldadura RSW es uno de los empleados para la unión de las láminas de acero DP, este proceso produce la coalescencia del acero en la superficie de contacto por el calor generado en la junta por la resistencia de contacto al flujo de corriente eléctrica. Una fuerza es aplicada antes, durante y después de la aplicación de la intensidad corriente para evitar el arco en las superficies de contacto (posible expulsión de material) y para forjar el metal de soldadura. El proceso se completa dentro de un ciclo de tiempo específico [4].

Todos los parámetros involucrados en el proceso de soldadura RSW (normalmente: fuerza aplicada (P), el tiempo de soldeo (t) y la intensidad de corriente (I)) inciden en la



calidad final de la unión de los aceros DP, en consecuencia, se tendría que aplicar una gran cantidad de experimentos para inferir en cuáles serían los mejores parámetros para unir nuevos aceros o aceros disímiles en alguna característica como el espesor de las hojas de los aceros. Es por lo anterior que, la optimización del número de experimentos para el proceso RSW es clave para el ahorro de material y del tiempo invertido en la elaboración de las uniones soldadas, sin importar de cuál tipo de proceso de unión se esté llevando a cabo.

El método de Taguchi es una herramienta para el análisis estadístico, que permite disminuir el número de pruebas con excelentes resultados en el estudio de procesos directamente en campo, logrando una alta calidad sin aumentar el costo. Esto se debe a que la optimización de los parámetros del proceso puede mejorar la calidad y los parámetros óptimos del proceso son insensibles a la variación de las condiciones ambientales y otros factores de ruido [5]. No obstante, se vuelve necesario el uso de otros métodos analíticos como el FFD, de tal manera que, se pueda desarrollar un entendimiento matemático que relacione las variables de control del proceso con la variable de respuesta.

Por lo anterior, para la optimización de los parámetros del proceso RSW, se hace uso del análisis estadístico, específicamente del Diseño de Experimentos Factorial y el Método de Taguchi, así como también de la implementación de las redes neuronales artificiales para obtener una predicción de los resultados de la resistencia mecánica de los botones de soldadura. Tomando en cuenta que la unión adecuada de los aceros DP no debe recaer únicamente en la optimización de los parámetros del proceso de soldadura en virtud de que, normalmente no se involucran los fenómenos metalúrgicos resultantes en las uniones soldadas. Los análisis se realizan con base en los valores de entrada del proceso RSW y los resultados de algunas propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción. Por consiguiente, es notoria la necesidad de también emplear la caracterización y comprensión del comportamiento de los aceros DP considerando desde la condición de suministro hasta los efectos provocados por la implementación de calor de entrada al sistema.



ii. Justificación.

El análisis de los fenómenos físicos, metalúrgicos y propiedades mecánicas que afectan a los aceros DP sometidos al proceso RSW, es de vital importancia ya que es el método de soldadura más utilizado en la industria automotriz por sus beneficios tecnológicos, además de tener alta tasa de productividad y ser adaptable para una gran variedad de necesidades. De hecho, en cualquier vehículo se pueden tener entre 3000 y 6000 puntos de soldadura; y dentro de esa gran cantidad de puntos, entre el 20 y 30% de las uniones realizadas, llegan a tener una calidad incierta mostrando la relevancia que tiene este proceso.

Los fenómenos que afectan a los aceros DP por la implementación del proceso de soldadura RSW se ven modificados debido al ciclo térmico del proceso de soldadura y a su interacción con los parámetros: fuerza (P) o esfuerzo (s) aplicados, el tiempo de soldeo (t) y la cantidad de corriente (I) en el circuito de soldadura. Con lo anterior se pretende coadyuvar a la disminución del porcentaje martensita presente en los aceros DP. Empleando ensayos mecánicos (dureza y tracción) de la condición soldada de los aceros DP con diferentes espesores.

Por otro lado, actualmente se requiere de la combinación de diferentes metales en el orden de crear mejores estructuras para los vehículos. En los estudios revisados, no se ha encontrado la suficiente información que justifique cuáles son los factores de mayor relevancia dentro del proceso RSW, aunado a la falta de un modelo matemático que exprese la correlación entre las variables del proceso y la buena soldabilidad entre aceros DP de diferentes espesores. Así que, el desarrollo de este proyecto es pensado para la mejora directa de los procesos de manufactura empleados en la industria automotriz mediante el establecimiento de los parámetros óptimos del proceso RSW. Dicha mejora podrá verse reflejada; ya sea, por la importante mejora en la calidad de las uniones soldadas (mejora en los atributos mecánicos) o por reducción de costos en el consumo energético debido a los requerimientos de potencia de corta duración y alta corriente.



iii. Objetivos.

Objetivo general.

Optimizar los parámetros del proceso RSW que permitan mejorar la soldabilidad de aceros automotrices DP y determinar los fenómenos metalúrgicos producidos en la soldadura RSW de aceros con espesores disímiles, así como su efecto sobre la soldabilidad, minimizando el detrimento de sus características metalúrgicas y mecánicas.

Objetivos específicos.

1. Caracterizar metalográfica, microestructural y mecánicamente los aceros DP comerciales en condición de llegada o suministro.
2. Establecer las variables que gobiernan el proceso de soldadura RSW de aceros DP.
3. Aplicar el FFD y el método de Taguchi para la optimización de la ruta experimental del presente trabajo.
4. Caracterizar metalográfica y mecánicamente los aceros DP en condición de soldadura (as-welded).
5. Analizar los cambios en la microestructura, en las fases aparente y en el tamaño de grano que ocurren debido al ciclo térmico del proceso RSW y el efecto producido en las propiedades mecánicas de los aceros DP.
6. Correlacionar los efectos metalúrgicos de las juntas soldadas con las variables y métodos estadísticos empleados.
7. Optimizar tiempo e intensidad de corriente aplicados para la unión de aceros DP.
8. Establecer las condiciones y parámetros de soldeo apropiados para los aceros DP (know-how).
9. Establecer una correlación matemática que permita determinar los parámetros necesarios para conseguir uniones soldadas en aceros DP de espesores disímiles



iv. Hipótesis.

El proceso RSW es una de las prácticas más utilizadas para la unión permanente de láminas metálicas por su facilidad de manejo y adaptabilidad. No obstante, el conocimiento se encuentra asimilado en procesos que implican la unión de láminas con características similares; siendo que en muchos de los casos los parámetros fueron determinados por prueba y error.

Por medio del estudio y análisis de los fenómenos metalúrgicos y de las propiedades mecánicas en aceros DP, así como la de la aplicación y validación de métodos estadísticos como el de Taguchi, FFD y redes neuronales será posible concluir cuales de las variables Espesor (e), tiempo (t) y corriente de soldadura (I) del proceso RSW son significativas para controlar el botón de soldadura en la unión de aceros DP disímiles en espesor; estableciendo una propuesta de correlación matemática entre los parámetros de soldeo requeridos en función del espesor del acero DP.



Capítulo 1. Estado del arte.

En el área del diseño industrial, la selección de los materiales para cualquier tipo de aplicación es una de las etapas con mayor importancia, más aún, si se deben cumplir una serie de requerimientos para preservar vidas humanas como se presenta en la industria automotriz [1]. Y a pesar de que se están desarrollando nuevos materiales que cumplan con las exigencias de las diferentes necesidades industriales, los aceros siguen siendo uno de los materiales más utilizados. Uno de los métodos comúnmente empleados para la unión de los aceros en el ámbito industrial es mediante soldadura, en este sentido, existen retos a resolver como unir aceros disímiles sin afectar sus propiedades mecánicas y metalúrgicas [6].

La soldabilidad de los aceros automotrices es uno de los elementos de gran interés debido a la gran cantidad de cambios que representa cualquier tipo de soldadura aplicada en la unión permanente de los aceros; siendo el proceso RSW el principal método de unión en el ensamble de los aceros automotrices en virtud de la rapidez con que se realiza y debido a que es un proceso relativamente fácil de controlar [7]. De acuerdo a Sivaraj et al. [8], los requerimientos que se deben cumplir en la industria automotriz respecto al desempeño del cuerpo los vehículos, no depende únicamente del proceso de soldadura aplicado, sino que también, se ve afectado por el tipo de acero que se implementa en el chasis. Los aceros DP, entre otros pocos, son los aceros más utilizados por la industria automotriz a causa de su buena relación peso-resistencia mecánica [9].

En el trabajo desarrollado por Elitas y Demir [10], evaluaron como principales parámetros en la unión de aceros DP-1000 por RSW: el tiempo de soldeo, la corriente de soldadura y la presión aplicada por los electrodos, ya que todos estos parámetros afectan de manera directa el calor de entrada al proceso. Encontraron que al incrementar la presión y la corriente de soldeo incrementa la resistencia a la tracción de las uniones soldadas, resultado similar al descrito en la investigación escrita por Sivaraj et al. [8], donde la corriente de soldadura fue el factor de mayor impacto. Además de la presión aplicada por los electrodos y de la corriente de soldeo, al realizar una comparación entre las pruebas que resultaron con

expulsión de material, concluyeron que todas aquellas uniones que presentaban este fenómeno, también presentaban una disminución en la carga máxima soportada en las pruebas de tracción.

Por otro lado, en otras investigaciones no sólo se han preocupado por investigar y evaluar los parámetros que afectan a las uniones en el proceso RSW. Los autores Ling et al. [6], desarrollaron modificaciones a la manera de aplicar el proceso RSW en la unión de aceros disímiles, creando el proceso denominado REW, el cual se muestra en la Figura 1.1. Este proceso consiste en perforar la lámina superior en los aceros a unir y colocar un remache que permite realizar la unión de los aceros disímiles, el material del remache a utilizar dependerá de los aceros que se deseen unir. Para determinar el desempeño de las uniones soldadas o de los botones de soldadura, se obtuvo la carga máxima de diferentes uniones mediante la prueba de tracción en una máquina universal, operando a una velocidad constante de la cruceta de 1 mm/min.

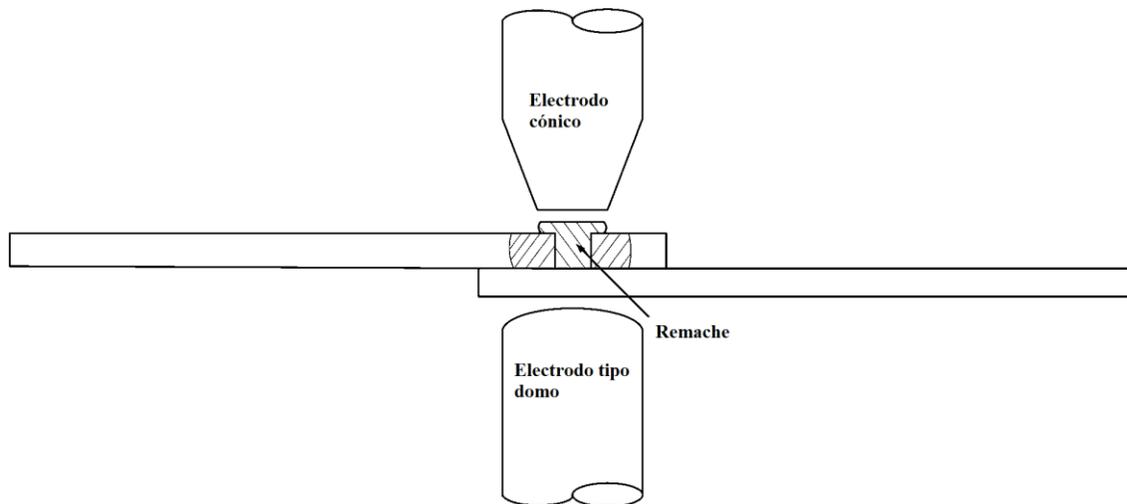


Figura 1.1 Esquema representativo del proceso REW [6].

Los botones de soldadura en el proceso REW se forman principalmente en la interfaz del remache y la lámina de acero inferior, aunque en una menor proporción la parte del cuerpo del remache cercano a la lámina superior se funde debido a la conducción de calor. En la Figura 1.2 se muestra un esquema simple del botón de soldadura formado en el proceso REW,

cabe resaltar que el proceso REW obtuvo resultados en la prueba de tracción varias veces mayores a los obtenidos por la unión con el proceso RSW.

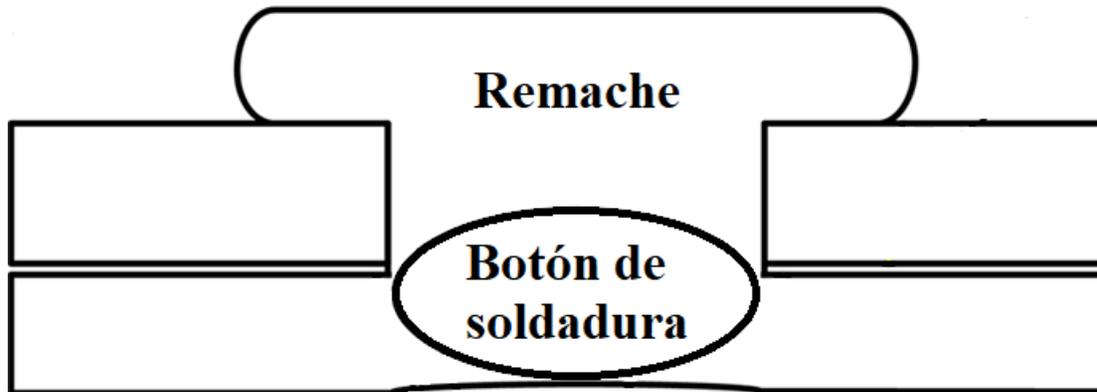


Figura 1.2 Esquema representativo de un botón de soldadura por REW [6].

En la investigación realizada por Thakur et al. [4], se muestra que una de las mejores formas de juzgar la calidad de la soldadura es por el tamaño de diámetro del botón y la ZAC. Además del tamaño del botón de soldadura, la prueba de tracción proporciona una mejor medida de calidad de la resistencia de la unión articulada [11]. Se encontró que la corriente de soldadura fue el factor principal que afecta a la resistencia a la tracción, mientras que el tiempo de soldadura es el segundo factor, concordando con la investigación hecha por Rasheed y Khan [12]. Esta investigación confirma que el método de Taguchi es aplicable para establecer los mejores parámetros de soldeo y obtener la resistencia a la tracción, por lo que, es factible el desarrollo de un modelo matemático que establezca una relación entre las variables a partir de métodos de regresión y análisis de varianza.

El diámetro del botón depende de los parámetros de soldadura y es crítico para la unión de los aceros porque controla el tipo de falla que se presentará en la soldadura. Esto se puede observar en diversos estudios donde vieron como resultado que el diámetro del botón cambia gradualmente con el incremento o decremento de la fuerza aplicada por el electrodo. Por ejemplo, en el trabajo escrito por Yürük y Kahraman [13], se muestra que el botón de soldadura aumenta su tamaño con el incremento del calor de entrada. A su vez, en el estudio presentado por Pouranvari y Marashi [14], llegaron a la conclusión de que la implementación excesiva de fuerza por el electrodo reduce tanto la carga máxima de manera considerable.



Como se ha mostrado, el implementar métodos estadísticos permite incrementar la calidad resultante de los botones de soldadura obtenidos a través del uso del proceso RSW, optimizando los parámetros o factores de mayor importancia en el proceso. En el artículo escrito por Ravichandra et al. [15], se realizó un diseño de experimentos factorial, obteniendo el número de experimentos y los resultados mediante el software Minitab®. Los parámetros óptimos fueron conocidos al implementar la herramienta de optimización, incluida en la paquetería de Minitab®. Mientras que, el gráfico de Pareto (Figura 1.3) mostró a la corriente de soldadura como el factor más significativo para formar botones de soldadura con mayor dureza.

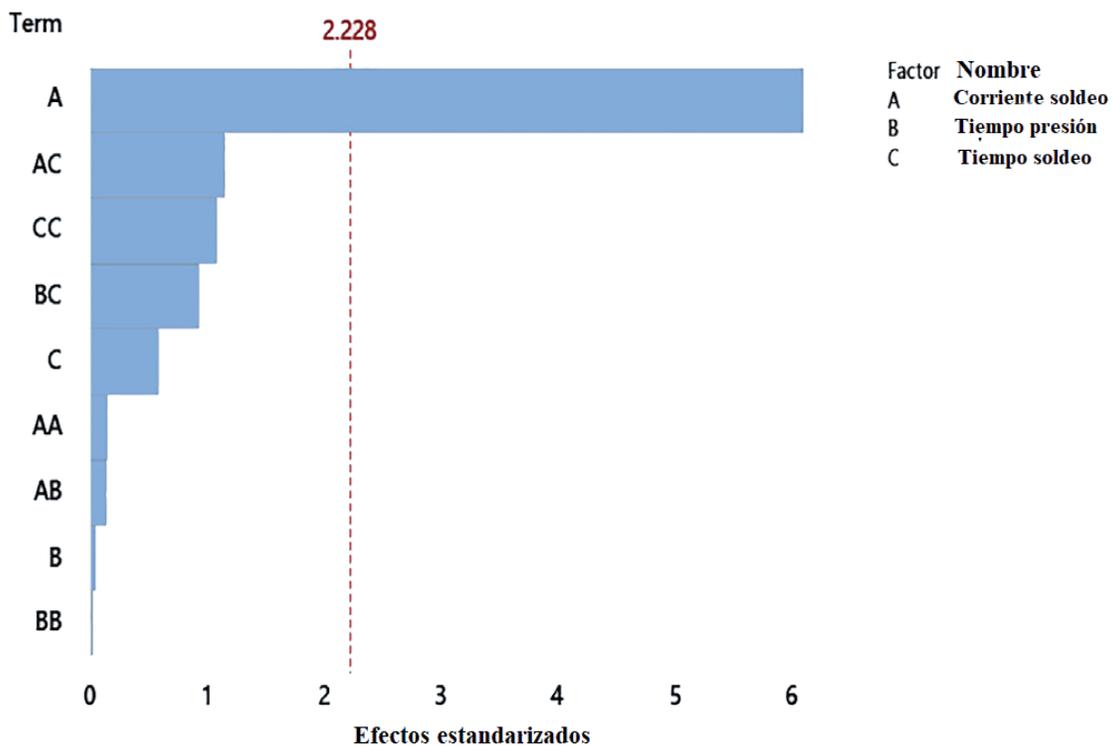


Figura 1.3 Diagrama de Pareto, factor más significativo.

En el trabajo desarrollado por Hernández et al. [16], se mostró el uso de imágenes infrarrojas en combinación con método de optimización multi-respuesta, estableciendo por medio de un modelo matemático una fuerte correlación entre las imágenes infrarrojas y la resistencia a la tracción resultante en las pruebas mecánicas. Encontraron que con el incremento de la corriente de soldadura y del tiempo de soldeo, era mayor el diámetro

obtenido en los botones de soldadura, estableciendo también que, a mayor diámetro del botón mayor calidad en la unión soldada. En la prueba de confirmación, obtuvieron resultados cercanos a los desarrollados mediante el modelo matemático. En la Figura 1.4 se muestra uno de los botones de soldadura con su respectiva ZF, ZAC y MB.

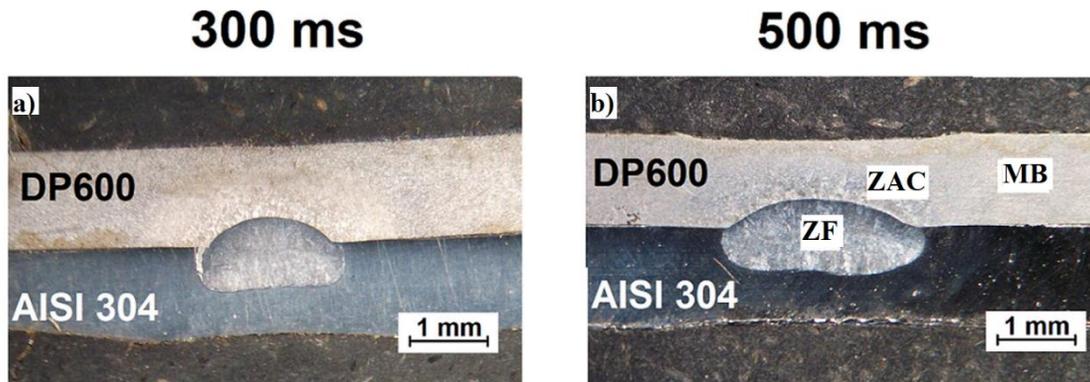


Figura 1.4 Sección transversal de un botón obtenido con 3 kA, a) tiempo de soldeo de 300 ms y b) y tiempo de soldeo de 500 ms.

Existen otros métodos para la optimización del proceso y calidad de la soldadura RSW aparte de los conocidos como diseño de experimentos y método de Taguchi, uno de ellos son las redes neuronales. Éstas han ganado recientemente atención como una herramienta rápida, precisa y flexible para el modelado, la simulación y el diseño. Los modelos de red neural proporcionan una gran cantidad de ahorro de tiempo en situaciones en las que una topología fija debe ser reutilizada y re-sintetizada muchas veces. Las redes neuronales utilizan nodos simulando de forma análoga las neuronas biológicas. Los nodos están interconectados por medio de enlaces con diferente peso cada uno. Aunque las redes neuronales son difíciles de programar y entrenar, representan una alternativa eficaz para simular sistemas no lineales o de gran complejidad, donde los métodos de regresión llegan a tener limitantes [17-19].

De acuerdo al trabajo desarrollado por Haghshenas y Moshayedi [20], al aplicar correctamente las redes neuronales en combinación con el dato del desplazamiento de los electrodos *in situ*, se puede predecir la resistencia de los botones de soldadura con buena precisión, evitando la necesidad de realizar pruebas destructivas como la prueba de desgarre o la prueba de tracción. Para predecir los parámetros de salida, implementaron el algoritmo



llamado Levenberg—Marquaerdt, obteniendo lo mejores resultados en las predicciones. Determinaron que al incrementar la presión aplicada por los electrodos sobre las láminas causa un efecto negativo en el tamaño de los botones de soldadura, ya que se reduce la resistencia de contacto y por ende, se genera menor calor entre las superficies.

Dentro de la investigación hecha en el país y más concretamente en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia se ha estudiado el efecto de los parámetros en el proceso de soldadura RSW, donde los elementos de prueba fueron la intensidad de corriente, la presión ejercida por los electrodos sobre el material y el tiempo durante el cual se aplica la intensidad de corriente. El proyecto fue desarrollado en el posgrado de Maestría en Ciencias en Metalurgia donde se trabajó un acero Dual Phase DP-290 implementado un diseño ortogonal L_{25} de la metodología Taguchi para optimizar la cantidad de combinaciones posibles entre las variables. Concluyendo que una menor intensidad de corriente y una presión media (110 Psi) durante un tiempo prolongado (1700-1800 ms) genera una mejor resistencia al desgarro.



Capítulo 2. Marco teórico.

2.1 Aceros avanzados de alta resistencia (AHSS).

El progreso en la fabricación de aceros para su aplicación en la producción de vehículos ha intentado complacer los continuos requerimientos en la disminución de la carga, inclusive contando con la existencia de dispositivos que permiten salvaguardar a los usuarios con mayor eficacia y sofisticación. Aunado a la necesidad de dispositivos de seguridad, se tiene la búsqueda de una mayor economía de combustible basándose en la reducción del calibre del material sin comprometer la resistencia, ductilidad, entre otros atributos del material que podrían comprometer la integridad física de los pasajeros. Encontrando la solución en la fabricación e implementación de los aceros denominados AHSS [21].

Los aceros AHSS son clasificados en tres diferentes generaciones, la primera generación abarca los siguientes tipos de acero: doble fase (DP), transformación inducida por plasticidad (TRIP), fase compleja (CP) y martensíticos. La segunda generación corresponde a los aceros TWIP y a los aceros austeníticos con grandes contenidos de manganeso y otros aleantes con el fin de incrementar su elongación. En la tercera generación se ha formulado el último adelanto de los aceros AHSS, siendo aquellos aceros que cumplan con la combinación de resistencia y conformabilidad para otorgar propiedades mecánicas considerablemente superiores a los de la primera generación. Esta generación podría ser producida con base en varias combinaciones de martensita con austenita estable [22, 23].

A pesar de que los aceros de AHSS de primera generación tienen propiedades mecánicas diferentes a los aceros de generaciones más recientes, cabe destacar que estos aceros siguen siendo utilizados en la industria automotriz, ya que tienen propiedades físicas y mecánicas por encima de cualquiera de los aceros de alta resistencia (HSS). Esto se debe a la diferencia microestructural que presentan los aceros AHSS con respecto a los aceros HSS; mientras que los aceros HSS son monofásicos, los aceros AHSS son aceros multifase, los cuales combinan las fases en cantidades y proporciones adecuadas a las necesidades de la aplicación [8, 22].



Los aceros AHSS se dividen según las propiedades mecánicas que presentan, con un límite elástico mayor a 300 MPa y una resistencia a la tracción mayor a 600 MPa (ver Figura 2.1). En contraposición para los aceros HSS convencionales, en los que la ductilidad disminuye con el incremento del esfuerzo; mientras que, los aceros AHSS combinan una alta resistencia y formabilidad. Estos aceros presentan un alto nivel de absorción de energía potencial (aceros DP y TRIP con resistencia a la tracción menor a 1000 MPa) y utilizan esta propiedad durante la carga dinámica ocasionada durante accidentes automovilísticos y colisiones para incrementar la protección a las vidas de los pasajeros de los automóviles [23].

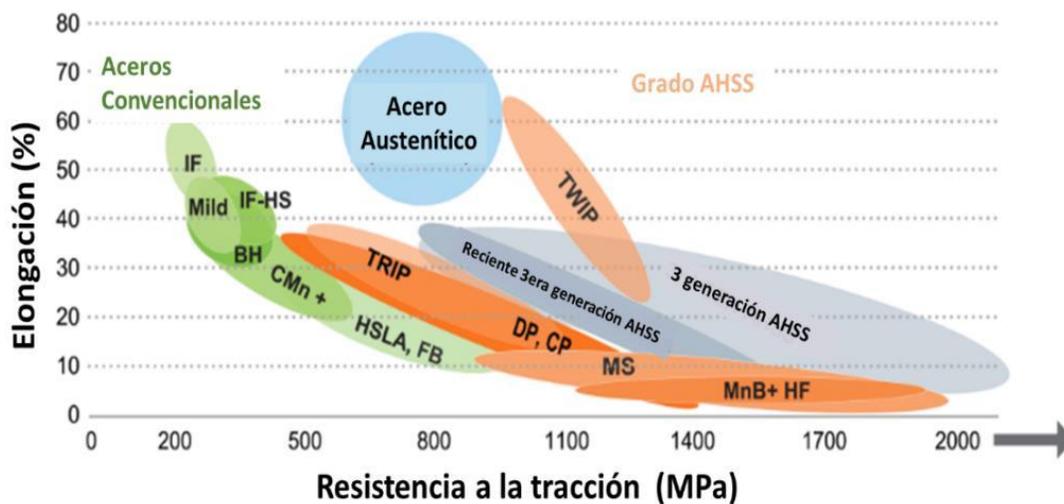


Figura 2.1 Diagrama de formabilidad de los aceros AHSS [24].

Uno de los aceros más destacados por su aplicación en la industria automotriz, son los aceros DP, de acuerdo a la investigación presentada por Fonstein [25], se determinó que en algunas marcas de vehículos, más del 40% del total de aceros utilizados para el ensamble de los automóviles son aceros DP.

2.2 Aceros Dual Phase (DP).

Los aceros DP son utilizados para la estructura de automóviles, estratégicamente en partes que refuerzan la seguridad al momento de colisión, debido a que tienen un balance adecuado entre resistencia y estampado, permitiendo la absorción de la energía provocada por impacto [3].

Normalmente los aceros DP se obtienen de tratamientos térmicos aplicados a aceros de bajo contenido de carbono con un enfriamiento súbito y controlado. Pueden ser fabricados por laminación en caliente, laminación en frío (comúnmente utilizados en la industria automotriz) o por recocido continuo [1, 26]. Los aceros DP tienen microestructura compuesta principalmente por una matriz de ferrita, que proporciona ductilidad, a su vez, entre la matriz ferrítica se encuentran una serie de islas de martensita que confieren la resistencia a los aceros DP. De esta microestructura es que proviene el nombre de Dual Phase o doble fase [27]. En la Figura 2.2 se muestra la microestructura de un acero DP, donde la martensita se encuentra marcada con la letra M, la cual tiene un tono más oscuro en la imagen y la ferrita con un tono claro marcada por la letra F.

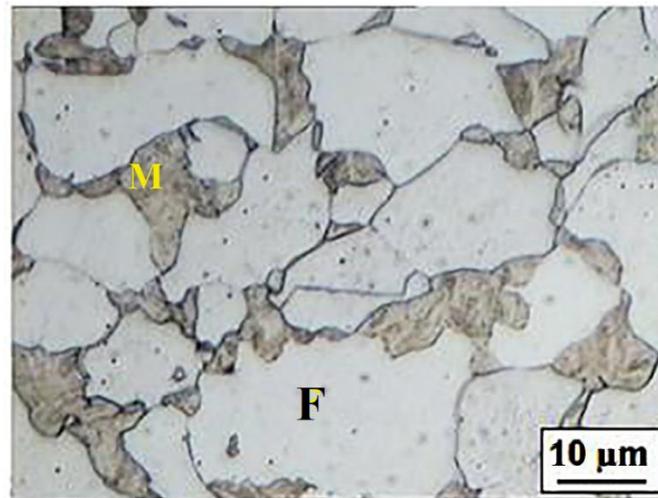


Figura 2.2 Representación de la microestructura de un acero DP [27].

2.2.1 Composición química de los aceros DP.

Como se mencionó, los aceros DP están conformados principalmente por islas martensíticas rodeadas de una matriz de ferrita. El procesamiento básico del acero consiste en un tiempo de recocido corto en la región del diagrama de fase intercrítica (austenita y ferrita) para producir una estructura de ferrita y austenita. Continuando con un enfriamiento rápido para transformar la austenita en martensita. Los aleantes como fósforo, cromo, vanadio, silicio, molibdeno y manganeso promueven el desarrollo de la fase martensítica en el acero DP. Los aceros DP, comúnmente, contienen elevadas cantidades de manganeso que



llegan a ser incorporadas hasta en 2 % en peso (wt%). El contenido elevado de manganeso suele resultar en una formación heterogénea o en segregación de la fase martensítica, pero con un detrimento en su formabilidad [22, 28]. La composición química de los aceros DP se basa en la composición de los aceros al carbono-manganeso. La Tabla 1 muestra cómo influyen los elementos aleantes en las diferentes fases presentes y en algunas de las propiedades mecánicas de los aceros DP [29].

Tabla 2.1 Impacto de la adición de aleantes en los aceros DP [29].

Elemento	Influencia de la adición
C < 0.1%	Principal elemento endurecedor de la martensita, reduce la tenacidad de la martensita, determina la fracción de martensita en la microestructura, reduce la soldabilidad a medida que aumenta el carbono equivalente.
Mn	Estabilizador de la austenita, mejora la templabilidad, retrasando en particular la formación de perlita y bainita, endurece la ferrita.
Si	Estabilizador de la ferrita, genera más ferrita poligonal, evita partículas de martensita conectadas entre sí, endurece la ferrita.
P	Endurece la ferrita.
Cr, Mo	Aumentan la templabilidad, retrasando o inhibiendo la formación de perlita.

2.3 Soldadura de puntos por resistencia (RSW).

La soldadura de puntos por resistencia es el proceso predominante en la familia de soldaduras por resistencia. Mediante este proceso se unen permanentemente láminas metálicas superpuestas entre sus superficies, que a la vez corresponden a las zonas de contacto entre las piezas y electrodos. Este proceso está diseñado para trabajar con láminas de un espesor de no más de 3 mm, utilizado principalmente en aquellas situaciones en donde no se requiere un ensamble hermético, por lo general, las cuales son utilizadas en la manufactura de automóviles, muebles y otros productos de naturaleza similar. Otra aplicación se encuentra en la industria de los trefilados donde la soldadura RSW une varillas delgadas para formar mallas metálicas. La forma de la punta del electrodo determina las características geométricas y las dimensiones del botón de soldadura, siendo la punta redonda la más utilizada, pero existen diversas formas según la aplicación requerida [30, 31].

Los materiales a unir pueden ser de diferente composición química o grosor, aunque, lo común son las uniones de láminas de un mismo acero y grosor. En Figura 2.3 se muestra el producto de un punto o botón de soldadura formado al pasar la corriente de soldadura a través de las láminas de acero coincidentes por la fuerza aplicada por los electrodos durante un periodo específico, de tal manera que el calor generado por la resistencia al paso de la corriente induce a la fusión entre las láminas creando el botón de soldadura [32, 33].

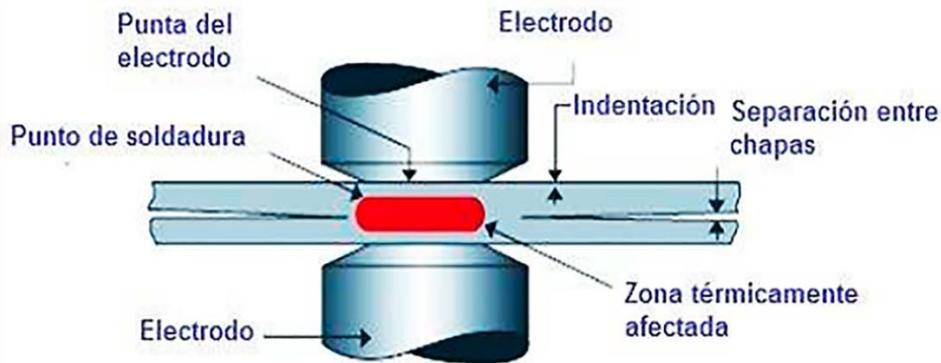


Figura 2.3 Representación esquemática del proceso RSW [30].

2.4 Ciclo de la soldadura de puntos por resistencia.

A continuación, se describen las cuatro etapas que conforman el ciclo térmico de la soldadura RSW, las cuales son: sujeción, fusión o soldeo, forja y liberación [34, 35]. La Figura 2.4 muestra un esquema gráfico de las etapas del ciclo térmico.

1. Sujeción: es el periodo donde los electrodos se aproximan a las piezas de trabajo, aplicando la presión establecida y asegurar que habrá el contacto necesario antes de aplicar la corriente de soldadura.
2. Fusión o soldeo: es el periodo donde se aplica el paso de la corriente de soldadura a través de los electrodos a las piezas de trabajo.
3. Forja: es el periodo donde se mantiene la presión aplicada por los electrodos, asegurando que se forme el botón de soldadura.
4. Liberación: es el periodo donde los electrodos vuelven a su posición inicial, permitiendo retirar la pieza de trabajo y colocar una nueva pieza.

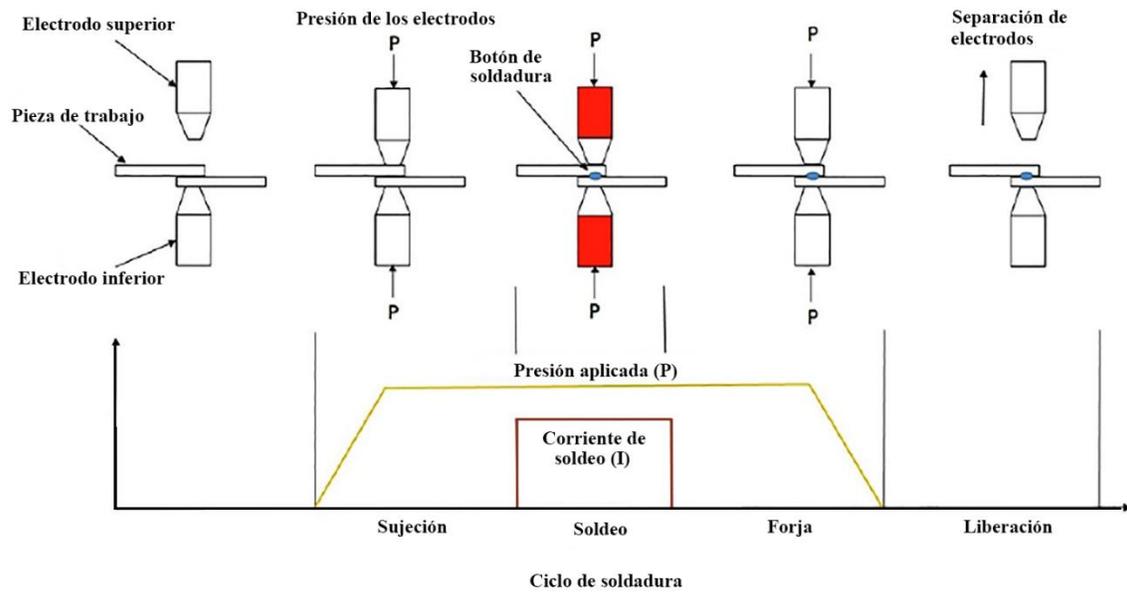


Figura 2.4 Etapas del ciclo térmico de la soldadura RSW [15].

2.5 Resistencia eléctrica presente en la soldadura RSW.

Al efectuar la soldadura RSW, la corriente de soldadura debe pasar de una punta de un electrodo, a través de los aceros que van a unirse, hasta la otra punta del otro electrodo [31]. No obstante, la resistencia eléctrica total del sistema no debe ser demasiado elevada porque puede provocar el calentamiento descontrolado de las áreas cercanas al contacto de los electrodos [36]. En la Figura 2.5 se muestran las siete diferentes resistencias óhmicas que se presentan en la soldadura RSW, donde la suma de todas ellas es la resistencia total del proceso.

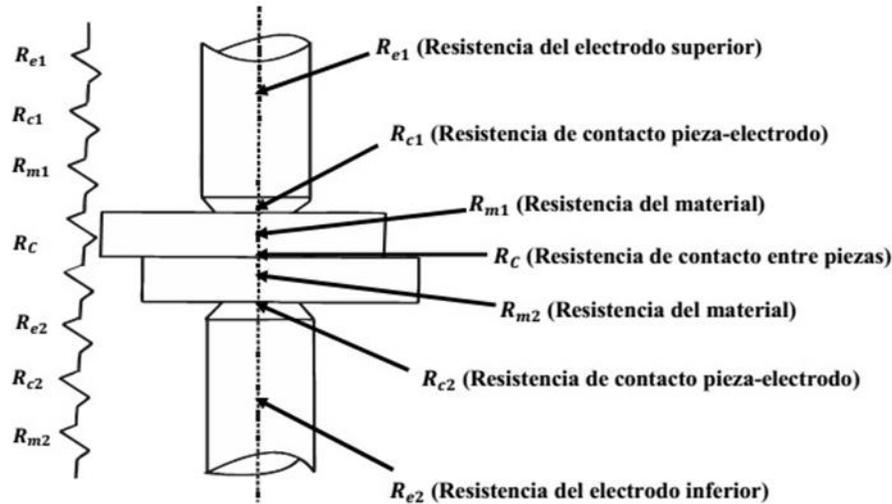


Figura 2.5 Esquema analógico de las resistencias óhmicas en el proceso RSW [36].

2.6 Generación de calor en el proceso RSW.

El calor aplicado durante el proceso RSW depende de tres factores considerados significativos, los cuales están relacionados directamente con la superficie de contacto entre los aceros y los electrodos. Estos factores se expresan en la ley de Joule a través de la ecuación (2.1) [20]:

$$Q = RI^2t \quad (2.1)$$

Donde Q , R , I y t son el calor generado (Joules), la resistencia (Ω), la corriente de soldadura (A) y el tiempo (s), respectivamente. Haciendo énfasis en que una parte del calor si es aplicado de forma efectiva para producir la unión soldada, mientras que el resto circula por las láminas de acero [30, 37].

Como se observa en la ecuación (2.1), el tiempo es directamente proporcional al calor que se puede generar, así que, un periodo prolongado de circulación de la corriente de soldadura provocaría la formación de gases y expulsión de material, debido a la alta temperatura de más de 1300 °C que se puede alcanzar en la ZF [30], como se muestra en la Figura 2.6.

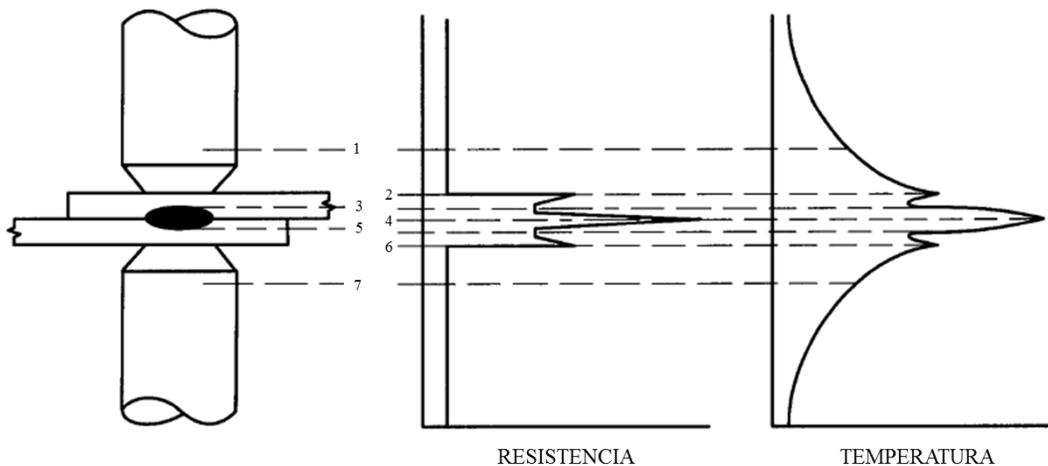


Figura 2.6 Esquema de la distribución de la resistencia y color en proceso RSW [37].

2.7 Disipación de calor en el proceso RSW.

La disipación de calor es un fenómeno que se divide en dos etapas, las cuales son: disipación durante la aplicación de la corriente y disipación después de interrumpida la corriente. El grado de disipación en la primera fase depende de la composición y la masa de las piezas de trabajo, del tiempo de soldadura y de los mecanismos de enfriamiento externos. Si los electrodos se retiran de la pieza de trabajo con demasiada rapidez después de que deja de circular la corriente, puede generar deformaciones en las láminas de trabajo [30, 38].

El fenómeno que ocurre comúnmente en el proceso RSW cuando las circunstancias son idóneas al momento de realizar la soldadura es que, la refrigeración por agua de los electrodos genera un efecto de tipo sumidero absorbiendo casi en su totalidad el calor y el resto se mitiga a través del MB, como se observa en la Figura 2.7. Si el enfriamiento no es óptimo en el proceso RSW debido a que los parámetros de soldadura fueron incorrectos o se presentaron barreras térmicas no deseables pueden formarse poros por la expulsión de material e incluso fisuras, especialmente cuando el volumen que se contrae durante la soldadura es demasiado grande [38].

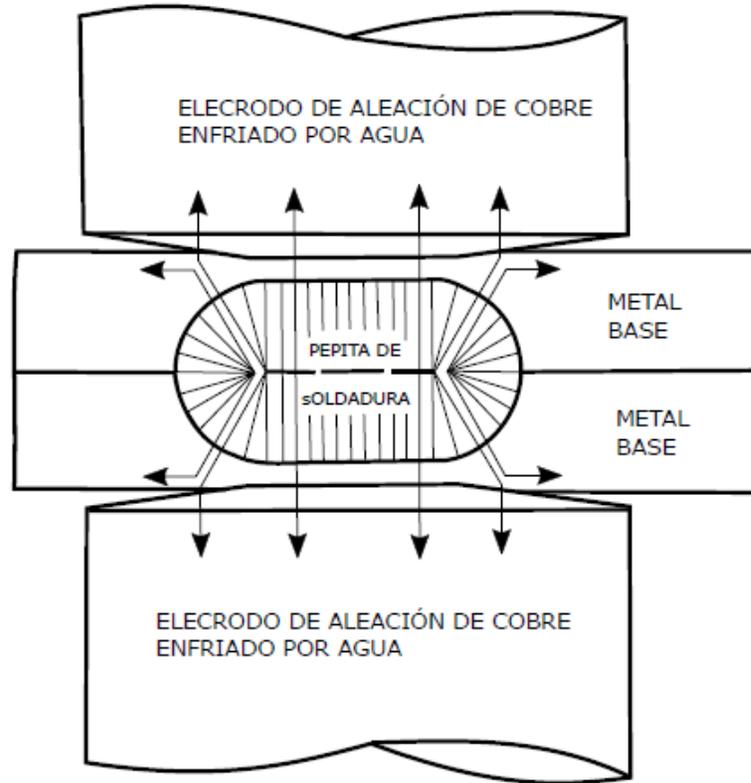


Figura 2.7 Disipación de calor óptimo durante el proceso RSW [38].

2.8 Diseño de experimentos factorial completo (FFD).

Los modelos de diseño de experimentos tienen como objetivo determinar los factores que influyen en una variable de interés, es decir, es una herramienta estadística capaz de detectar con precisión que pruebas deben llevarse a cabo y el orden con el que hay que hacerlas. De esta manera se obtendrán datos que puedan ser analizados estadísticamente y que muestren una evidencia significativa de los factores que afectan de forma real a una variable de respuesta.

En la industria y la investigación es común hacer pruebas experimentales para resolver problemas o comprobar alguna hipótesis de investigación; no obstante, es normal que se lleven a cabo experimentos con base en el ensayo y error. El método del ensayo y error se vuelve ineficiente si se quiere implementar en procesos o pruebas con alta dificultad. A continuación se muestran ejemplos de situaciones convencionales que tienen solución con el diseño y el análisis de experimentos [39]:



1. Seleccionar el mejor material que cumpla con requerimientos específicos de un área, aun cuando se tengan materiales con características similares.
2. Comparar dos o más instrumentos de medición para establecer si existe una diferencia significativa o no entre sus mediciones (calibración).
3. Determinar los parámetros con mayor significancia para una operación, los cuales representan la mayor influencia sobre una o más propiedades de un producto deseado.

El FFD considera diferente número de factores, así como diferente cantidad de categorías o niveles según la variación deseada por factor, por lo que, uno de los diseños de mayor uso es el 3^k , el cual considera k factores con tres categorías para cada factor. Este diseño utiliza 3^k experimentos con la desventaja de que el número de pruebas incrementará con el número de factores empleados, ocasionando que se utilicen pocos factores (de tres a cuatro como máximo). Sin embargo, es de vital importancia su uso debido a que no todos los factores se pueden evaluar mediante dos niveles, sumando que es una excelente herramienta cuando es de interés estudiar efectos de interacción entre factores o de curvatura (efectos cuadráticos). En los diseños factoriales es de considerar que en un comienzo todas los parámetros de entrada se consideran independientes entre ellos, es decir, no hay efectos establecidos de un parámetro a otro [39, 40].

En el análisis factorial completo si se requiere de utilizar una o varias réplicas, cada réplica deberá llevarse a cabo con todos los posibles experimentos establecidos. Para comprender de una mejor forma la utilidad del diseño de experimentos se emplea el modelo estadístico para los diseños experimentales [41]. A continuación, se presenta la ecuación (2.2) del modelo estadístico para 3^k desarrollado por Porra [42].

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijk} \quad (2.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, c$$

Donde μ es la media, τ_i , β_j y γ_k son los efectos provocados por las categorías de los parámetros de entrada, $(\tau\beta)_{ij}$, $(\tau\gamma)_{ik}$, $(\beta\gamma)_{jk}$ y $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ son los efectos producidos por las interacciones entre los diferentes factores y u_{ijk} es el error.



Para conocer si el modelo estadístico es adecuado para la estimación o predicción de resultados se emplea el coeficiente de determinación R^2 . El valor de R^2 se conoce como un estadístico que permite medir la calidad de cualquier modelo de regresión [39]. El valor del coeficiente de determinación se obtiene a partir de una tabla de ANOVA mediante la ecuación (2.3):

$$R^2 = \frac{SS_{total} - SS_{error}}{SS_{total}} \cdot 100 = \frac{SS_{modelo}}{SS_{total}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

2.9 El método de Taguchi.

En el diseño de experimentos es necesario establecer todas las combinaciones posibles que relacionen los parámetros o factores con sus diferentes niveles que interactúan en el proceso que será estudiado. La solución que se implementó estadísticamente para relacionar cada factor fue la utilización de matrices que permitan indicar una ortogonalidad entre los factores. La ortogonalidad en el diseño de experimentos implica que los factores puedan ser evaluados de forma independiente, de tal manera que el efecto de un factor no intervenga en la estimación de otro factor. Taguchi desarrolló una serie de arreglos ortogonales basados en las matrices del diseño experimental fraccionado. Estos arreglos propuestos por Taguchi son aproximaciones que permiten determinar las combinaciones apropiadas para analizar el efecto de los factores sobre una respuesta. La metodología propuesta por Taguchi y el uso específico de los arreglos ortogonales ha demostrado resultados acertados al disminuir la variabilidad de las observaciones [4, 39].

Pueden emplearse una o más réplicas para dar mayor seguridad al estudio; no obstante, si el número de factores aumenta, también lo harán la cantidad de corridas. Se debe tomar en cuenta el tiempo y los recursos con los que se cuenta para llevar a cabo el experimento. Con realizar una parte del número de las interacciones es posible hacer inferencia de los efectos principales de los factores [40].



Una gran ventaja del uso del Método de Taguchi es que el número de tratamientos es menor (ver Tabla 2) que los experimentos requeridos para un diseño de experimentos factorial completo y permite encontrar con relativa facilidad cuál es la mejor combinación de niveles de los factores según sea el caso. No obstante, se desconoce las posibles interacciones entre los diferentes factores.

Tabla 2.2 Arreglo ortogonal para un experimento 3^3 .

A	B	C
1	1	1
1	2	2
1	3	3
2	1	2
2	2	3
2	3	1
3	1	3
3	2	1

Al momento de utilizar el método de Taguchi, se recomienda analizar la variación del proceso empleando una relación apropiada de S/N. Las relaciones señal/ruido son derivadas de la función de pérdida cuadrática y se tienen tres de ellas como principales: nominal es mejor, mayor es mejor y menos es mejor [43]. A continuación, se muestra la ecuación (2.4) correspondiente a la elección mayor es mejor.

$$(S/N)_L = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum \frac{1}{y^2} \right) \quad (2.4)$$

2.10 Red Neuronal Artificial (RNA).

Las RNA's son sistemas inteligentes diseñados para resolver problemas a través de un aprendizaje simulando las funciones que realizan las neuronas biológicas. Una neurona biológica es una unidad que puede procesar información recibiendo un estímulo y combinando de forma continua señales de otras neuronas que a su vez envía información a otras neuronas [44].

La estructura de una neurona biológica está compuesta de manera resumida por el axón (salida), conectado a las dendritas (entradas) de otras neuronas mediante sinapsis, cuya eficacia es modificable durante el proceso de aprendizaje. Como parte central de la neurona se encuentra el núcleo y el cuerpo celular (ver Figura 2.8).

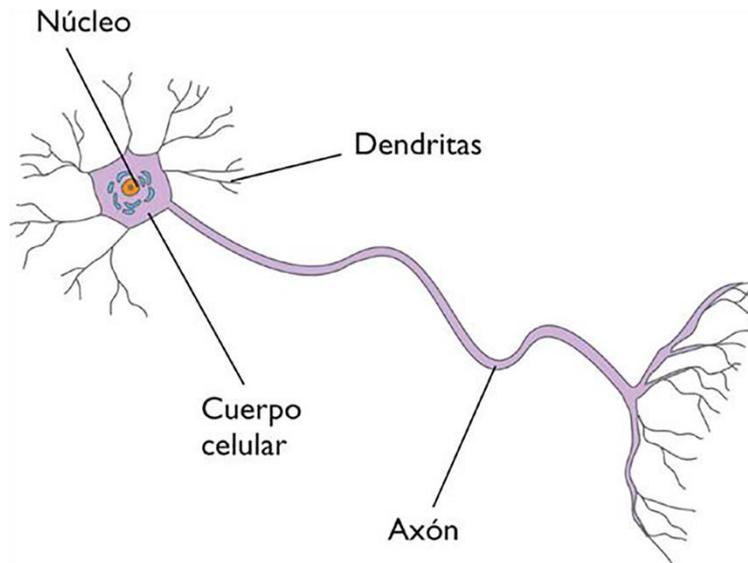


Figura 2.8 Diagrama análogo de una neurona biológica [44].

La neurona artificial fue diseñada para tratar de obtener unas características de funcionamiento básicas semejantes a las de una neurona biológica como mecanismo de aprendizaje para modelos computacionales [45, 46]. La neurona permite almacenar conocimiento experimental y a través de su procesamiento mediante las conexiones con otras neuronas puede resolver problemas de gran complejidad [21]. Los modelos de RNA se representan por tres tipos de capas (ver Figura 2.9): la primera capa es la de entrada, en ella se encuentran las neuronas que estarán recibiendo los valores de entrada (ecuación (2.5)); la segunda capa llamada como capa oculta, en ésta se encuentran un conjunto de neuronas para las cuales sus entradas y salidas pertenecen al mismo sistema y de forma general resuelven ecuaciones similares a la (2.6); la tercera capa es la de salida, aquí las neuronas tienen sus entradas provenientes de la segunda capa y las salidas van hacia el exterior, devolviendo los resultados [47].

$$x = \{0,1\} \tag{2.5}$$

$$S = F \cdot (F \cdot (x \cdot W_1) \cdot W_2) \tag{2.6}$$

Donde x es un vector de entrada que puede tomar valores de $\{0,1\}$, F es la función de activación que permite realizar la sinapsis entre las neuronas. Los pesos W_1 y W_2 son matrices de conexión entre las capas de la red, las cuales se van modificando según se avance en el aprendizaje de la red.

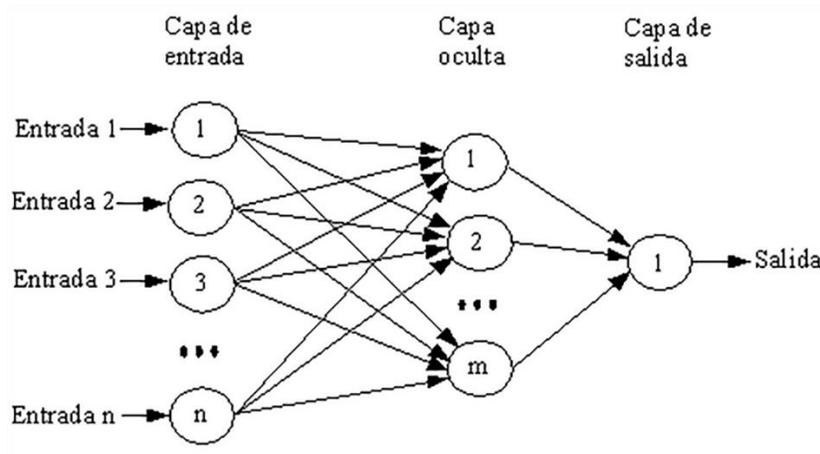


Figura 2.9 Diagrama representativo de una red neuronal artificial [45].



Capítulo 3. Desarrollo experimental.

A continuación, se muestran las distintas etapas y ensayos que se llevaron a cabo para determinar el o los factores más significativos, así como sus niveles óptimos que permitan obtener uniones soldadas de calidad. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama con la metodología realizada.

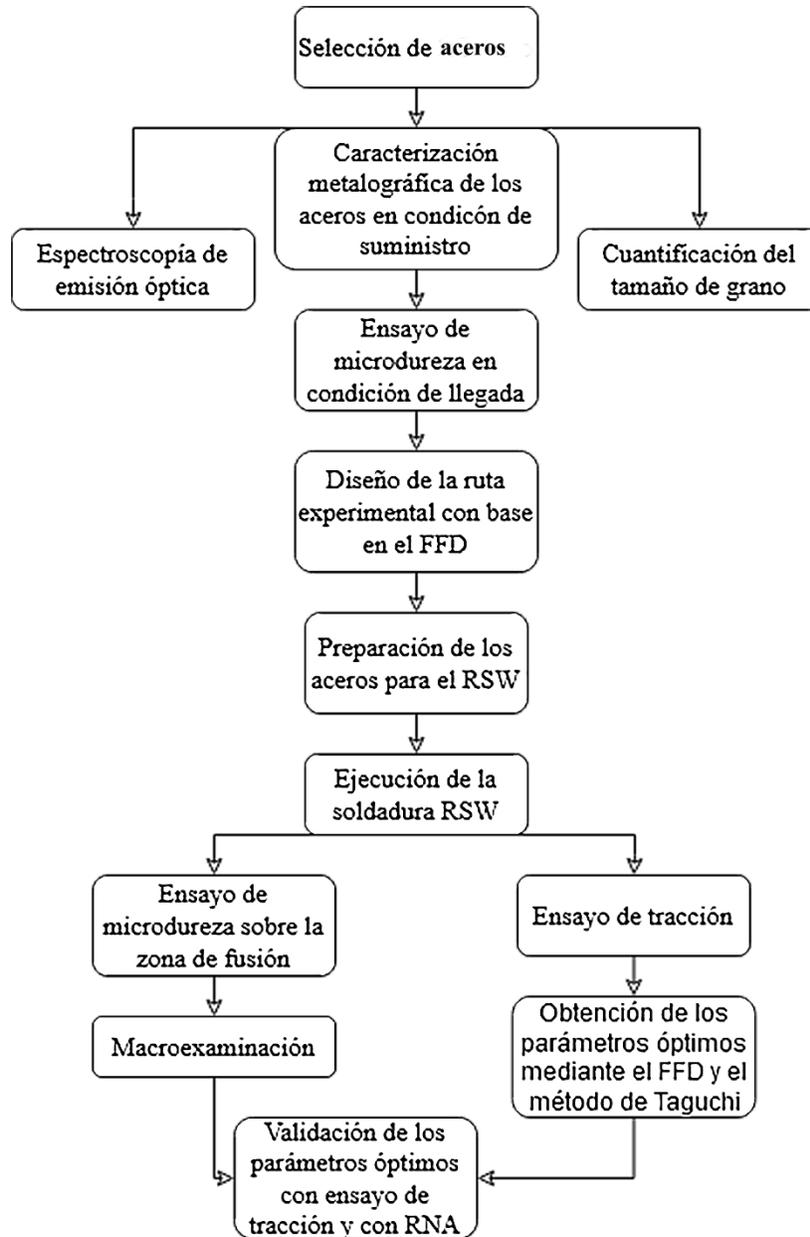


Figura 3.1 Diagrama del desarrollo experimental.



3.1 Clasificación de los aceros DP en condición de llegada.

Los aceros DP fueron el material de llegada con espesores y resistencias a la tracción disímiles utilizados en la industria automotriz, los cuales se muestran en la Tabla 3.1, iniciando con los aceros de menor resistencia mecánica. Los aceros DP fueron marcados con una serie alfanumérica que es descrita en la Tabla 3.2 donde se pueden identificar otras cualidades de fabricación.

Tabla 3.1 Clasificación de los aceros DP con base en su resistencia mecánica.

TIPO DE ACERO	ESPESOR (mm)	CANTIDAD DE LOTES (50 piezas)
<i>JAC270C</i>	1.7	3
<i>JAC270</i>	0.71	2
<i>JAC270</i>	0.98	2
<i>JAC270C</i>	1.539	2
<i>JAC270F</i>	1.151	2
<i>JAC270C</i>	1.151	2
<i>JAC270</i>	0.48	2
<i>JAC789TC</i>	1.73	3
<i>JAC590</i>	0.87	2

Tabla 3.2 Descripción de los caracteres de la serie de identificación.

J	(A=CON S=SIN)	(C= FRÍO)	NUMÉRICO	A-Z (menor a mayor)
Acero japonés	Recubrimiento	El tipo de laminación	Resistencia mecánica en Mpa	Formabilidad en frío

3.2 Caracterización metalográfica de los aceros DP en condición de llegada.

Para llevar a cabo el análisis microestructural de los aceros DP en condición de llegada y en condición as-welded se utilizó un microscopio óptico de la marca Optika®. Fueron cortados segmentos de 15x15 mm con una máquina STRUERS modelo Lobotom-3 y disco para corte metalográfico AUSTROMEX de 10 plg. Posteriormente, todos los segmentos de los aceros DP fueron encapsulados con el equipo STRUERS modelo CitoPress-1 durante 14 min a 320 bar con 180 °C.



Se efectuó el desbaste de la probeta con hojas de lija de SiC de diferentes granulometrías, primero con la lija más gruesa (P100, P150, P240, P320, P400 y P600) hasta la granulometría para un micro acabado (P800, P1000, P1200, P1500 y P2000) marca Trupper, rotando 90° cada vez que se pasaba a otra granulometría y observando que las líneas estuvieran en el mismo sentido hasta lograr una superficie lisa y plana, según las normas de graduación FEPA (Federation of European Producers of Abrasives, por sus siglas en inglés) [48].

3.3 Espectroscopia de emisión óptica (OES).

Es un análisis directo que se practica sobre muestras metálicas conductoras de corriente con base en la obtención de chispas entre dos electrodos que se encuentran en contacto con el metal de interés, se produce un plasma de vapor en el cátodo del equipo de prueba a una temperatura mayor de 10000 K. Se considera una técnica de determinación rápida y simultánea de diversos elementos químicos en aleaciones, caracterizada por su flexibilidad analítica. El ensayo se realizó en las instalaciones de la compañía conocida como Fundidora Morelia para los diferentes aceros DP en condición de llegada.

3.4 Cuantificación del tamaño de grano.

La cuantificación del tamaño de grano se realizó siguiendo la práctica establecida en [49] y en combinación con el uso del software Image J (software libre) para el análisis de imágenes. Mediante una escala determinada por las imágenes tomadas de un microscopio óptico se midieron diversos diámetros de grano de la fase ferrítica en distintas zonas de las micrografías para tener una cuantificación de toda la imagen y no únicamente de un área por conveniencia. El tamaño de grano es igual a la media de los resultados obtenidos en las micrografías de 40 mediciones de cada zona y procesado mediante la ecuación (3.1).

$$G = [-6.646 \cdot \log(mm)] - 3.298 \quad (3.1)$$

Donde G es el valor del tamaño de grano en ASTM y mm es el promedio de las mediciones realizadas a cada grano mediante el software Image J.

3.5 Ensayo de microdureza en condición de suministro de los aceros DP.

Los diferentes perfiles de microdureza se realizaron con un equipo modelo MVK-HVL marca MITUTOYO® con el que se llevaron a cabo las indentaciones sobre los aceros DP conectado a una pantalla videoline micrometer VL-101 (Figura 3.2). Las marcas de indentación fueron hechas al azar para obtener valores representativos de todo el acero DP con una carga de 200 gr en un periodo de 15 segundos. Los aceros DP deben tener acabado espejo para realizar el ensayo, de lo contrario será complicado identificar la huella en la superficie del material.



3.2 Microdurómetro MITUTOYO®.

3.6 Ruta experimental con base en el Diseño Factorial Completo (FFD).

Para llevar a cabo el proceso RSW se utilizó un diseño ortogonal L_{27} siguiendo los pasos del diseño factorial con una réplica (debido a la limitante de material) para asegurar una mayor certeza en del modelo matemático que se obtendrá por medio de esta técnica. A continuación, se muestra la metodología:



1. Establecer los factores que serán modificados en las pruebas del proceso RSW, así como los niveles (variaciones) de los mismos como se muestra en la Tabla 3.3.
2. Crear la matriz de experimentos mediante el software STATISTICA®. Se deben ubicar los niveles de las variables dentro del arreglo ortogonal L_{27} , la cual fue la guía para realizar las pruebas en un orden que permitió una mejor relación estadística como se muestra en la Tabla 3.4, a su vez se tomaron los resultados necesarios para realizar el análisis de Taguchi.

Tabla 3.3 Factores y variaciones para la generación de la matriz experimental.

Niveles	Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)
1	3500	500	0.48/0.98
2	4500	1000	0.48/1.7
3	5500	1500	0.98/1.7

Tabla 3.4 Experimentos necesarios para el arreglo L_{27} .

No. de probeta	Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)	No. de probeta	Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)
1	3500	500	1.46	15	4500	1000	2.68
2	3500	500	2.18	16	4500	1500	1.46
3	3500	500	2.68	17	4500	1500	2.18
4	3500	1000	1.46	18	4500	1500	2.68
5	3500	1000	2.18	19	5500	500	1.46
6	3500	1000	2.68	20	5500	500	2.18
7	3500	1500	1.46	21	5500	500	2.68
8	3500	1500	2.18	22	5500	1000	1.46
9	3500	1500	2.68	23	5500	1000	2.18
10	4500	500	1.46	24	5500	1000	2.68
11	4500	500	2.18	25	5500	1500	1.46
12	4500	500	2.68	26	5500	1500	2.18
13	4500	1000	1.46	27	5500	1500	2.68
14	4500	1000	2.18	--	--	--	--

3.7 Preparación de los aceros DP para ejecución del proceso RSW.

Es necesario calcular el traslape para la unión de los aceros DP y que los botones de soldadura tengan el espacio necesario para formarse. La ecuación (3.2) permite un cálculo simple y efectivo para la distancia de contacto de los aceros DP que debe estar en contacto durante proceso.

$$R = 2.5 \cdot d \quad (3.2)$$

Donde R es la distancia que de abarcar el traslape en milímetros y d es el diámetro de en milímetros de la punta de los electrodos.

Posteriormente se marcaron los aceros DP que serían soldados y se marcó el centro del traslape donde debería realizarse la unión. En la Figura 3.3 se muestra un esquema de la unión de aceros disímiles en espesor con la distancia de traslape utilizada en la unión con el proceso RSW.

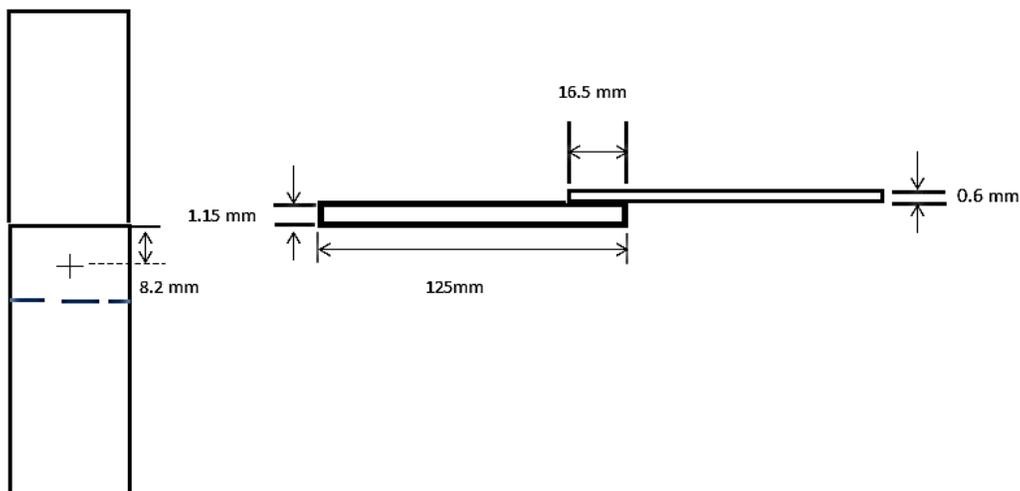


Figura 3.3 Traslape y posicionamiento de los aceros DP.

Normalmente, la falla en el proceso RSW ocurre en dos formas: interfacial y extraíble. En el modo interfacial, la falla ocurre por una grieta a través de la zona de fusión; mientras que, en la extraíble, el fallo se produce mediante la extracción de pepitas de una de las hojas

[50]. Suele ser común que haya fractura en la interfacial del botón de soldadura, fractura que no es deseada en este tipo de proceso al indicar una mala calidad de la unión [51].

3.8 Proceso de soldadura RSW.

Para llevar a cabo el proceso de soldadura se empleó una máquina soldadora de puntos por resistencia *Pirámide* modelo 0357 con control semi-automático a través del software LabVIEW® para la variación de los parámetros de soldeo en tiempo real (ver Figura 3.4). Los parámetros utilizados fueron la intensidad de corriente (I) y el tiempo (t), mientras que la presión (P) se mantuvo constante a 110 Psi al ser un parámetro óptimo de acuerdo a Reyes et al. [52].



Figura 3.4 Máquina Pirámide modelo 0357 semi-automática.

3.9 Ensayo de tracción.

Los ensayos de tensión se realizaron con los aceros unidos como se mostró en la Figura 3.3 con una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON-Microest 1195R modelo 5500R (ver Figura 3.5), la cual cuenta con dos celdas de carga de 0.5 y 10 ton según el tipo de ensayo deseado. Los datos fueron capturados y procesados por medio del software MERLÍN. El objetivo del ensayo fue cuantificar la carga máxima que resiste la unión de aceros disimiles por RSW con una precarga de 15 N a una velocidad constante del cabezal móvil de 0.1 mm/s.



Figura 3.5 Máquina universal Instron-Microest modelo 1195R.

3.10 Macroexaminación de la unión soldada.

La macroexaminación se realizó posterior a la ejecución del proceso RSW, se cortaron los botones de soldadura a la mitad con ayuda de una cortadora metalográfica marca STRUERS modelo Lobotom-3 con medio lubricante para no afectar térmicamente las



uniones. Una vez hecho el corte, los botones de soldadura fueron preparados mediante desbaste y pulido convencionales como se indica en la sección 3.2 de este capítulo. Al finalizar la preparación pertinente se tomaron macrográficas con el equipo Digital Microscope, mostrado en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Microscopio digital empleado en la macroexaminación.

3.11 Ensayo de microdureza en condición as-welded.

Los perfiles de microdureza de los botones obtenidos mediante el proceso RSW de acero DP se obtuvieron con el microdurómetro marca MITUTOYO® modelo MVK-HVL, empleando la escala Vickers con una carga de 200 gr (HV) durante 15 segundos. Se realizaron alrededor de 30 huellas de manera transversal en las diferentes zonas presentadas en un botón de soldadura RSW como se muestra en la Figura 3.7, según algunos de los criterios establecidos por la norma ASTM E384 [53].

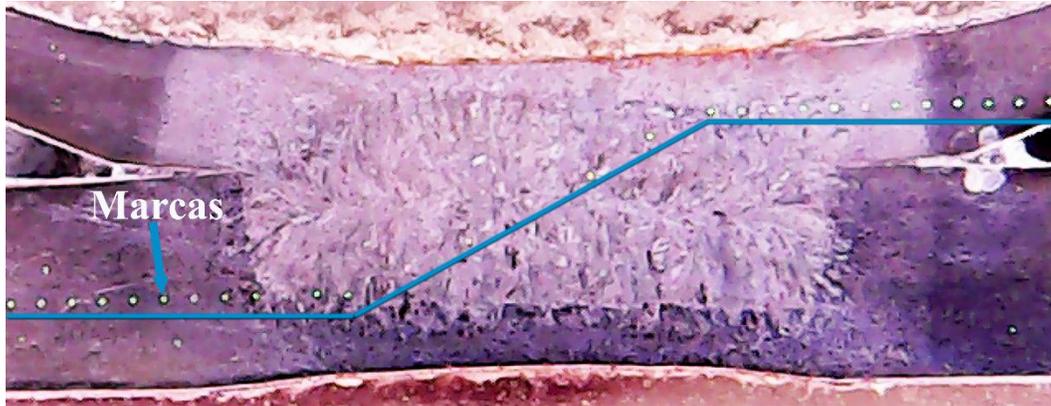


Figura 3.7 Esquema de barrido marcado por la línea azul.

3.12 Redes Neuronales en MATLAB®.

Para la implementación de las RNA's como solución al problema de evaluar la aceptación o no de un punto de soldadura se empleará el software MATLAB® y la aplicación Neural Network Toolbox, el cual se activa mediante el comando “nntool”. Este comando abrirá una ventana que funciona como guía de interacción con el usuario.

Será necesario crear una matriz con los datos de entrada y una segunda matriz con los datos objetivo o la salida deseada. Con el objetivo de utilizar y obtener mejores resultados se recomienda normalizar las matrices de entrada y de salida, es decir, transformar los valores de las matrices en intervalos que pueden ser de [0,1] o [-1,1] para lo cual se tienen diferentes técnicas como: el estadístico Z, normalización Min-Max y la normalización Sigmoide. El normalizado es deseable debido a que hay una gama muy extensa de magnitudes y unidades que se emplean en las diferentes variables de cada fenómeno a estudiar. A continuación, se presenta la ecuación (3.3) (Min-Max), que es la que se utilizará para el normalizado de las variables [47].

$$x'_i = (max_{ob} - min_{ob}) \left[\frac{x_i - min_v}{max_v - min_v} \right] + min_{ob} \quad (3.3)$$

Donde x'_i es la variable normalizada, max_{ob} y min_{ob} son el valor máximo y mínimo, respectivamente, del rango al que se quiere cambiar, max_v y min_v son el valor máximo y



mínimo real, respectivamente, de la variable y x_i es cada uno de los datos que se buscan normalizar.

Dentro del Toolbox existen diferentes maneras de crear una red, según el tipo de red que se esté buscando, uno de los tipos más comunes para aproximar un problema de predicción es el feedforward o el feedforward-backpropagation. Las funciones de activación para cada capa de la red se determinan según el algoritmo para el entrenamiento de la red que se elija, teniendo de inicio el algoritmo de Levenberg-Marquardt, donde el algoritmo ha demostrado ser eficiente con la desventaja del uso de mucha memoria, implementado con éxito en el trabajo realizado por Martín et al. [19]. Al final se emplea la simulación de la red neuronal entrenada a través de nuevos datos para analizar las predicciones obtenidas.



Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados.

4.1 Caracterización de los aceros DP en condición de suministro.

Las propiedades mecánicas de los aceros DP están principalmente controladas por la fracción de volumen de la fase martensítica y la fase ferrítica, la segregación de los elementos químicos y el tamaño de grano presentes en el acero [54]. De acuerdo con Tasan et al. [55], gradientes a través del espesor dependientes del proceso y la distribución de fase martensítica pueden afectar el comportamiento de los aceros DP. A pesar de que los aceros DP tiene una susceptibilidad a comportarse de forma diferente debido a los cambios en su microestructura y procesamiento, no tendrían por qué variar de forma significativa entre las probetas correspondientes a los aceros JAC270; no obstante, se muestran cambios en el porcentaje en peso de los elementos químicos y diferencias microestructurales entre algunos de los aceros de la familia JAC270.

En la Figura 4.1(a), se muestran en la gráfica la composición química de los aceros DP de la serie JAC270, algunos de estos elementos tienen una variación considerablemente baja como: fósforo, azufre y nitrógeno; mientras que, el manganeso se mantuvo estable en todos los aceros JAC270. Dos elementos de importancia en los aceros DP, carbono y cromo, tienen variaciones notorias, considerándose incongruente porque los aceros (a), (b) y (c) tienen la misma identificación de serie (JAC270C). Mediante el porcentaje de carbono y las fracciones de fase se controla la dureza y conformabilidad de los aceros DP como se indica en el trabajo escrito por Valeria et al. [27]; por lo tanto, debería existir una cantidad similar de carbono para los aceros DP de la misma serie, aunque estos presenten diferencias en su espesor.

En las micrográficas de la Figura 4.1 (a-g) se observa que el acero de la Figura 4.1(b) tiene un grano grueso comparado con los aceros restantes, los cuales presentan un tamaño de grano considerablemente más fino. En el caso específico de los aceros de la Figura 4.1(a, f y g) se obtuvo un tamaño de grano de ASTM entre 6 y 7. Esto puede explicarse debido al efecto del cromo en los aceros de la Figura 4.1(e, f y g) presente en una mayor cantidad en su composición química; sin embargo, no explica el grano fino visto en el acero (c).

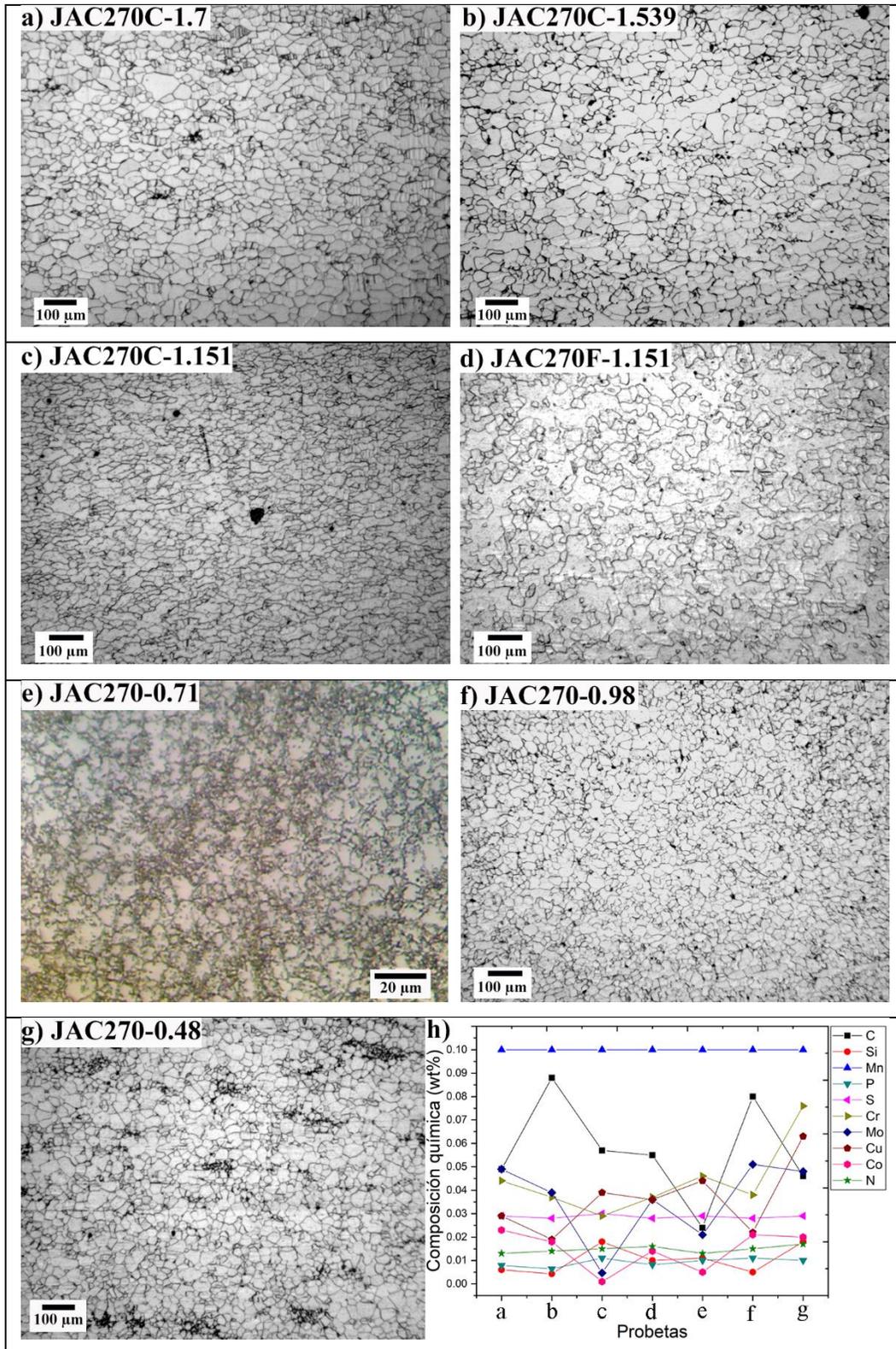


Figura 4.1 Comparación de los aceros DP JAC270; a-g) aceros DP de la serie JAC270 y h) composición química (wt%).



Los elementos aleantes como el cromo provocan diferentes resultados en la microestructura final de los aceros según el contenido de los aleantes y los procesos de fabricación que se lleven a cabo. El cromo permite el refinamiento de la fase ferrítica y obtener una mejor distribución de las fases, evitando la segregación de la martensita [56]. También es sabido que a mayor contenido de cromo mayor dureza tendrá el acero [57]. En la investigación realizada por Chen et al. [58] se identificó un comportamiento de disminución del tamaño de grano entre mayor % en peso de cromo (variando de 0 a 2) se empleaba en la fabricación de un acero aleado.

El análisis metalográfico en los aceros DP de la serie JAC270C y JAC270 muestra un grano equiaxial recristalizado, sin remanentes de deformación y con escasas islas de martensita. Estas características no corresponden con lo esperado para un acero DP laminado en frío, por ello es de esperar que el proceso de fabricación de estos aceros DP haya sido por enfriamiento controlado de una chapa de acero bajo carbono o laminado en caliente, siendo insuficiente el tiempo para formar una mayor cantidad de martensita [59].

La Figura 4.2 muestra el perfil de microdureza de los aceros DP JAC270 (correspondientes a la Figura 4.1 (a-g)), donde se observa que no hay una tendencia en los resultados, sin importar que los aceros DP pertenezcan una misma serie. Los resultados de mayor similitud se observan en los aceros (a), (b), (f) y (g). El acero (d)-JAC270F presenta una baja dureza comparada con el resto de las piezas, resultado coherente con la literal que presenta al final de su nomenclatura debido a que entre más cercana la serie a la letra “Z”, mayor confortabilidad presentará. Sin embargo, hay escasa relación con el carbono presente en este acero al tener menor dureza, también se esperaría la menor cantidad de carbono. EL acero (b)-JAC270C fue la de mayor dureza, teniendo una relación directa con la mayor cantidad de carbono en su composición química. Los valores de dureza en escala Vickers tienen similitud con los resultados obtenidos por Lorusso et al. [60].

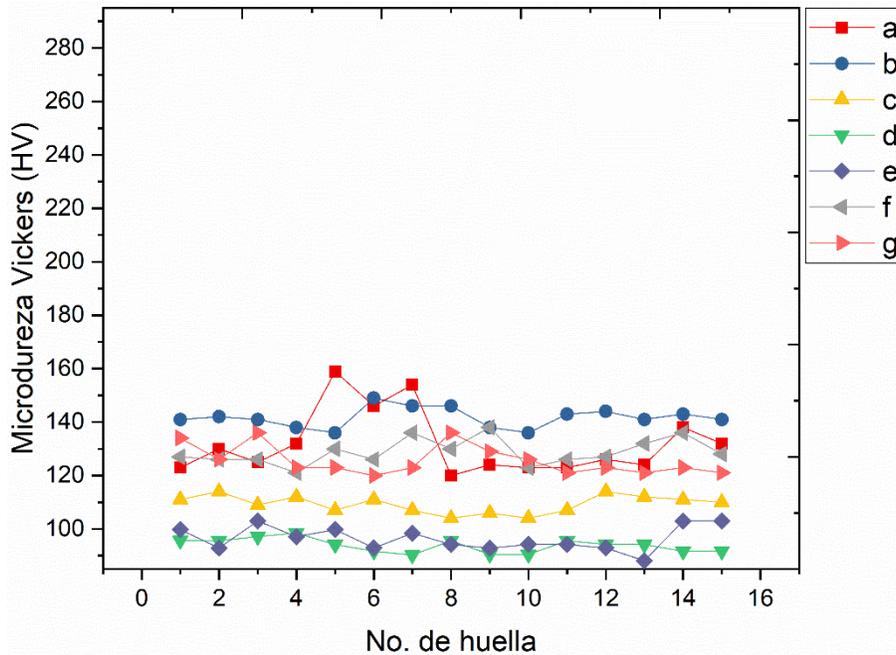


Figura 4.2 Perfiles de microdureza de los aceros DP JAC270.

Por otra parte, las piezas de mayor resistencia mecánica (JAC789TC, JAC590 y JAC590R) se presentan en la Figura 4.3 (a-c) junto a la gráfica con la composición química (Figura 4.3(d)). Es evidente que hay una relación más estable entre su composición química sin cambios notorios en algunos de los elementos aleantes, con excepción del manganeso, presente en mayor cantidad en el acero JAC590R, considerándose razonable debido a que tiene que haber mayor conformabilidad en dicha pieza por la serie a la que pertenece. Por otra parte, se puede observar un cambio sutil en el porcentaje de carbono en cada probeta donde la mayor cantidad se encuentra en la probeta JAC789TC (0.198 C%) correspondiente a la mayor resistencia a la tensión y mayor fracción de volumen de martensita visible, continuando con un menor porcentaje para el acero JAC590 y la menor cantidad para el acero JAC590R por tener mayor conformabilidad.

En el artículo realizado por Monsalve et al. [26] y concordando con el artículo de Krauss [61] se menciona que en las zonas de mayor segregación se encuentra la mayor concentración de la segunda fase martensítica, atribuyéndose a la segregación de Mn en el material, difundiendo el C hacia esas zonas generando esa mayor concentración de martensita.

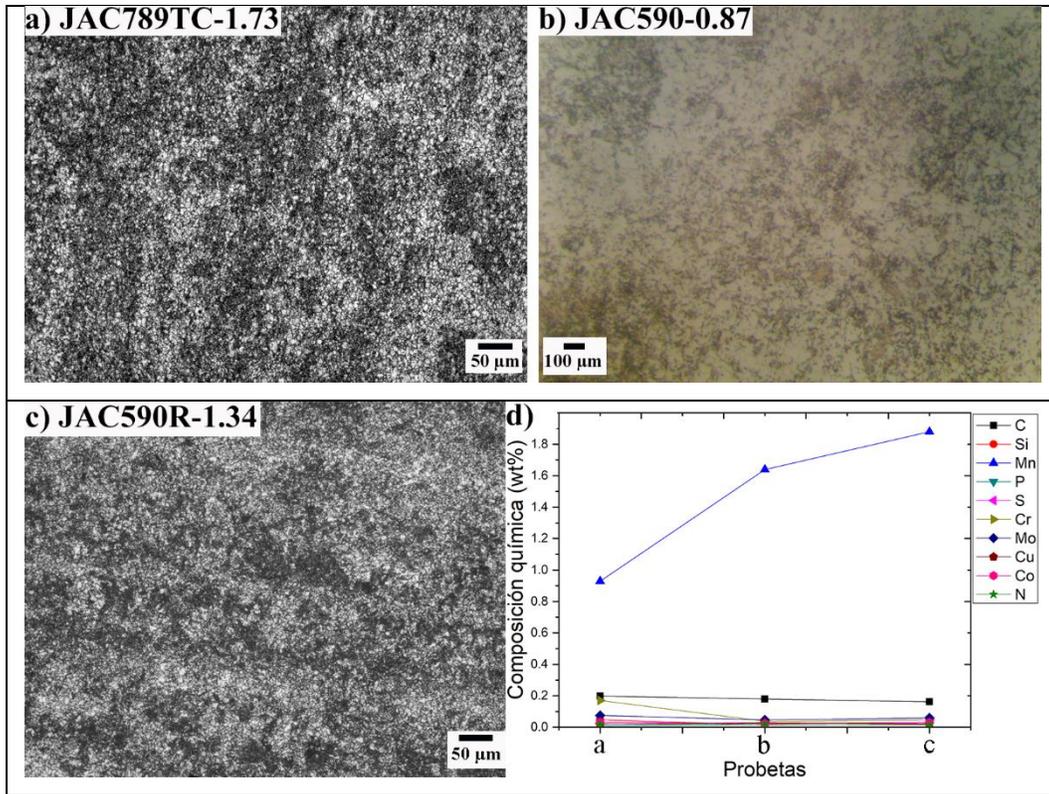


Figura 4.3 Comparación de los aceros DP JAC590-789; a-c) aceros DP JAC789TC/JAC590 y h) composición química (wt%).

En la Figura 4.4 se muestra el perfil de microdureza de los aceros DP de la Figura 4.3 (a-c), presentando la mayor dureza en la pieza JAC789TC, resultado esperado al tener la mayor resistencia mecánica y la mayor proporción de C. Comparando los aceros JAC590 y JAC590R era de esperar que la mayor dureza la tuviese la pieza JAC590. Sin embargo, se observa un mayor número de puntos superiores de dureza en la pieza JAC590R, por la serie a la que pertenece debería presentar menor dureza al tratarse una pieza con mayor conformabilidad.

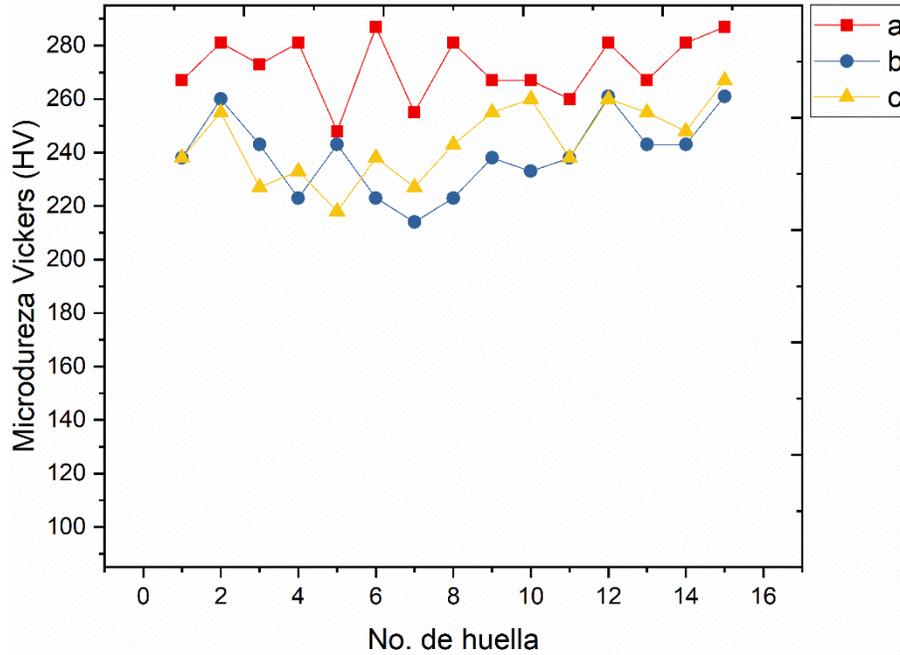


Figura 4.4 Perfiles de microdureza de los aceros DP: a) JAC789TC, b) JAC590 y c) JAC590R.

El comportamiento mecánico entre los aceros DP JAC270, JAC590 y JAC789TC es congruente en general. Esto puede corroborarse mediante la comparación de los valores de microdureza de las Figuras 4.2 y 4.4. La menor microdureza se obtuvo en los aceros DP JAC270 con un valor promedio de 118.22 HV, seguido de los JAC590 con un promedio de 241.3 HV, mientras que la mayor microdureza se encontró en el acero DP JAC789TC con un valor promedio de 272.2 HV. Estos resultados concuerdan con la fracción de martensita y el tamaño de grano (ASTM), los cuales se muestran de manera general para los tres tipos diferentes de aceros DP en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Fracción de martensita y tamaño de grano ferrítico (ASTM) [62].

	Martensita fracción de volumen (%)	Tamaño de grano (ASTM)
DP-270	3	7
DP-590	33	13
DP-789	40	12

Con el objetivo de llevar a cabo la unión de los aceros DP y comprender cómo afecta el proceso de soldadura RSW, fueron seleccionados tres aceros DP (1, 6 y 7 de la Figura 4.1). El criterio de selección fue su microestructura relativamente similar y la diferencia de espesor

que tienen entre estos aceros DP, permitiendo un análisis más discretizado de los efectos metalúrgicos y mecánicos provocados por el proceso RSW.

4.2 Ejecución del proceso RSW para unión de los aceros DP.

Se realizaron en total 54 uniones soldadas por medio el proceso de RSW, siguiendo la ruta experimental diseñada con el método FFD según el software STATISTICA®. El proceso RSW consistió en especificar y variar los parámetros de soldeo en la pantalla táctil del equipo semi-automatizado y comenzar el ciclo de soldadura presionando el pedal de activación, empleando en cada experimento una presión constante de 110 Psi. En la Figura 4.5 se muestran las macrografías de las tres probetas más representativas del estudio, siendo (a) el mejor resultado, (b) el resultado medio y (c) el peor resultado con respecto a la resistencia que presentaron en el ensayo, resultados que se muestran en la Figura 4.6. Los resultados con una marca circular gris son los tres resultados representativos.

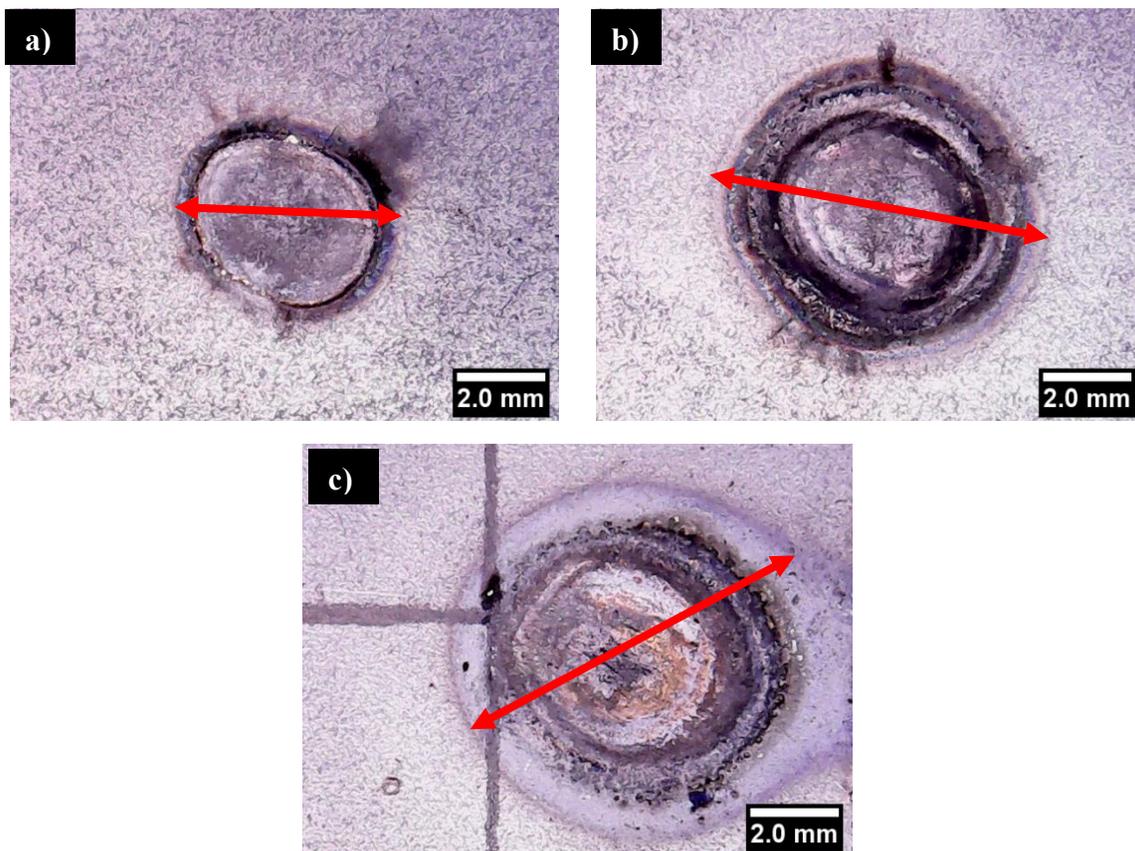


Figura 4.5. Macrografías de las probetas: a) 3, b) 15 y c) 17.

Se puede observar que las macrográficas corresponden a botones de soldadura con tres dimensiones diferentes, las flechas de color rojo en la Figura 4.5 indican el inicio y fin de los botones de soldadura incluida la ZAC. A las probetas de la Figura 4.5(b) y 4.5(c) se les aplicó la misma intensidad de corriente (4500 A) con diferente tiempo de soldeo, resultando en una ligera diferencia en el tamaño del botón; mientras que la probeta de la Figura 4.5(a) tuvo el menor diámetro, ya que se le aplicó la mínima intensidad de corriente (3500 A). Los resultados concuerdan con las observaciones realizadas por Kaščák et al. [33] en su artículo, donde mencionan que el tamaño del botón de soldadura incrementa con el aumento de la corriente de soldadura y del tiempo de soldeo.

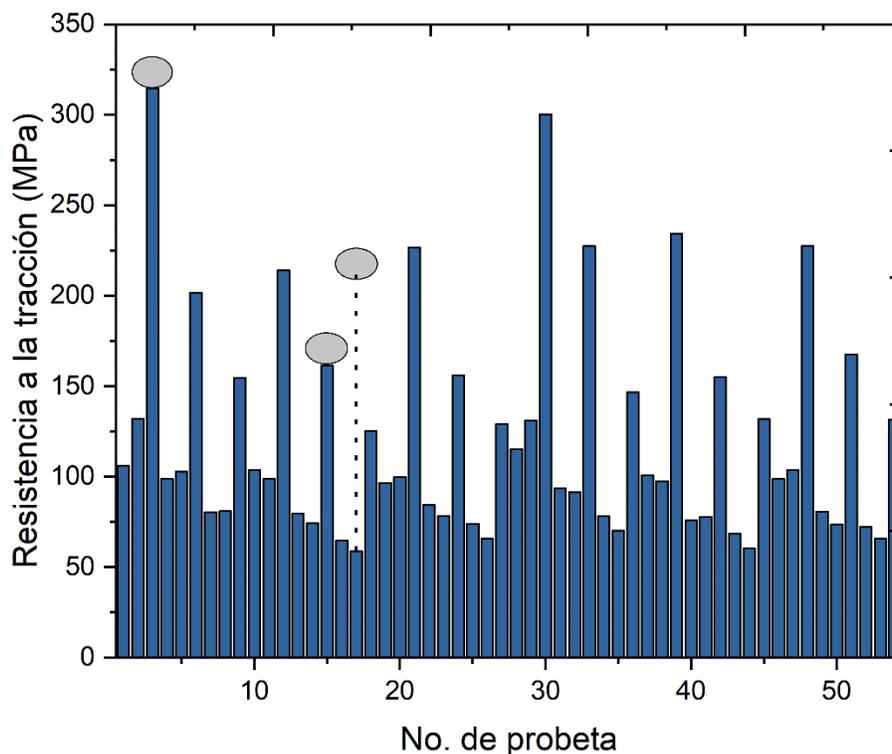


Figura 4.6 Resistencia a la tracción de las 54 uniones soldadas.

Los resultados del ensayo de tracción muestran que el mayor resultado de resistencia se presentó en la probeta 3 con valor de 314 MPa, el valor medio se presentó en la probeta 15 con 161.53 MPa y el menor de los valores en la probeta 17 con 58.71 MPa. Los autores Zhang et al. [3] y Zhang et al. [63], mencionaron en sus investigaciones que el diámetro del



botón de soldadura tiene un efecto directo en la resistencia a la tracción, siendo que los diámetros menores implican menores resultados en la resistencia mecánica. Esto es contrario a los resultados mostrados en esta investigación. Esto se le atribuye a que la ZAC que se formó en los botones de soldadura es pequeña, por lo que, posiblemente se tuvo una menor concentración de esfuerzos y a pesar de tener diámetros del botón de soldadura pequeños, estos no presentaron una falla interfacial, sino de tipo extracción. Esto se puede observar en la sección 4.5 en adelante.

4.3 Análisis de los datos por medio del Diseño Factorial Completo (FFD).

El análisis mediante la técnica FFD se llevó a cabo con el software STATISTICA®, el cual permite realizar diversos estudios estadísticos incluyendo todos los métodos relacionados con el diseño de experimentos. En este tipo de estudios, una de las principales herramientas para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre los factores evaluados: intensidad de corriente, tiempo y espesor de los aceros DP, correspondientes a este estudio, y sus interacciones, mostrando cuales factores e interacciones son los que realmente representan un cambio en la variable de respuesta, es el ANOVA. El cambio en la variable de respuesta corresponde a que, si un factor varía poco en el proceso, esa pequeña variación tendrá un efecto en la variable de respuesta (la resistencia mecánica de los botones de soldadura) [64].

En la Tabla 4.2 se muestra el resultado obtenido por medio del ANOVA, donde cabe destacar que para identificar qué factores e interacciones son estadísticamente significativos, se emplea la última columna de la tabla que corresponde a un dato conocido como valor-p, el cual surge a partir de la prueba F de Fisher [65]. Los valores que se encuentran resaltados en color rojo corresponden a interacciones que no son significativas en el proceso RSW, por lo que, es posible que se descarten del modelo matemático que se puede originar.



Tabla 4.2 Resultados del ANOVA.

Efectos	SS	df	MS	F	p
(1) Intensidad(I)	6146.919	1	6146.919	89.240	4.908E-11
Intensidad(I ²)	3000.051	1	3000.051	43.554	1.449E-11
(2) Tiempo(T)	33222.254	1	33222.254	482.319	1.154E-21
Tiempo(T ²)	749.696	1	749.696	10.884	0.002281
(3) Espesor(E)	93400.975	1	93400.975	1355.992	5.520E-29
Espesor(E ²)	43606.197	1	43606.197	633.073	1.472E-23
I por T	1256.474	1	1256.474	18.241	0.0001479
I por T ²	14.562	1	14.562	0.211	0.6485
I ² por T	208.784	1	208.784	3.031	0.0907
I ² por T ²	5.293	1	5.293	0.076	0.7832
I por E	2426.686	1	2426.686	35.230	1.044E-6
I por E ²	414.400	1	414.400	6.016	0.0194
I ² por E	854.269	1	854.269	12.402	0.001244
I ² por E ²	112.164	1	112.164	1.628	0.2105
T por E	11038.587	1	11038.587	160.257	2.018E-14
T por E ²	2801.821	1	2801.821	40.676	2.794E-7
T ² por E	375.059	1	375.059	5.445	0.0256
T ² por E ²	69.402	1	69.402	1.007	0.3225
Error	2341.925	34	68.880	89.240	
Total SS	192922.538	53			

La Figura 4.7 muestra el diagrama de Pareto, el cual permite observar de forma gráfica los resultados obtenidos por el ANOVA, es decir, cuáles parámetros e interacciones son los más significativos y cuáles carecen de relevancia para evaluar la variable de respuesta. En el diagrama de Pareto entre mayor es la columna implica que tiene mayor efecto ese factor o interacción que esté representando. Respecto a los factores principales que se están analizando, se observa que de los tres, el espesor es el de mayor efecto sobre la resistencia mecánica de los botones de soldadura, seguido tiempo del procesado y por último la corriente de soldadura, estos resultados difieren de los obtenidos por otros autores como Suresh [66] y Shah y Patel [67], donde la corriente de soldadura fue la de mayor efecto, mientras que los otros parámetros fueron variando de lugar según el autor. Todos los efectos principales e interacciones que no pase la línea de color rojo, la cual marca los valores inferiores o iguales a 0.05, son términos no significativos en la prueba.

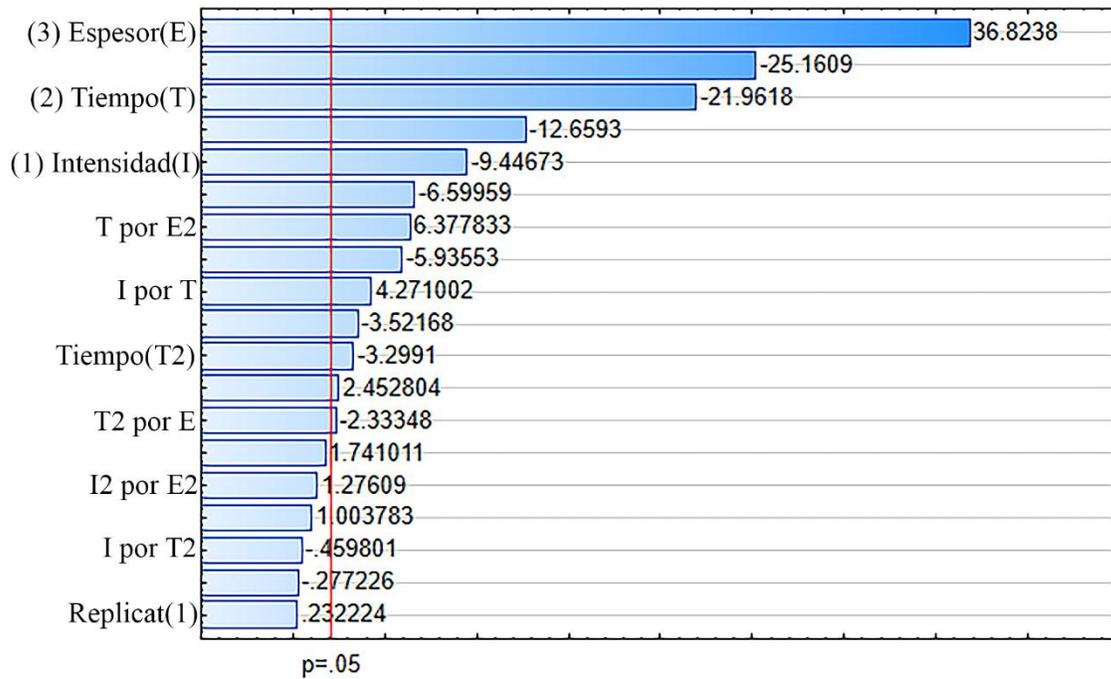


Figura 4.7 Diagrama de Pareto con los factores e interacción más significativos.

Antes de considerar como resultados adecuados a los presentados mediante el ANOVA y el diagrama de Pareto, es necesario observar los resultados arrojados por la gráfica de probabilidad normal, que utiliza a los valores de los residuales para conocer si hay una adecuada relación entre los factores, las interacciones y los resultados. Los residuales son las diferencias entre los valores de la variable de respuesta observados y los valores que se predicen a partir de los resultados de la ecuación de regresión. La Figura 4.8 presenta la gráfica de probabilidad normal, donde los residuales deben pasar los más cercano posible de la recta en color rojo y no deben mostrar evidencia de una heterogeneidad [41], sumado a que debe concentrarse la mayor parte de los datos al centro de la línea y tener pocos datos en los extremos.

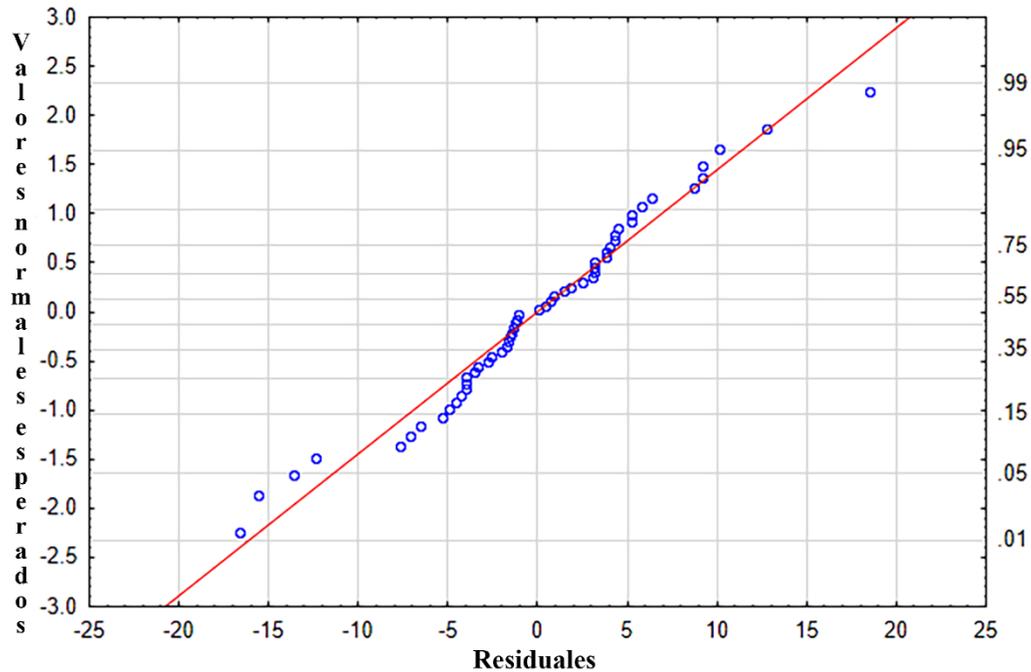


Figura 4.8 Diagrama de probabilidad normal.

La Figura 4.9 muestra el gráfico de superficie de las variables más significativas (espesor y tiempo) según el diagrama de Pareto, mostrando que el efecto que provocará en el esfuerzo ingenieril. El gráfico muestra como a mayor espesor y a menor tiempo dado al proceso RSW se incrementa la resistencia mecánica que presentan los botones de soldadura. Para obtener esta respuesta fue necesario introducir como constante a la variable intensidad con el valor mínimo de la prueba, el cual fue de 3500 A, debido a que fue el valor de corriente de soldadura donde se obtuvo la mejor respuesta en la resistencia mecánica.

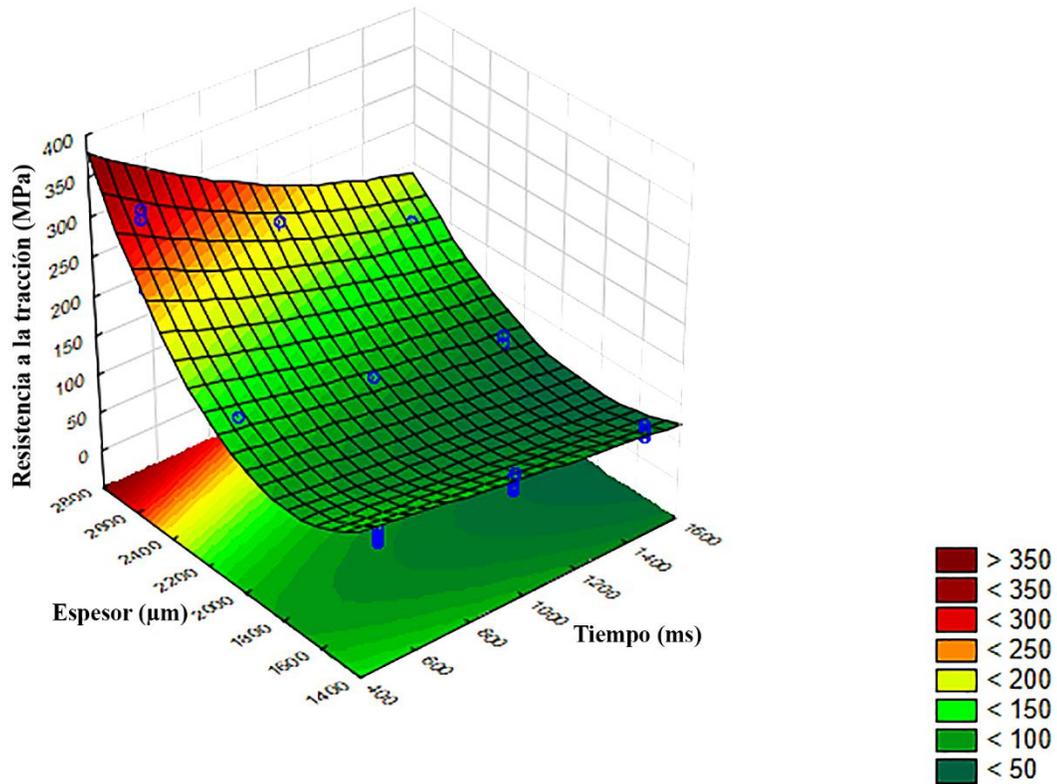


Figura 4.9 Gráfico de superficie de la resistencia de tracción respecto al tiempo y espesor.

Con el fin de corroborar la información observada en la Figura 4.9, se obtuvo un segundo gráfico de superficie donde se muestra que efecto tiene la intensidad de la corriente contra el espesor respecto a la resistencia a la tracción, el cual se muestra en Figura 4.10. Se observó que a mayor espesor y a menor intensidad de soldeo se predice la mayor resistencia a la tracción, indicando valores cercanos a los 350 MPa. Para este gráfico se bloqueó el tiempo del proceso, analizando con el mínimo tiempo establecido de 500 ms.

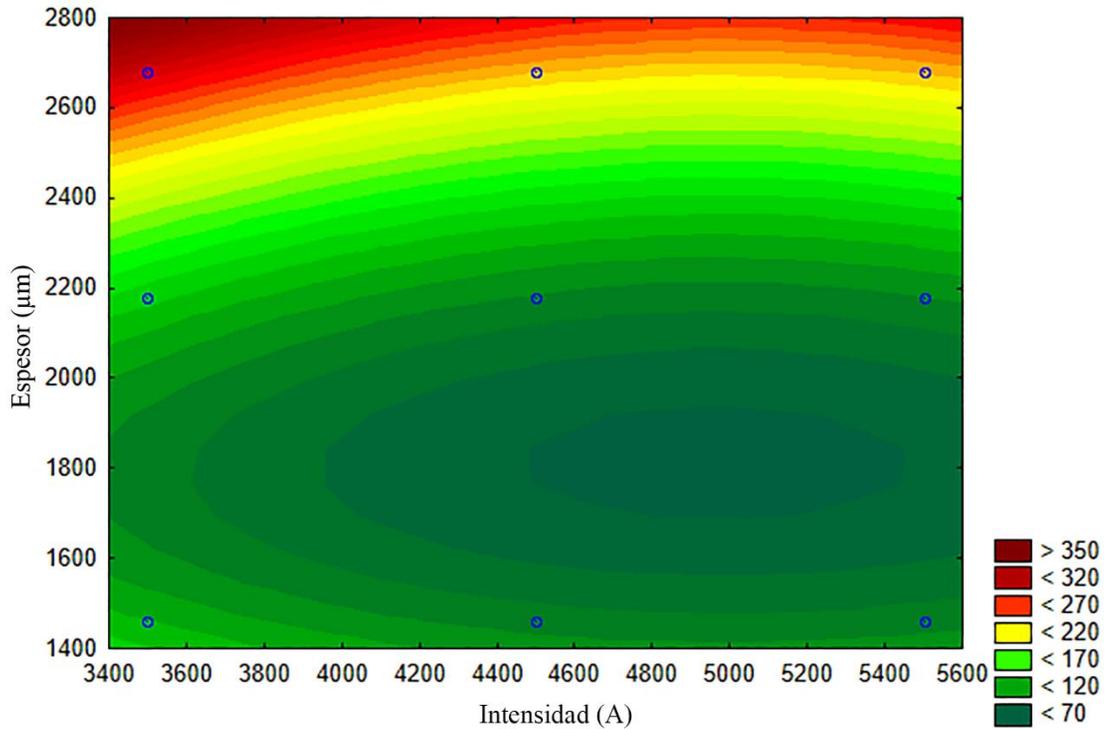


Figura 4.10 Gráfico de superficie de la resistencia a la tracción respecto a la intensidad de corriente y el espesor de los aceros DP JAC270.

Con los resultados observados en las Figura 4.9 y 4.10 es posible inferir respecto a cuál nivel de cada factor es el óptimo para obtener el mayor esfuerzo ingenieril en las pruebas de tensión. En la Tabla 4.3 se muestran los tres factores con sus respectivos niveles adecuados para el proceso RSW estudiado en la investigación presente.

Tabla 4.3 Mejor nivel de cada factor empleado en el proceso RSW.

Niveles	Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)
1	3500	500	*
2	*	*	*
3	*	*	2.68

En la Tabla 4.4 se muestra el pronóstico obtenido por medio del software estadístico, el cual consiste en presentar en la primera columna cuales son los valores correspondientes a sus coeficientes de regresión y en la segunda columna se muestran los valores obtenidos al desarrollar la ecuación para conocer el valor de predicción, siendo de 296.22 MPa con un valor de R^2 de 0.9878. El valor de R^2 se conoce como coeficiente de determinación, es un estadístico que permite medir la calidad de cualquier modelo de regresión [39].



Tabla 4.4 Predicción del valor resistencia a la tracción.

Efectos	Coefficientes de regresión	Solución
Constante	2578.954	
(1) Intensidad(I)	-6.041943E-01	-2114.68002
Intensidad(I ²)	5.935333E-05	727.078274
(2) Tiempo(T)	-6.700037E-01	-335.001832
Tiempo(T ²)	3.393845E-05	8.48461364
(3) Espesor(E)	-2.572151E+00	-6893.36593
Espesor(E ²)	7.655344E-04	5498.37438
I por T	-5.811977E-06	-10.1709591
I por T ²	5.611912E-08	49.104226
I ² por T	1.054397E-09	6.4581823
I ² por T ²	-5.635819E-12	-17.2596949
I por E	5.891465E-04	5526.19406
I por E ²	-1.831145E-07	-4603.20564
I ² por E	-5.804615E-08	-1905.65518
I ² por E ²	1.811268E-11	1593.63361
T por E	7.445239E-04	997.661975
T por E ²	-2.185114E-07	-784.7181
T ² por E	-1.910412E-07	-127.997579
T ² por E ²	5.699035E-11	102.331868
Pronóstico		296.22 MPa

4.4 Análisis con el Método de Taguchi.

En la Tabla 4.5 se muestra el arreglo ortogonal L₉, el cual fue utilizado para encontrar la mejor condición con el método de Taguchi. El objetivo de utilizar el método de Taguchi fue el de ratificar los valores óptimos de nivel propuestos con el FFD, ya que es un método empleando comúnmente para trabajar *in situ* durante el proceso analizado. Aprovechando el arreglo L₂₇ desarrollado en el Capítulo 3, se obtuvieron los valores necesarios para desarrollar el análisis estadístico.



Tabla 4.5 Resultados de la variación de los parámetros con el método de Taguchi.

Experimento	Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)
1	3500	500	1.46	106.06
2	3500	1000	2.18	102.94
3	3500	1500	2.68	154.64
4	4500	500	2.18	99.02
5	4500	1000	2.68	154.91
6	4500	1500	1.46	64.78
7	5500	500	2.68	226.68
8	5500	1000	1.46	84.26
9	5500	1500	2.18	65.81

En la Figura 4.11 se muestran los niveles de cada factor que son considerados óptimos para obtener la mayor resistencia mecánica según el método de Taguchi. Puede observarse que el factor más significativo en el proceso RSW analizado en esta investigación es el espesor, esto se determina por la longitud de la línea que une los niveles correspondientes a la respectiva variable. Entre más alto se encuentran los niveles, significa que son los óptimos según la relación de S/N seleccionada. Corroborando con esto que los valores de la Tabla 4.3 son efectivamente los niveles óptimos para obtener el mejor resultado en el proceso RSW.

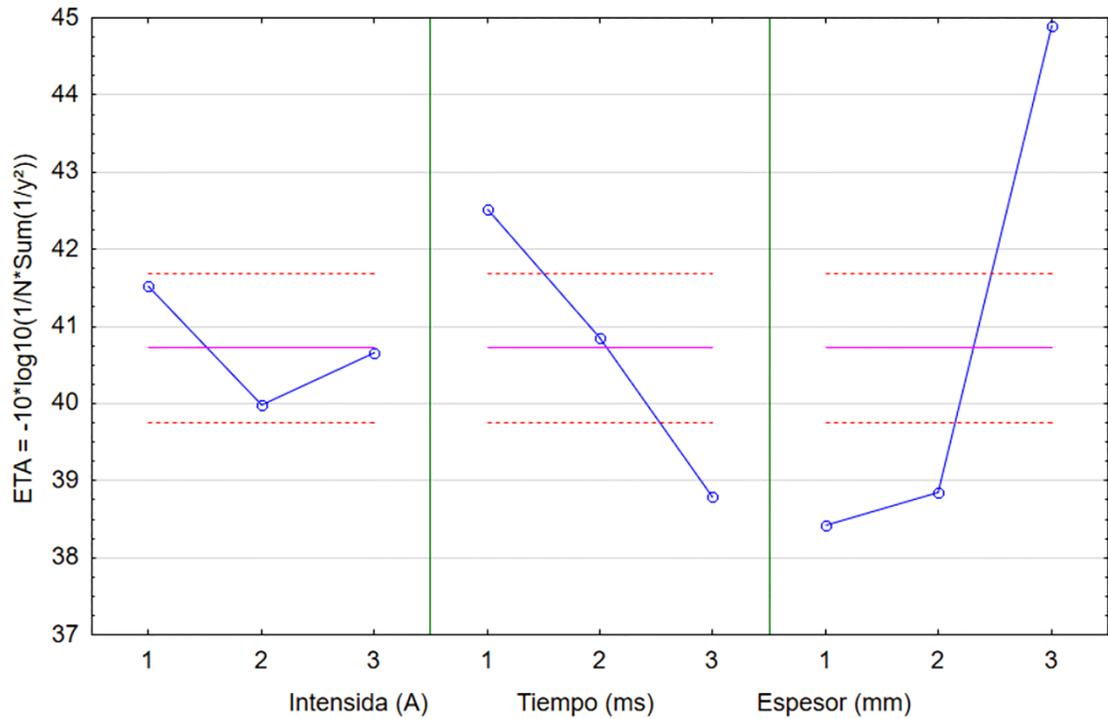


Figura 4.11 Relación S/N de los parámetros óptimos para el proceso RSW.

4.5 Análisis microestructural en los botones de soldadura.

Para el análisis microestructural, se tomaron los 3 botones de soldadura representativos de la experimentación, eligiendo uno de los botones con base en los resultados obtenidos con el FFD (representando al mejor botón de soldadura), el segundo botón se eligió con el criterio de cuál experimento tuvo una resistencia media y el tercer botón se tomó considerando aquel que presentó la mejor resistencia a la tracción.

En la Figura 4.12 se muestran cuatro imágenes del mejor botón de soldadura (probeta 3), desde una perspectiva a macroescala hasta micrografías en zonas de interés. La Figura 4.12(a) muestra una macrografía de todo el botón de soldadura, esta imagen permitió observar que no se tienen poros en el botón de soldadura y que el centro del botón de soldadura se encuentra lo más cercano posible al centro del espesor total entre ambos aceros DP, mismo fenómeno observado por Pouranvari y Marashi [68]. Para un mejor análisis se tomó una micrografía lo más cercano posible al centro de la ZF, la cual se puede observar en la Figura 4.2(b), donde la ZF presenta granos columnares orientados hacia la superficie de

los aceros DP, es decir, hacia donde se origina la extracción de calor producto de la refrigeración de los electrodos de cobre. Esto provoca un enfriamiento rápido que da como resultado la formación de estructuras crecidas, martensita y estructuras ferríticas aciculares [69].

Partiendo del hecho de que se tienen dos aceros DP que sólo se diferencian por su espesor y el grado de conformabilidad se tomó una micrografía al metal base superior (Figura 4.12(c)). Es complicado diferenciar entre las zonas de importancia que tiene un botón de soldadura, esto puede indicar que el metal base superior sufrió mayor afectación térmica por parte del proceso RSW, por otro lado, puede significar que requiere de un ataque químico más selectivo para distinguir las zonas de interés.

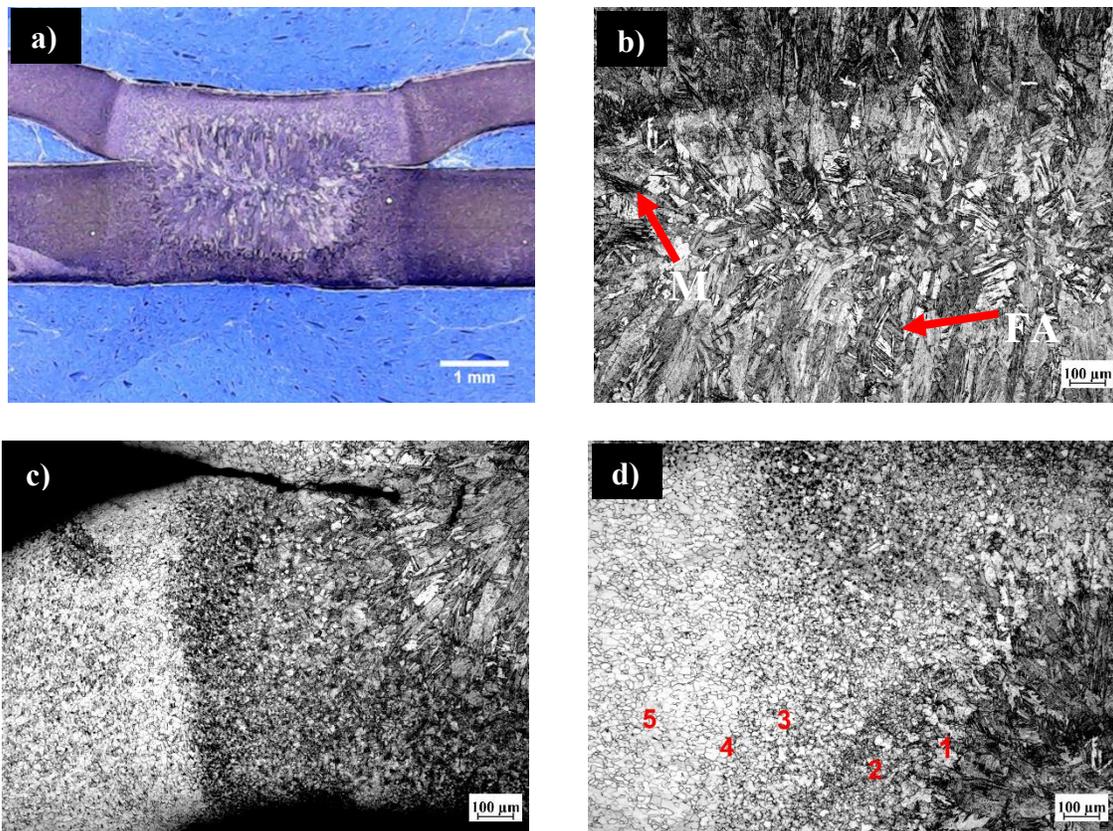


Figura 4.12 Imágenes del mejor botón de soldadura probeta 3: a) Botón de soldadura, b) Zona de fusión, c) Micrografía del metal base superior y d) Micrografía del metal base inferior.



En la Figura 4.12(d) perteneciente al metal base inferior (DP-270C) se observan las siguientes zonas: 1) Zona de grano grueso (GG-ZAC), 2) Zona de grano fino (GF-ZAC), 3) Zona intercrítica (ZI-ZAC), 4) Zona subcrítica (ZS-ZAC) y 5) MB. La zona GG-ZAC (Figura 4.12(d-1)) se encuentra rodeando a la ZF, la cual presenta granos crecidos debido a que la temperatura fue lo suficientemente alta para lograr la austenización total y permitir el crecimiento del grano, lo que produce que durante el enfriamiento la austenita se transforme en diversas fases, como la ferrita acicular [70]. La GF-ZAC de la Figura 4.12(d-2), se forma debió a que la temperatura está justo por encima de la línea A_{c3} , donde el límite de los granos constituye un obstáculo para la formación de martensita [11]. La Figura 4.12(d-3) presenta la zona intercrítica (ZI-ZAC), es llamada de esa manera porque se encuentra entre las líneas de transformación A_{c1} y A_{c3} [70], la cual presenta ambas fases tanto ferrítica como martensítica en escasa proporción. En la Figura 4.12(d-4) se muestra la zona subcrítica (ZS-ZAC), en esta zona la temperatura alcanzada es levemente inferior a A_{c1} y se caracteriza por presentar una dureza menor a la del metal base, además de tener una estructura ferrítica, con algunos indicios de martensita y un tamaño de grano casi similar al del MB. Y por último se tiene en la Figura 4.12(d-5) el metal base sin sufrir algún cambio en su microestructura.

La Figura 4.13 muestra diferentes imágenes del botón de soldadura que obtuvo como resultado un valor medio de resistencia mecánica. En la Figura 4.13(a) se observa el botón de soldadura con las tres zonas características de una unión soldada por RSW (ZF, ZAC y MB), donde es notorio que el tamaño de la ZF y de la ZAC es mayor que el de la probeta 3 (Figura 4.12(a)). Esto es debido a que el primer botón mostrado fue realizado con un valor de corriente de soldeo de 3500 A, con un tiempo de 500 ms y con el máximo espesor entre las uniones de los aceros DP; mientras que, el botón de la Figura 4.13(a) fue realizado con 4500 A, 1000 ms y el máximo espesor de los aceros DP. Por otro parte, se observa que el botón de la Figura 4.13(a) muestra dos imperfecciones denominadas “huecos”. Estos huecos pueden atribuirse al incremento en la intensidad de corriente aplicada durante el proceso y al hecho de que en esta unión soldada hubo expulsión de material durante la prueba [71]. En la Figura 4.13(b) se muestra el centro de la ZF, la cual presenta granos columnares orientados hacia la extracción de calor y de mayor tamaño a los observados en la Figura 4.12(b) debido al cambio en la intensidad de corriente. En la micrografía puede observarse la formación de



ferrita Widmanstätten, señalada como FW con una flecha.

En las Figuras 4.13(c) y 4.13(d), pertenecientes al metal base inferior (DP-270C), se observan las siguientes zonas: en la Figura 4.13(c) se observó la 1) Zona GG-ZAC y la 2) Zona GF-ZAC; mientras que, en la Figura 4.13(d) se observó la 3) Zona ZI-ZAC y la 4) Zona ZS-ZAC. La zona GG-ZAC (Figura 4.13(c-1)) se encuentra rodeando a la ZF, la cual presenta granos más crecidos que los observados en la Figura 4.12(d), el crecimiento del grano se debe a que la temperatura llega a pasar la línea A_{c3} , mostrando una estructura fundamentalmente ferrítica. La zona GF-ZAC en la Figura 4.13(c-2) es pequeña, sólo se puede observar una ligera área y termina de manera abrupta, su formación se debe a que la temperatura está justo por encima de la línea A_{c3} en esa área con un grano más fino que el del MB, comenzando a formar escasa martensita. La Figura 4.13(d-3) presenta la zona ZI-ZAC) es llamada de esa manera porque se encuentra entre las líneas de transformación A_{c1} y A_{c3} , muestra ambas fases tanto ferrítica como martensítica, aunque sigue observándose escasa martensita en la zona. Por último, en la Figura 4.13d (4) se muestra la ZS-ZAC delimitada por una línea negra en la micrografía. En esta zona la temperatura alcanzada es inferior a A_{c1} , por lo que, la martensita de los aceros DP sufre una descomposición por efecto de la temperatura y se reviene, dejando una dureza menor a la del MB [70].

La Figura 4.14 muestra el botón de soldadura que menor resistencia a la tracción presentó durante la prueba realizada. En la Figura 4.14(a) se presenta la macroinspección del botón de soldadura. Cabe mencionar la diferencia entre el tamaño de la ZF del primer botón mostrado (Figura 4.12(a)) y la diferencia con el segundo botón de la Figura 4.13(a), ya que es mayor que los dos anteriores descritos. Esto se atribuye a que este botón fue realizado con los parámetros: 4500 A, 1500 ms y un espesor de los aceros DP unidos de 2.18 mm; por lo que, el incremento en el tiempo de la unión incrementa el aporte térmico dirigido a la ZF. Es notorio que el botón de soldadura muestra una franja de color más oscuro en la parte superior, pudiendo tratarse de la sección donde se encuentra la unión de ambos aceros. Este efecto se debe a que la lámina de acero DP con mayor espesor, también es la que presenta una mayor resistencia eléctrica, por lo que, la formación del botón de soldadura se dirigirá más al lado del acero DP de mayor espesor [68].

La Figura 4.14(c) muestra una micrografía de la franja descrita en la Figura 4.14(a) delimitada entre dos líneas de color negro, donde puede observarse que es una zona con granos muy crecidos compuestos fundamentalmente de ferrita. En la Figura 4.14(b) se muestra el centro de la ZF, la cual presenta granos columnares, algunos más grandes que los presentados anteriormente en los dos botones de soldadura anteriores, donde se puede observar la presencia de martensita (M), ferrita (F) y ferrita Widmanstatten (FW). La Figura 4.14(d), muestra zonas similares a las de la Figura 4.13(c y d), las cuales son: 1) Zona GG-ZAC, 2) Zona GF-ZAC, 3) Zona ZS-ZAC y la 4) Zona de MB. La zona GG-ZAC se encuentra rodeando a la ZF, la cual presenta granos muy crecidos. La zona GF-ZAC es un área bien definida con un grano más fino que el del MB, comenzando a formar escasa martensita. La ZS-ZAC muestra escasa martensita en la zona. Por último, se observa el inicio de toda la zona de MB.

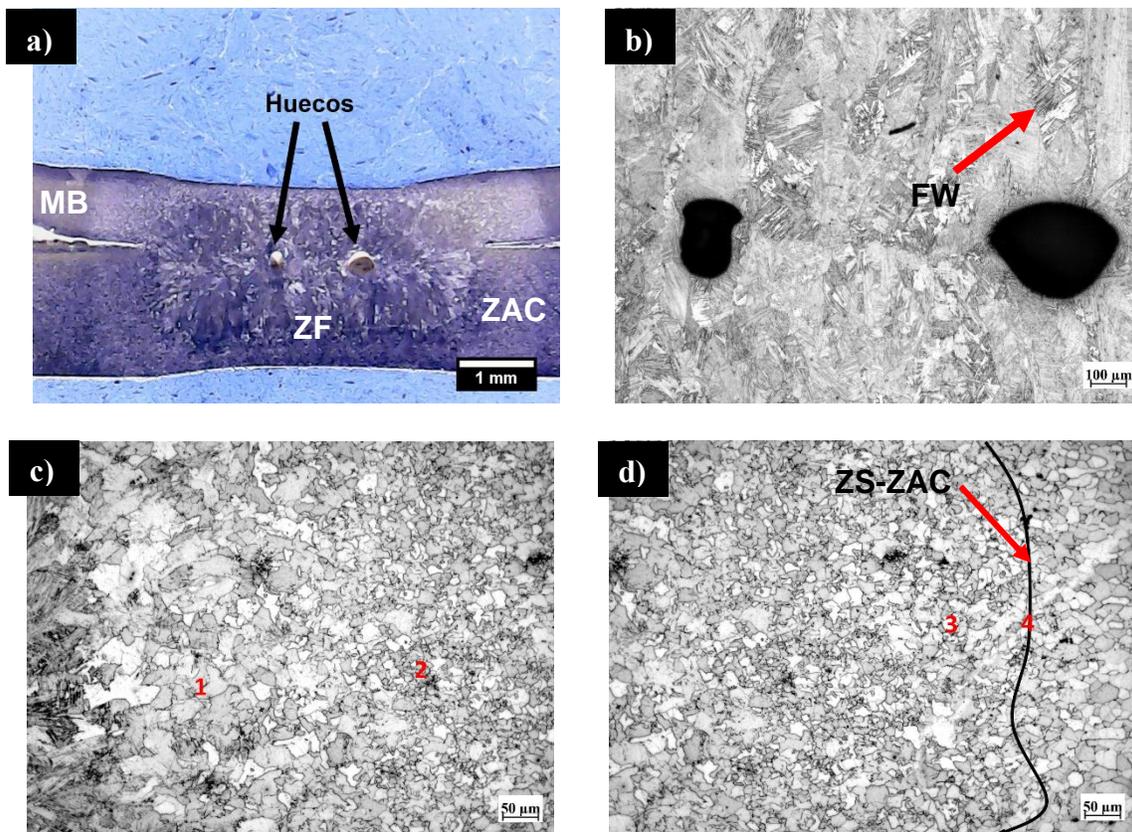


Figura 4.13 Imágenes del botón de soldadura con desempeño medio: a) Botón de soldadura, b) ZF, c) Micrografía con GG-ZAC y GF-ZAC y d) Micrografía con ZI-ZAC y ZS-ZAC.

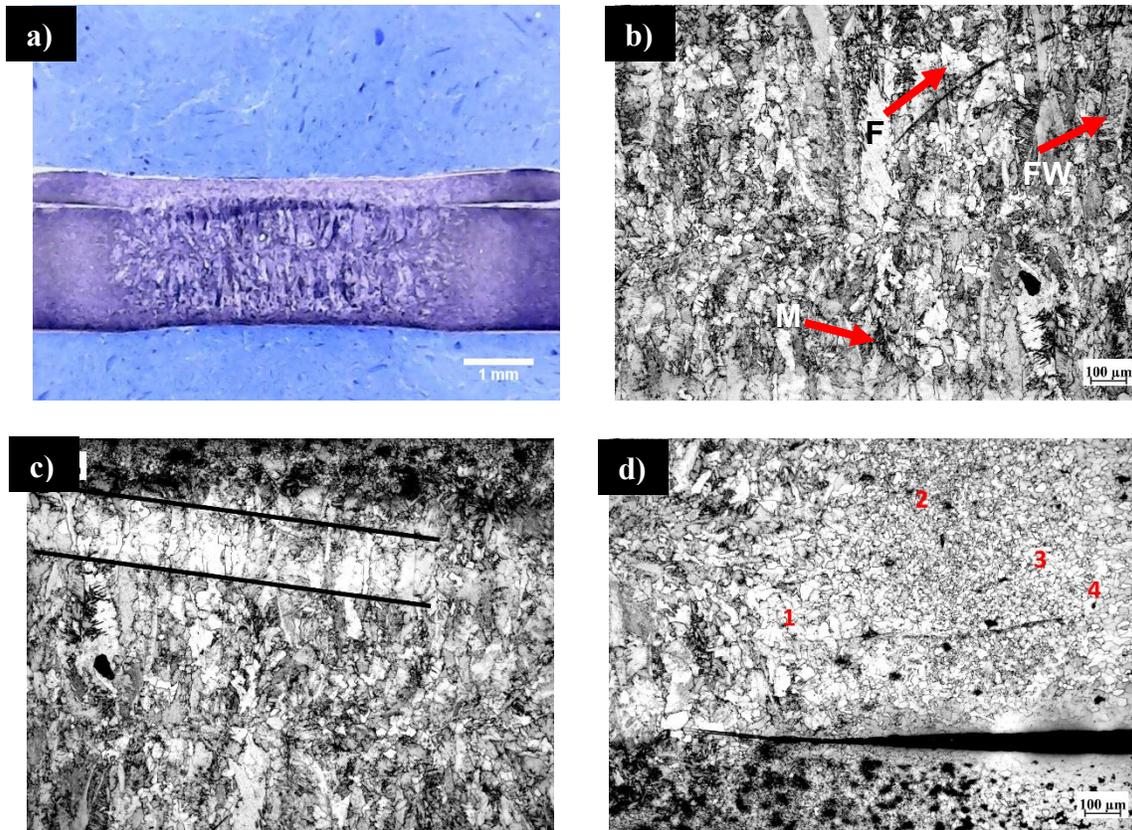


Figura 4.14 Imágenes del peor botón de soldadura: a) Botón de soldadura, b) ZF, c) Micrografía del metal base superior y d) Micrografía del metal base inferior.

4.6 Perfil de dureza Vickers en el botón de soldadura.

Se realizó un barrido de dureza Vickers como el que se mostró en la Figura 3.7 con la intención de registrar valores en los aceros DP de diferente espesor y valores lo más cercano posible a la zona central del botón de soldadura, dejando un espacio entre cada huella del ensayo de mínimo el doble de su tamaño.

La Figura 4.15 muestra un gráfico comparativo entre los tres perfiles de microdureza de las probetas 3, 15 y 17, mostrando el aspecto típico de microdureza para los botones de soldadura RSW y el incremento de la dureza después de aplicar el proceso RSW [72,73]. Las tres probetas analizadas presentaron la dureza máxima en la ZF; sin embargo la dureza de la ZAC se encuentra entre la ZF y el MB.

La probeta 3, la cual se realizó con los parámetros óptimos de soldadura, es la que tiene la mayor dureza en la zona de fusión, seguida de la probeta 15 y la de menor dureza se presentó en la probeta 17, concordando claramente con el desempeño en el ensayo de tracción, donde normalmente hay una relación entre la resistencia a la tracción y la dureza del material [74]. Los valores más altos de dureza en la ZF son probablemente a la formación de martensita y sobre todo a al alto contenido de elementos de aleación concentrados en el botón de soldadura [11, 71].

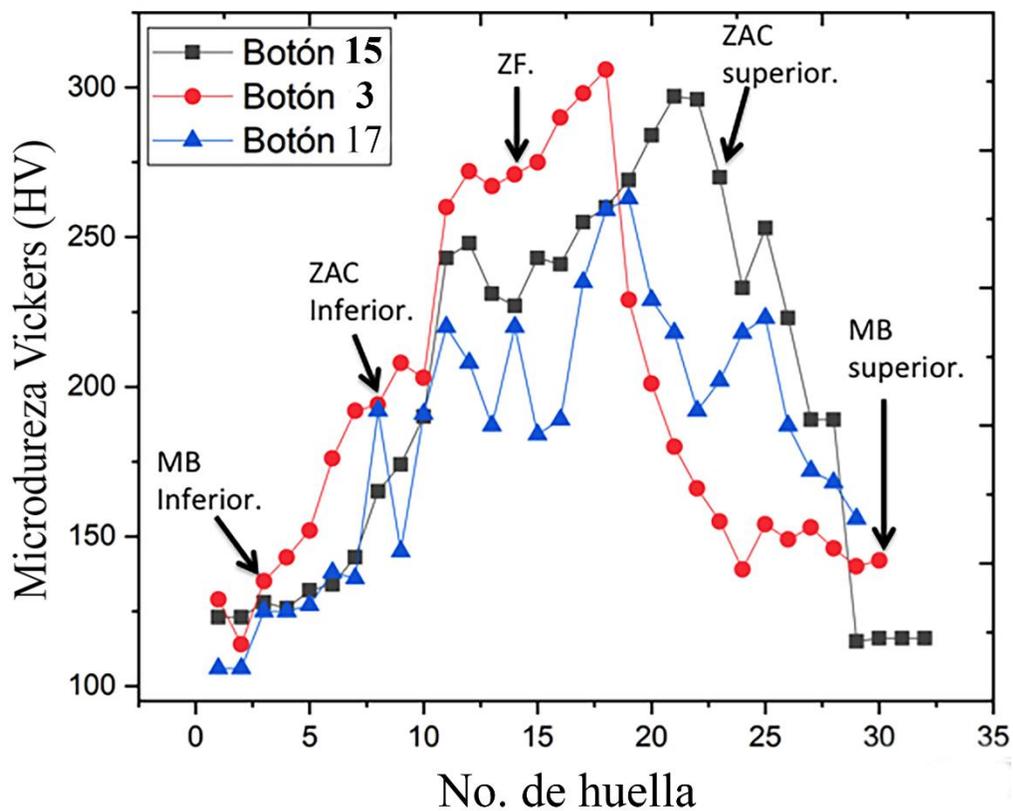


Figura 4.15 Perfil de microdureza de los botones de soldadura.

El perfil de microdureza de la probeta 3 (mejor desempeño) se muestra en la Figura 4.16, la gráfica se divide en las zonas de interés del botón de soldadura mediante líneas horizontales de color rojo y las leyendas (MB, ZAC y ZF).

Los valores de microdureza más altos se registraron en la ZF, siendo aproximadamente del doble que los registrados en el metal base como se observa en la gráfica. Cabe mencionar que se observa el incremento máximo de microdureza en la ZF perteneciente al acero DP de la zona superior (el acero de menor grosor), demostrando una mayor segregación de aleantes en la zona superior de los botones de soldadura e incremento de la dureza debido a la velocidad de enfriamiento ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}\text{s}^{-1}$) asociado al proceso RSW [75]. No obstante, la segregación de los elementos aleantes a la ZF y el calor aplicado en la ZAC provocan ablandamiento por tener zonas revenidas.

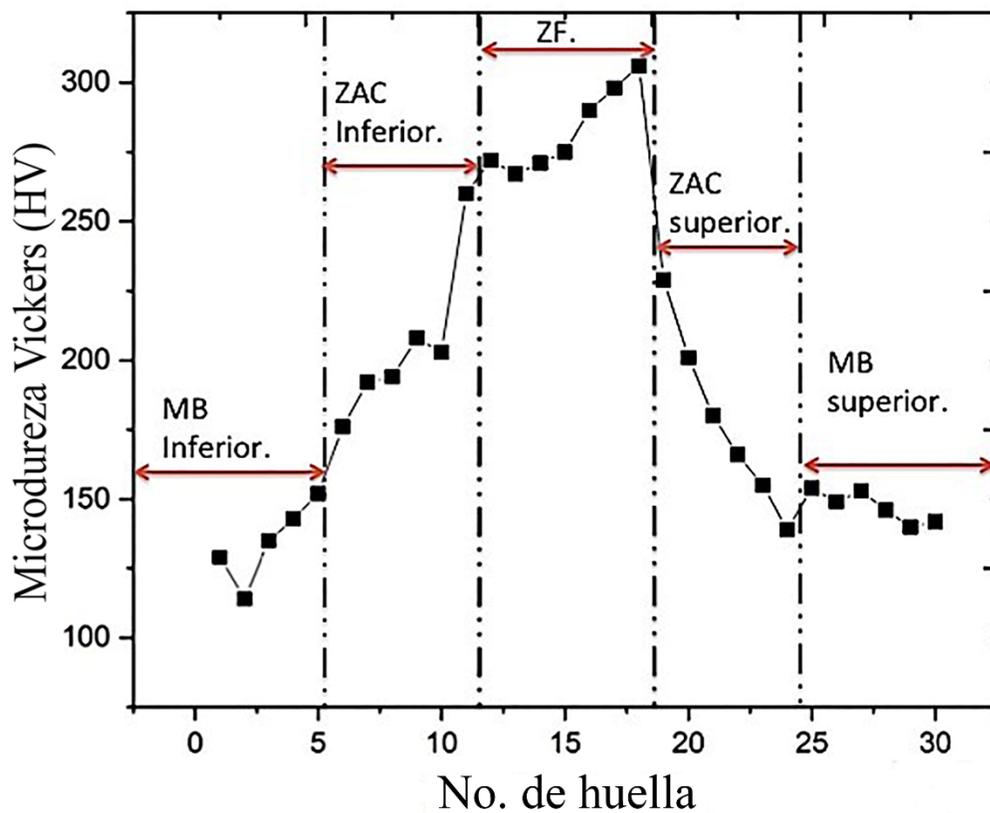


Figura 4.16 Perfil de microdureza de la probeta 3.



4.7 RNA aplicada a la predicción de la resistencia a la tracción de los botones de soldadura.

Para aplicar una RNA en MATLAB® se recomienda normalizar los datos debido a la diversidad de magnitudes y unidades con que se pueden representar las variables de estudio. A continuación, en la Tabla 4.6 se muestra de manera ilustrativa el resultado de la normalización de las variables aplicando la ecuación (3.3).

Tabla 4.6 Ejemplo de la normalización de las variables del proceso RWS.

Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)	σ_R (MPa)	Intensidad	Tiempo	Espesor	σ_R
3500	500	1.46	106.056	0	0	0	0.185
3500	500	2.18	131.907	0	0	0.59	0.286
3500	500	2.68	314.434	0	0	1	1
3500	1000	1.46	98.735	0	0.5	0	0.156
3500	1000	2.18	102.941	0	0.5	0.59	0.172
3500	1000	2.68	201.755	0	0.5	1	0.559
3500	1500	1.46	80.354	0	1	0	0.084
3500	1500	2.18	80.907	0	1	0.59	0.086
3500	1500	2.68	154.636	0	1	1	0.375
4500	500	1.46	103.723	0.5	0	0	0.17
4500	500	2.18	99.015	0.5	0	0.59	0.157

Una vez que los datos se han normalizado, se procede a importar las variables con algún nombre clave a MATLAB® con el fin de utilizar la información en el entrenamiento de la red neuronal. En la Figura 4.17 se muestra la interfase de entrenamiento de la red. Se utilizó el algoritmo de entrenamiento llamado Levenberg-Marquardt, ya que es uno de los más comunes y mostró un buen resultado a la hora de entrenar las redes [19]. Como capas ocultas se utilizaron dos capas con 7 neuronas cada una. En la sección superior de la Figura 4.17 se observa un ejemplo gráfico de la red neuronal, el cual muestra el flujo de la información de entrada hacia las capas ocultas que modifican sus pesos entre las

interconexiones permitiendo que la red aprenda de la información a priori para poder predecir resultados a posteriori.

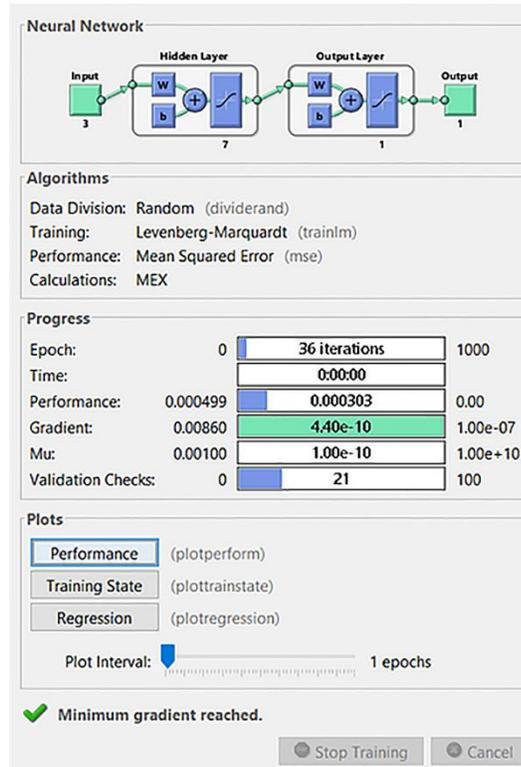


Figura 4.17 Interfaz de entrenamiento, permite al usuario conocer el desempeño de la RNA creada.

En la Figura 4.18 se muestra la respuesta del entrenamiento con los datos de entrada mediante el valor R . Este valor permite conocer que tan buena fue la red para ajustarse a los datos, siendo que, entre más cercano al valor se encuentre a 1 el coeficiente R , será más apta la red creada para la predicción de resultados. En la Tabla 4.7 se muestran diferentes objetivos buscados en una simulación con la RNA entrenada, demostrando un buen acercamiento al resultado propuesto por el diseño factorial, teniendo un valor de 296 MPa en el diseño factorial y de 307.4 con la RNA, mismos resultados han sido reportados por Arunchai et al. [76] al aplicar RNA's y el diseño de experimentos factorial para predecir la calidad de la soldadura RSW.

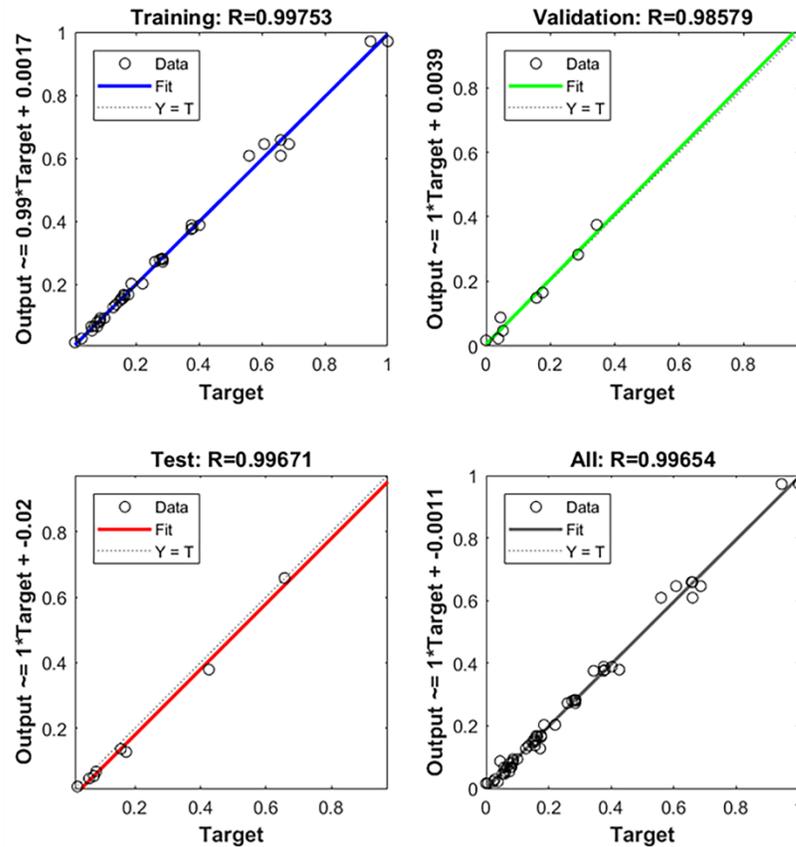


Figura 4.18 Nivel de ajuste de las predicciones creadas por la RNA contra el objetivo o salida deseada.

Tabla 4.7 Predicción de la RNA contra valor real.

Intensidad	Tiempo	Espesor	σ_R	$\sigma_R(\text{MPa})$	σ_R (predicción)	$\sigma_R(\text{MPa})$ (predicción)
0	0	0	0.185	106.056	0.202	110.615
0	0	0.59	0.286	131.907	0.282	131.065
0	0	1	0.964	305.31	0.972	307.409
0	0.5	0	0.156	98.735	0.136	93.681
0	0.5	0.59	0.172	102.941	0.127	91.313

4.8 Validación de los parámetros óptimos del proceso RSW.

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos con los análisis estadísticos y con el uso de la RNA, se llevó a cabo una unión soldada de verificación para conocer el valor en que se puede obtener en el ensayo de tracción y constatar que es una buena unión soldada si no tiene falla en el botón de soldadura.

De acuerdo con los autores Zhang et al. [63], los dos modos de falla más frecuentes en una soldadura RSW son: el modo interfacial y el modo de extracción. Siendo el tamaño del botón de soldadura un factor que afecta de manera directa el tipo de falla, ya que controla también la resistencia a la tracción que tiene las uniones soldadas. En las uniones realizadas con el proceso RSW es común que ocurra falla interfacial a través del botón de soldadura; sin embargo, se ha demostrado que este tipo de falla indeseada se presenta en mayor medida en las uniones símiles que en las uniones disímiles de láminas de acero DP [51]. En la Figura 4.19 se muestran el modo de falla del botón óptimo encontrado durante el proceso RSW y del botón de verificación.

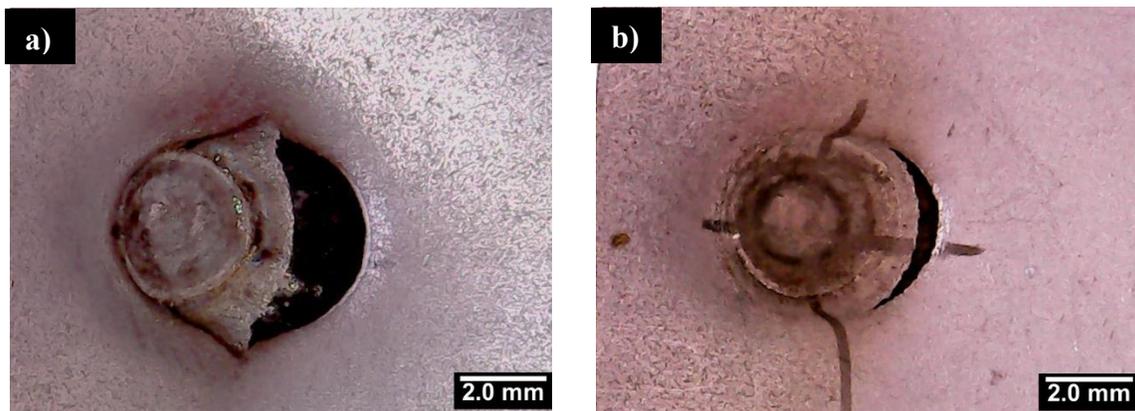


Figura 4.19 Macrográficas de: a) probeta 3 y b) probeta de verificación.

Se observa que la falla fue por extracción debido a que los botones de soldadura fallaron en la ZAC, provocado por un ablandamiento al segregarse gran parte de los aleantes a la ZF [8]. Los botones que fallan por extracción resisten mayores cargas y tienden a absorber mayor energía por impacto [68]. El resultado en el ensayo de tracción fue de 290.29 MPa.



Los resultados obtenidos en la verificación demuestran que la predicción realizada por medio de la RNA, aún requiere de más investigación y, por otra parte, la predicción desarrollada con el modelo matemático (ecuación 4.1) obtenido con el diseño factorial FFD fue más certera, estableciendo los parámetros óptimos necesarios para obtener un botón de soldadura con buena calidad en los aceros DP JAC270 de espesores disímiles.

$$E.I = 2578.954 - 6.041 \cdot 10^{-1}I + 5.935 \cdot 10^{-5}I^2 - 6.7 \cdot 10^{-1}t + 3.393 \cdot 10^{-5}t^2 - 2.572E + 7.655 \cdot 10^{-4}E^2 - 5.811 \cdot 10^{-6}It + 5.611 \cdot 10^{-8}It^2 + 1.054 \cdot 10^{-9}I^2t - 5.635 \cdot 10^{-12}I^2t^2 + 5.891 \cdot 10^{-4}IE - 1.831 \cdot 10^{-7}IE^2 - 5.804 \cdot 10^{-8}I^2E + 1.811 \cdot 10^{-11}I^2E^2 + 7.445 \cdot 10^{-4}tE - 2.185 \cdot 10^{-7}tE^2 - 1.910 \cdot 10^{-7}t^2E + 5.699 \cdot 10^{-11}t^2E^2 \quad (4.1)$$

Donde $E.I$ es la resistencia a la tracción en MPa, I es la corriente de soldeo, t es el tiempo de soldeo y E es el espesor total de las láminas. En la Tabla 4.8 se muestran los resultados experimentales obtenidos mediante el ensayo de resistencia a la tracción al emplear determinados parámetros de soldadura y los resultados al utilizar la ecuación (4.1) para predecir los valores de la resistencia a la tracción, observando que las predicciones son cercanas a los valores reales.

Tabla 4.8 Predicciones empleando la ecuación (4.1) vs valor real.

Intensidad (A)	Tiempo (ms)	Espesor (mm)	σ_R (MPa)	σ_R (MPa) (predicción)
3500	500	1.46	106.06	119.89
3500	1000	2.18	102.94	98.76
4500	500	2.18	99.02	98.52
4500	1000	2.68	154.91	158.67
5500	500	2.68	226.68	231.50
5500	1000	1.46	84.26	81.98



Existen parámetros clave para los aceros DP que les otorgan sus propiedades mecánicas, las cuales los distinguen de entre otros aceros multifásicos siendo los siguientes: composición química, tamaño de grano y contenido de martensita. Cabe destacar que la resistencia a la tracción y la dureza de los aceros se ven altamente afectados por el tamaño de grano [57]. En el caso de los aceros JAC270C-1.7, JAC270-0.98 y JAC270-0.48 utilizados en el presente trabajo presentaron un tamaño de grano refinado (entre 6 y 7 ASTM) con una fracción de volumen de martensita de aproximadamente 3%, por lo que, es natural que los valores de microdureza obtenidos de 126.23 HV, 128.8 HV y 131.93 HV, respectivamente, no sean muy diferentes entre ellos. Sin embargo, la composición química de los aceros DP muestra diferencias entre los aceros DP, donde se puede observar un contenido de carbono mayor para el acero JAC270-0.98 con 0.08 wt% en comparación con los otros aceros, por tal motivo sería congruente que este acero tuviera el mayor valor de microdureza.

Por otra parte, los parámetros de soldadura del proceso RSW que tuvieron un efecto significativo fueron: el espesor de los aceros DP y el tiempo de soldeo. La corriente de soldadura entre mayor cantidad se aplica se obtiene un mayor tamaño de botón de soldadura, formándose una ZAC de mayor tamaño de acuerdo al aumento en la corriente de soldadura, como se indica en el trabajo presentado por Kaščák et al. [77]. Sin embargo, el tiempo de soldeo tuvo un efecto similar al mencionado en esta investigación, ya que entre los botones de soldadura 15 y 17 la diferencia radica en el tiempo de soldeo (teniendo el mismo parámetro de corriente de soldadura). El espesor de los aceros DP influyó en la formación adecuada de los botones de soldadura; el botón siempre buscará formarse en la zona más cercana al centro del espesor total entre ambos aceros DP [68]. Con base en lo anterior, el mejor botón de soldadura se estableció según la forma geométrica más adecuada y cercana al centro entre ambos aceros DP con la mayor resistencia a la tracción y con los valores de microdureza mayores en la ZF.



Conclusiones

1. Los efectos remanentes del estado de conformación de los aceros DP durante su procesamiento en caliente, en tibio o en frío, fueron factores determinantes para provocar las diferencias existentes principalmente en la dureza, la distribución de la fase martensítica y composición química entre los aceros DP pertenecientes a una misma serie.
2. El porcentaje de C es determinante para la resistencia a la tracción y el grado de formabilidad, ligados al porcentaje de martensita presente; sin embargo, no se muestra una tendencia en el comportamiento de los aceros DP de menor resistencia.
3. La aplicación y validación del diseño de experimentos en soldadura empleando tanto FFD y el método de Taguchi, permitió discretizar mejor la corriente de soldadura, tiempo de soldeo, espesor de los aceros, resistencia a la tracción y optimizar el proceso RSW aplicado.
4. Los niveles establecidos por ambos métodos de diseño de experimentos como óptimos, los cuales fueron 3500 A, 500 ms y 2.68 mm concordando con aquellas uniones soldadas que tuvieron el mejor desempeño tanto en el ensayo de tracción con una resistencia de 314.43 MPa como en el ensayo de microdureza Vickers con 275 HV promedio en la ZF.
5. La baja intensidad de corriente con un menor tiempo de aplicación es la manera en la que se obtiene una menor ZAC, factores decisivos para que el botón de soldadura muestre una buena calidad debido a que la ZAC tiende a perder dureza al disminuir casi en su totalidad las islas de martensita en esta zona entre mayor es el aporte de entrada de calor.
6. El espesor fue el factor más significativo en los botones de soldadura unidos por RSW. Siendo que, entre mayor es la diferencia de los espesores de las láminas a unir, mayor detrimento en sus propiedades mecánicas y metalúrgicas presentaran debido a que el botón de soldadura tiende a formar más en dirección de la lámina de mayor espesor.



7. La microestructura que fundamentalmente se encontró en la ZF fueron granos columnares con martensita, ferrita Widmanstätten y ferrita acicular con alta dureza en la zona debido a la segregación de los elementos aleantes.



Referencias

1. D.E. Castillo Gutiérrez, I.I. Angarita Moncaleano and R. Rodríguez Baracaldo. Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, 2018, 26(3), p. 430-439.
2. J. Sala Serra. Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): TRIP800 Y DP800. Tesis Doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, 2008.
3. H. Zhang, X. Qiu, Y. Bai, F. Xing, H. Yu and Y. Shi. Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels. *Materials & Design*, 2014, 63, p. 151-158.
4. A.G. Thakur, T.E. Rao, M.S. Mukhedkar and V.M. Nandedkar. Application of Taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel. *ARPN Journal of engineering and Applied Sciences*, 2010, 5(11), p. 22-26.
5. M. Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Limusa Wiley, Segunda Edición, México, 2002.
6. Z. Ling, Y. Li, Z. Luo, S. Ao, Z. Yin, Y. Gu and Q. Chen. Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5-8), p. 1923-1931.
7. C. Rajarajan, P. Sivaraj and V. Balasubramanian. Microstructural analysis of weld nugget properties on resistance spot-welded advance high strength dual phase ($\alpha + \alpha'$) steel joints. *Materials Research Express*, 2020, 7(1), p. 016555.
8. P. Sivaraj, M. Seeman, D. Kanagarajan and R. Seetharaman. Influence of welding parameter on mechanical properties and microstructural features of resistance spot welded dual phase steel sheets joint. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22, p. 558-562.
9. K. Zhou and L. Cai. Study on effect of electrode force on resistance spot welding process. *Journal of applied physics*, 2014, 116(8), p. 084902.
10. M. Elitas and B. Demir. The effects of the welding parameters on tensile properties of RSW junctions of DP1000 sheet steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2018, 8(4), p. 3116-3120.
11. T.K. Pal and K. Bhowmick. Resistance spot welding characteristics and high cycle fatigue behavior of DP 780 steel sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(2), p. 280-285.
12. K. Rasheed and M. Khan. A Review on different optimization techniques used to optimize the process parameters of resistance spot welding. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 2014, 2(5), p. 65-72.
13. A. Yürük and N. Kahraman. Weld zone characterization of stainless steel joined through electric resistance spot welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5-8), p. 2975-2986.
14. M. Pouranvari and S. Marashi. Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds. *Materials Science and Technology*, 2010, 26(9), p. 1137-1144.



15. P. Ravichandran, C. Anbu, B. Meenakshipriya and S. Sathiyavathi. Process parameter optimization and performance comparison of AISI 430 and AISI 1018 in resistance spot welding process. *Materials Today, Proceedings*, 2020.
16. A.E. Hernández, L.O. Villarinho, V.A. Ferraresi, M.S. Orozco, A.S. Roca and H.C. Fals. Optimization of resistance spot welding process parameters of dissimilar DP600/AISI304 joints using the infrared thermal image processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108, p. 211-221.
17. M.R. Rawal and K. Inamdar. Review on various optimization techniques used for process parameters of resistance spot welding. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2014, 3, p. 160-164.
18. A. Bahrami, S.M. Anijdan and A. Ekrami. Prediction of mechanical properties of DP steels using neural network model. *Journal of alloys and compounds*, 2005, 392(1-2), p. 177-182.
19. O. Martín, M. López and F. Martín. Redes neuronales artificiales para la predicción de la calidad en soldadura por resistencia por puntos. *Revista de metalurgia*, 2006, 42(5), p. 345-353.
20. N. Haghshenas and H. Moshayedi. Monitoring of Resistance Spot Welding Process. *Experimental Techniques*, 2020, 44(1), p. 99-112.
21. Y. Liang, Y. Zhang, A. Sivasubramaniam, M. Jette and R. Sahoo. Bluegene/l failure analysis and prediction models. In *International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'06)*, IEEE, 2006, p. 425-434.
22. A.L. Alvarado Gutiérrez. Análisis microestructural y de propiedades mecánicas a temperaturas elevadas de aceros avanzados de alta resistencia para el conformado en caliente. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2013.
23. R. Kuziak, R. Kawalla and S. Waengler. Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2008, 8(2), p. 103-117.
24. S. Keller, M. Kimchi and P. Mooney. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0*. WorldAutoSteel, April, 2017.
25. N. Fonstein. Dual-phase steels. In *Automotive Steels*, Elsevier 2017, p. 169-216.
26. A. Monsalve, A. Artigas, F. Castro, R. Colás Ortíz and Y. Houbaert. Caracterización de aceros dual-phase obtenidos por laminación en caliente. *Revista de metalurgia*, 2011, 47(1), p. 5-14.
27. L. Valeria, H.N. Lorusso and H.G. Svoboda. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Procedia Materials Science*, 2015, 8, p. 1047-1056.
28. T. Hilditch, T. de Souza and P. Hodgson. Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS). In *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*, Elsevier, 2015, p. 9-28.
29. B.C. De Cooman and J.G. Speer. *Fundamentals of steel product physical metallurgy*. AIST, Association for Iron & Steel Technology, 2011.
30. F.A. Iza Collaguazo and J.P. Vaca Sarria. Análisis de la Zona Afectada por el Calor en los Procesos de Soldadura por Resistencia de Contacto RSW (Por puntos) y FW (Por chispa), Tesis de Licenciatura, Quito, 2012.
31. D.A. Nacimba Nacimba. Automatización de una soldadora de punto estática, Tesis de Licenciatura, Quito, EPN, 2011.



32. H. Eisazadeh, M. Hamed and A. Halvae. New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method. *Materials & Design*, 2010, 31(1), p. 149-157.
33. L. Kaščák, E. Spišák and I. Gajdoš. Influence of welding parameters on the quality of resistance spot welded joints of DP600 steels. In *Key Engineering Materials*, 2015, Trans Tech Publ.
34. M. Vigneshkumar and P.A. Varthanan. Comparison of RSM and ANN model in the prediction of the tensile shear failure load of spot welded AISI 304/316 L dissimilar sheets. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 2019, 8(2), p. 114-130.
35. Y. Kaya and N. Kahraman. The effects of electrode force, welding current and welding time on the resistance spot weldability of pure titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 60(1-4), p. 127-134.
36. O.P.R Cortés. Evaluación de los parámetros del proceso de soldadura de puntos por resistencia (RSW) sobre las propiedades mecánicas y metalúrgicas de un acero al carbono, Tesis de Licenciatura, 2012.
37. P. Wu. Testing and modeling of machine properties in resistance welding, PhD Thesis, Technical University of Denmark, 2004.
38. R.L. O'Brien. *Welding Handbook*. 1996.
39. G.P. Humberto and R. De La Vara. *Análisis y diseño de experimentos*. Editorial Mc Graw Hill, 2008.
40. D.C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons, 2017.
41. R.O. Kuehl. *Design of experiments: statistical principles of research design and analysis*, 2nd Edition, Brookes/Cole, Pacific Grove, California, 2000.
42. A.M. Lara Porras, *Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS*, Proyecto Sur de Ediciones, 2000.
43. E.A.C. Trejos, P.D.M. Varela and C.A.S. Diaz, Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi. *Scientia et technica*, 2012, 2(50), p. 52-56.
44. R. Ruiz Lombera. Estudio comparativo de técnicas basadas en inteligencia artificial para la monitorización de la calidad en procesos de soldadura, Tesis de Licenciatura, Universidad de Cantabria, 2012.
45. R.C. Valdés García. Diseño y entrenamiento de una red neuronal para la estimación de daño en una estructura escolar bajo vibraciones, Tesis de Maestría, Universidad Autonoma del Estado de México, 2019.
46. N.S. Torres Álvarez, C. Hernández and L.F. Pedraza. Neural networks and prediction of traffic. *Tecnura*, 2011, 15(29), p. 90-97.
47. J.R. Hilera González and V.J. Martínez Hernando. *Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones*, Editorial: Madrid : RA-MA, 1995.
48. FEPA-Standards 43-1:2006, 43-2:2006 and in ISO 6344
49. G.F. Vander Voort. *Metallography, principles and practice*. ASM international, 1999.
50. M. Pouranvari. Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile-shear loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 546, p. 129-138.
51. M. Pouranvari, S.P.H. Marashi, and S.M. Mousavizadeh. Failure mode transition and mechanical properties of similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 and



- low carbon steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(7), p. 625-631.
52. F. Reyes, R. Vences, J. Salazar, H. Vergara, I. Aguilera and V. Pérez. Parameter optimization: force (F), time (T) and current intensity (I), in the RSW welding process of DP-290 steel plates using the taguchi method. *Soldagem*, 2017, p. 01-11.
 53. A. E384. Standard test method for knoop and vickers hardness of materials, 2011.
 54. P.D. Sudersanan, N. Kori, S. Aprameyan and U.N. Kempaiah. The effect of carbon content in martensite on the strength of dual phase steel. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2012, 2(2), p. 01-04.
 55. C.C. Tasan, M. Diehl, D. Yan, M. Bechtold, F. Roters, L. Schemmann and K. Tsuzaki. An overview of dual-phase steels: advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design. *Annual Review of Materials Research*, 2015, 45, p. 391-431.
 56. M.C. Rodríguez Barrero. Obtención y caracterización microestructural de un acero doble fase, Tesis Doctoral, Universidad Libre, 2017.
 57. M. Ali, T. Nyo, A. Kaijalainen, J. Hannula, D. Porter and J. Kömi, Influence of chromium content on the microstructure and mechanical properties of thermomechanically hot-rolled low-carbon bainitic steels containing niobium, *Applied Sciences*, 2020, 10(1), 344.
 58. W. Chen, J. Liu, Z. Cheng, X. Lin, and J. Zhu, Effect of chromium on microstructure, ordered phase and magnetic properties of Fe-6.5 wt% Si alloy, *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2, p. S314-S318
 59. J.M. Jiménez Arenas. Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un acero, Trabajo fin de grado, Universidad de Sevilla, 2016.
 60. H. Lorusso, A. Burgueño and H. Svoboda. Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros Dual-Phase. *SAM/CONAMET*, 2008, 8, p. 282-285.
 61. G. Krauss. *Steels: processing, structure, and performance*. Asm International, 2015.
 62. R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón, J.C. Villalobos, H.J. Vergara-Hernández and J.A. Salazar-Torres. Evaluation of Corrosion Susceptibility of Conventional Dual-Phase Steels Used in the Automotive Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(10), p. 6520-6534.
 63. H. Zhang, X. Qiu, F. Xing, J. Bai and J. Chen. Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dual-phase steels during tensile shear test. *Materials & Design*, 2014, 55, p. 366-372.
 64. N. Muhammad, Y.H. Manurung, M. Hafidzi, S.K. Abas, G. Tham and M.R.A. Rahim. A quality improvement approach for resistance spot welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, 2012, 2(3), p. 17-22.
 65. R.A. Fisher. *Statistical Methods for Research Worker*. London, Oliver & Boyd, 1925.
 66. R.K. Suresh. Parameter optimization for tensile shear strength during spot welding of corrugated mild steel plates. *VSRD International Journal of Mechanical, Civil, Automobile and Production Engineering*, 2014, 4, p. 2319-2208.
 67. D. Shah and D.P. Patel. Prediction of weld strength of resistance spot welding using artificial neural network. *Journal of Engineering Research and Application*, 2013, 3(5), p. 1486-1491.



68. M. Pouranvari and P. Marashi. Resistance spot welding of unequal thickness low carbon steel sheets. In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd, 2010, p. 1205-1211.
69. H. Svoboda, H.N. Lorusso and A. Burgueño. Welding of dual phase steel sheet: GMAW, PAW and RSW. *Soldagem & inspeção*, 2011, 16(2), p. 165-176.
70. H. Lorusso, A. Burgueño and H.G. Svoboda. Evolución microestructural y propiedades mecánicas de aceros dual phase soldados por resistencia (RSW), *IBEROMET XIX CONAMET/SAM*, 2010, 2, p. 1-8.
71. C. Ma, D.L. Chen, S.D. Bhole, G. Boudreau, A. Lee and E. Biro. Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 485(1-2), p. 334-346.
72. S. Dancette, D. Fabregue, J. Merlin, V. Massardier-Jourdan and M. Bouzekri. Welding of advanced high strength steels: study of the microstructures obtained and damage mechanism during cross tension test. In: *New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels*, Proceeding Buenos Aires, 2008, paper number 058.
73. M. Marya and X. Gayden. Development of requirement for Resistance Spot Welding Dual-Phase (DP600) Steels Part 1-The cause of interfacial fracture, *Welding Journal*, USA, 2005, 84(11), p. 172s-185s.
74. W.D. Callister Jr., *Materials Science and Engineering—An Introduction*. Seventh ed., John Wiley and Sons, New York, 2007, pp. 155–160
75. H.T. Sun, X.M. Lai, Y.S. Zhang and J. Shen. Effect of variable electrode force on weld quality in resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, 12(8), p. 718–724.
76. T. Arunchai, K. Sonthipermpon, P. Apichayakul and K. Tamee. Resistance spot welding optimization based on artificial neural network. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014, 2014.
77. Ľ. Kaščák, E. Spišák, and I. Gajdoš, Influence of welding parameters on the quality of resistance spot welded joints of DP600 steels, In *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd., 2015, 635, pp. 143-146.



Anexos. Productividad Científica

Artículos en revistas indexadas:

1. F. Reyes-Calderón, R. Vences-Hernández, J. Salazar-Torres, H. Vergara-Hernández, I. Aguilera-Navarrete and V. Pérez-González. Parameter optimization: force (F), time (T) and current intensity (I), in the RSW welding process of DP-290 steel plates using the taguchi method. Soldagem, 2017, p. 01-11.
2. R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón, J.C. Villalobos, H.J. Vergara-Hernández and J.A. Salazar-Torres. Evaluation of Corrosion Susceptibility of Conventional Dual-Phase Steels Used in the Automotive Industry. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10), p. 6520-6534.

En foros de Ingeniería en Materiales:

1. R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón. Análisis de la calidad de aceros Dual Phase de diferente espesor y resistencia mecánica empleados en la industria automotriz. 15° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales, noviembre 2018.
2. P.S. García-Celaya, F. Reyes-Calderón, R. Vences-Hernández, N. Alcantar-Mondragón y H.J. Vergara-Hernández. Análisis de la unión disímil por el proceso RSW de aceros DP270-C/Galvannealed. 16° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales, noviembre 2019.

Tesis de Licenciatura:

1. A.I Robles-Cortés, F. Reyes-Calderón y R. Vences-Hernández. Correlación entre la formabilidad y la condición metalográfica de aceros Dual Phase (DP) empleados en la industria automotriz. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia, 2017.
2. P.S. García-Celaya, F. Reyes-Calderón y R. Vences-Hernández. Análisis de la unión disímil por el proceso RSW de los aceros DP270-C/Galvannealed. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia, 2019.



Soldagem & Inspeção. 2018, Ahead of Print
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/S12302.04>
ISSN 1980-6973 (Online)
ISSN 0104-9224 (Print)

Parameter Optimization: Force (F), Time (T) and Current Intensity (I), in the RSW Welding Process of DP-290 Steel Plates Using the Taguchi Method

F. Reyes-Calderón^{1,2,3}, R. Vences-Hernández¹, J.A. Salazar-Torres¹, H.J. Vergara-Hernández^{1,2}, I. Aguilera-Navarrete², V. Pérez-González²

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Morelia, Michoacán, México.

² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Maestría en Ciencias en Metalurgia, Morelia, Michoacán, México.

³ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Departamento de Metalmeccánica, Morelia, Michoacán, México.

Received: 12 Nov., 2017
Accepted: 22 May, 2018

E-mail: unicorniopegaso23@hotmail.com
(FRC)

Abstract: Automotive industries are trying to use new light materials for structural parts of vehicles. However, the steels are being the best manufacturing material option in the automotive industry. One of the advanced steels commonly used due to the high mechanical properties is the Dual Phase Steel (Ferritic-Martensitic). Therefore, the welding process is still very important and a matter of improvement. The present work shows the design of an experimental matrix using the Taguchi method with the optimal parameters to apply in the spot welding process (RSW) of a DP-290 steel; the metallographic characterization, the microhardness and the Peel tests were also carried out in each specimen. The results determined that the lower intensity of current and a medium pressure for a longer time the better resistance to tearing, due to the microstructural changes in the specimens.

Key-words: Dual phase steel; RSW; Ferritic-martensitic microstructure; Mechanical resistance improvement.

Optimización de los Parámetros: Fuerza (F), Tiempo (t) e Intensidad de Corriente (I), en el Proceso de Soldadura RSW de Chapas de Acero DP-290 Empleando el Método de Taguchi

Resumen: Las industrias automotrices están tratando de emplear nuevos materiales ligeros para elementos estructurales de los vehículos. Sin embargo, los aceros continúan siendo la mejor opción para la manufactura en la industria automotriz. Uno de los aceros avanzados comúnmente usado por sus buenas propiedades mecánicas es el acero Doble Fase (Ferrita-Martensita). Por tal motivo, el proceso de soldadura empleado es muy importante y sigue siendo motivo de mejora continua. El presente trabajo muestra el diseño de una matriz experimental empleando el método de Taguchi con los parámetros óptimos para ser aplicados en el proceso de soldadura de puntos por Resistencia (RSW) de un acero DP-290; en cada probeta se realizó la caracterización metalográfica, la microdureza y los ensayos de desgarre. Los resultados obtenidos determinaron que una menor intensidad de corriente y una presión moderada junto con mayores tiempos de soldeo producen una mejor resistencia al desgarre, debido a los cambios microestructurales de las probetas.

Palabras clave: Acero doble fase; RSW; Microestructura ferrítica-martensítica; Mejora de la resistencia mecánica.

1. Introduction

The assembling of metallic pieces to the manufacturing of automotive vehicles requires the resistance spot welding process (RSW) to join them. These assemblies are part of the chassis and some other important structural elements of the vehicle. The advanced high strength steels (AHSS) are used as part of the vehicle, which combine strength and ductility through the phase transformation induced by deformation and solid solution hardening, resulting in a good strength-weight relationship. The Dual Phase (DP) steel is one of the most common AHSS used in the industry due to its good formability with relatively high strength, continuous performance followed by a rapid hardening, low yield ratio in tensile strain and non-aged behavior at room temperature [1].



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial license, which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Evaluation of Corrosion Susceptibility of Conventional Dual-Phase Steels Used in the Automotive Industry

R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón, Julio C. Villalobos, H.J. Vergara-Hernández, and J.A. Salazar-Torres

(Submitted December 13, 2019; in revised form August 22, 2020; Accepted September 27, 2020)

Because of the high demand for dual-phase (DP) steels in the automotive and construction industry, the present investigation focused on evaluating the corrosion resistance of three different commercial DP steels through electrochemical corrosion tests in conventional media (0.5 M NaOH, 3.5 wt.% NaCl, and 0.5 M H₂SO₄ solution). The potentiodynamic polarization test allowed us to determine the corrosion rate and the degradation mechanism as a function of DP steel type, test media, the amount of martensite fraction, and microstructure of DP steels. DP-270 steel presented a higher corrosion resistance in NaCl and H₂SO₄ solutions compared with other DP steels. Moreover, DP-590 steel showed a higher corrosion resistance in NaOH solutions, while the DP-789 steel had the worst performance in NaOH and NaCl. Electrochemical impedance spectroscopy tests were performed to determine the charge-transfer resistance values from the Nyquist plots and review if DP steels followed the same tendency as the results that were obtained in the potentiodynamic polarization test, the mechanism of degradation was attributed to a charge-transfer. The microstructural characteristics of DP steels showed us that better corrosion resistance is related to a better distribution of the martensitic phase.

Keywords corrosion, dual-phase steel, potentiodynamic polarization curves, wear

1. Introduction

Dual-phase (DP) steels have the right balance between tensile strength and stamping, which allows the production of thinner sheets, while reducing manufacturing costs. These attributes give DP steels the capability to absorb the energy generated during impact, making DP steels ideal for the automotive industry and increasing the units safety features (Ref 1). The advanced high-strength steel application guidelines V5 (Ref 2) and the work performed by Fonstein (Ref 3) showed that up to 40% of the total steel that is used in the automobile structure is DP steel. Years ago, the possibility of replacing conventional construction steels with DP steels was considered (Ref 4). The outstanding mechanical properties of DP steels made it a clear candidate to replace pearlitic steels in the construction industry because of its higher corrosion resistance (Ref 5).

The DP steel characteristics mostly depend on its microstructure, which consists of a second martensitic phase and a ductile ferritic matrix. The volume fraction of the second martensitic phase increases according to the tensile strength of the steel (Ref 6, 7). The DP steels are either hot or cold-roll processed; these cold-rolled steels are suitable for the manu-

facture of structural and reinforced parts of the car, such as crossbars and roof frames. Because of its properties, DP steel is suitable for reducing the weight of the vehicles (Ref 8).

In addition to the requirements for DP steels' mechanical properties, a corrosion resistance study is essential because the working conditions and the exposed atmospheric environment are severe. DP steels are in direct contact with oxygen and humidity, and corrosion is a bigger issue in areas with abundant salt in the environment or areas with acid rain (mainly sulfuric and nitric acid). Thomas (Ref 9) concluded that DP steels have excellent corrosion performance, mainly in solutions containing chloride ions (Cl⁻). However, when using DP steels as reinforcement for concrete, the concrete alkalinity (pH > 12.5) induces a passivation phenomenon where in the presence of oxygen, Cl⁻ starts to destroy the passive film. This causes a local breakdown of the oxide film and further pitting corrosion (Ref 10, 11).

In previous work by Ismail et al. (Ref 12), DP steel and galvanized steel were evaluated in a solution containing 5% NaCl, and they found that the DP steel had better corrosion resistance compared to galvanized steel. In Keleştemur and Yıldız' research (Ref 5), six different DP steels were tested to determine their corrosion resistance using 3.5 wt% of NaCl, and they determined that the corrosion rate depends on the proportion of the martensitic phase. The results obtained by Uzun and Önal (Ref 13) in polarization tests by immersion in a 3.5 wt% of NaCl solution showed that the morphology of the constituent phases influences DP steel corrosion resistance. Additionally, Sarkar et al. (Ref 4) observed that the amount of martensitic phase present in DP steels has a direct impact on the corrosion resistance of DP steels; if the amount of martensite increases, the corrosion resistance decreases. This explains why the high internal energy in the martensitic phase makes it vulnerable to corrosion (Ref 14). DP steels exhibited less resistance to pitting corrosion compared to transformation-induced-plasticity (TRIP) and twinning-induced-plasticity (TWIP) steels in the tests that were developed in 3.5 wt.%

R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón, Julio C. Villalobos, H.J. Vergara-Hernández, and J.A. Salazar-Torres, División de estudios de posgrado e investigación, Departamento de Metalmeccánica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguillo, CP 58120 Morelia, Michoacán, Mexico. Contact e-mail: unicorriopegaso23@hotmail.com.



LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Y EL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES



Instituto de Investigación
en Metalurgia y Materiales



OTORGAN LA PRESENTE
CONSTANCIA

A

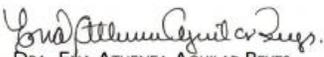
R. Vences-Hernández, F. Reyes-Calderón

POR SU PARTICIPACIÓN TITULAR

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ACEROS DUAL PHASE DE DIFERENTE
ESPESOR Y RESISTENCIA MECÁNICA EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA
AUTOMOTRIZ**

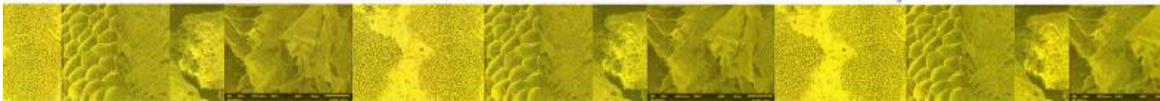
En el marco de las actividades científicas del

15° FORO DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN EN MATERIALES


DRA. ENA ATHENEA AGUILAR REYES
Representante de CAC Ingeniería
y Tecnología de Metales, Cerámicos y Aleaciones


DR. ALBERTO RUIZ MARÍN
Director del I.I.M.M.


DRA. IRERI SUAZO ORTUÑO
Coordinadora de la Investigación Científica





LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Y EL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES



OTORGAN LA PRESENTE CONSTANCIA A:

P.S. García-Celaya, F. Reyes-Calderón, R. Vences-Hernández,
N. Alcantar-Mondragón, H.J. Vergara-Hernández

POR SU PARTICIPACIÓN TITULADA

Análisis de la unión disímil por el proceso RSW de los aceros DP270-C/Galvannealed



En el marco de las actividades científicas del

16° FORO DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

desarrollado en Morelia, Michoacán, al 15 de noviembre de 2019



Ena Athenea Aguilar Reyes

DRA. ENA ATHENEA AGUILAR REYES

Representante del CAC UMSNH-CA-105 Ingeniería
y Tecnología de Metales, Cerámicos y Aleaciones

V. López Morelos

DR. VÍCTOR HUGO LÓPEZ MORELOS
Director IIMM

Marco Antonio Landavazo Arias

DR. MARCO ANTONIO LANDAVAZO ARIAS
Coordinador de la Investigación Científica



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Morelia

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA
DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES

DEPARTAMENTO METAL-MECANICA

TESIS PROFESIONAL

"CORRELACIÓN ENTRE LA FORMABILIDAD Y LA CONDICIÓN
METALOGRÁFICA DE ACEROS DUAL PHASE (DP) EMPLEADOS
EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ"

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN MATERIALES

PRESENTA:

ANEL IVONNE ROBLES CORTES.

ASESOR INTERNO:
Dr. FRANCISCO REYES CALDERON.

ASESOR EXTERNO:
M.I. ROGELIO VENCES HERNANDEZ

MORELIA MICHOACAN.

SEPTIEMBRE 2017.





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Morelia

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Morelia, Mich., 05 de septiembre de 2019

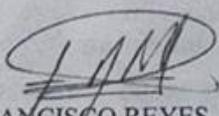
DEPENDENCIA: Sub Acad.
SECCIÓN: IMAT
OFICIO: 669 /2019
Asunto: Autorización de impresión definitiva.

MARTHA ALICIA LUPERCIO MORENO
JEFA DE LA DIV. DE ESTUDIOS PROFESIONALES

Los que suscriben, integrantes del Jurado de Examen Recepcional del egresado (a) cuyos datos se especifican a continuación:

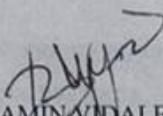
Nombre del egresado (a):	PAOLA SAMANTHA GARCÍA CELAYA
Número de control:	15120230
Pasante de la Carrera de:	INGENIERÍA EN MATERIALES
Opción de Titulación:	TITULACIÓN INTEGRAL POR TESIS
Título final del trabajo de titulación:	"ANÁLISIS DE LA UNIÓN DISÍMIL POR EL PROCESO RSW DE LOS ACEROS DP270-C/GALVANNEALD"

Hacemos constar que hemos revisando su tesis profesional y tenemos a bien comunicarle nuestra autorización para la liberación del mismo y su impresión definitiva.



FRANCISCO REYES CALDERÓN
PRESIDENTE Y ASESOR

ATENTAMENTE



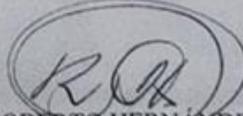
BENJAMÍN VIDALES CÁRDENAS
SECRETARIO



ROGELIO VENCES HERNÁNDEZ
VOCAL PROPIETARIO



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA



ROBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
VOCAL SUPLENTE

CCP. Alumno



Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguillo, C. P. 58120. Morelia, Michoacán.
Tel. (443) 3 12 15 70, Ext. 256, Fax: Ext. 211, Email: material@itmorelia.edu.mx
www.itmorelia.edu.mx

