

CORPORACION MEXICANA DE INVESTIGACION EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST- GRADO



**SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA AHSS
TIPO MARTENSITICOS MEDIANTE SOLDADURA DE PUNTOS
POR RESISTENCIA RSW EN COMPONENTES AUTOMOTRICES**

POR

VICTOR HUGO LOPEZ CORTEZ

TESIS

MAESTRO EN TECNOLOGIA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA, A 30 DE ENERO DE 2009

CORPORACION MEXICANA DE INVESTIGACION EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST- GRADO



**SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA AHSS
TIPO MARTENSITICOS MEDIANTE SOLDADURA DE PUNTOS
POR RESISTENCIA RSW EN COMPONENTES AUTOMOTRICES**

POR

VICTOR HUGO LOPEZ CORTEZ

TESIS

**EN OPCION COMO MAESTRO EN TECNOLOGIA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO COAHUILA, A 30 DE ENERO DE 2009

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “Soldabilidad de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS) Tipo Martensíticos Mediante Soldadura de Puntos por Resistencia (RSW) en Componentes Automotrices”, realizada por el alumno Victor Hugo López Cortez matrícula No.07-MS004 sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial.

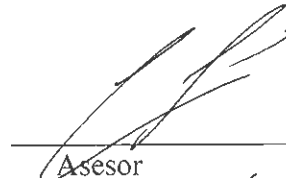
El Comité Tutorial



Tutor Académico
Dr. Felipe Arturo Reyes Valdez



Tutor de Planta
Dr. Salvador Valtierra Gallardo



Asesor
Dr. Rafael Colás

Coordinador de Posgrado
M.C. Claudia Aracely González Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Vida:

Por darme la oportunidad de intentarlo y de lograrlo

A mi Esposa e Hijos:

Mary, Karen y Victor por ser el motivo que me alienta a seguir adelante

A mi Madre:

Por su apoyo incondicional, comprensión y cariño sincero

A mis Hermanos:

Raúl, Martha, Luis y Marco por ser un ejemplo en mi vida

A COMIMSA:

Por la oportunidad de seguir creciendo en mi vida profesional

A mis Maestros y Asesores:

Por su ayuda incondicional y sabios consejos.

RESUMEN

El uso de aceros Avanzados Alta Resistencia por sus siglas en ingles AHSS, del tipo Martensitico nos proporcionan beneficios potenciales en la reducción de peso del vehiculo y seguridad en la industria automotriz. Mediante la aplicación de espesores más delgados se obtienen ahorros en materiales, y combustible así como mejoras en el desempeño en absorción de energía durante las pruebas de choque.

Los AHSS del tipo Martensíticos son comúnmente unidos por el proceso de Soldadura de Puntos por Resistencia Eléctrica por sus siglas en ingles RSW en aplicaciones automotrices, estos aceros difieren de los aceros al carbono convencionales, en su composición química y microestructura. En los aceros AHSS las altas resistencias obtenidas son logradas principalmente a través de la modificación de su microestructura. La microestructura original del acero es modificada durante el proceso de soldadura utilizado. A mayor cantidad de calor de entrada (Q) aplicado, es mayor el efecto sobre la microestructura, y a diferentes entradas de calor y rangos de enfriamiento se pueden encontrar diferentes transformaciones microestructurales en la soldadura y zona afectada por calor del punto de soldadura.

Cuando se unen aceros AHSS mediante el proceso de Soldadura de Puntos por Resistencia (RSW) la selección de los parámetros de proceso adecuados en producción, es una de las partes más importantes para la manufactura de un ensamble

exitoso. Los fabricantes automotrices requieren parámetros de soldadura óptimos que produzcan uniones de soldadura que cumplan los requerimientos de calidad del cliente además de obtener el mejor desempeño de las uniones soldadas durante la vida útil del vehículo. Durante el proceso de producción se realizan modificaciones a los parámetros de soldadura como son corriente (C), presión (P) y tiempo (T). Por lo tanto el desempeño del punto de soldadura cambia y las propiedades mecánicas y metalúrgicas son modificadas.

El presente trabajo presenta la variación en propiedades mecánicas y microestructurales de los puntos de soldadura a diferentes condiciones de corriente (C) y tiempo (T) para aceros AHSS del tipo Martensíticos MS 900T/700Y, actualmente utilizados en la industria automotriz y mediante esta información analizar los cambios microestructurales y en propiedades mecánicas que permitan establecer los parámetros de soldadura óptimos que cumplan los requerimientos de calidad y desempeño de los puntos de soldadura.

En la industria automotriz, la optimización de los procesos de soldadura es una de las actividades más importantes. Sin embargo en la actualidad no existe una metodología bien establecida y generalmente se realiza la optimización de los procesos a prueba y error. La primera etapa para la optimización de un proceso de soldadura es la generación del modelo, La metodología de Redes Neuronales utiliza los resultados de las pruebas de las condiciones iniciales del proceso de soldadura como son la presión (P), corriente (C) y tiempo (T). El modelo una vez desarrollado puede predecir las características de calidad requeridas, sin la necesidad de repetir las pruebas. Por lo tanto puede ser utilizado como un modelo inverso tomando las características de calidad requeridas como entradas y obteniendo los parámetros de soldadura óptimos

como salidas. De esta manera el presente trabajo presenta la utilización de esta metodología para la obtención de los parámetros óptimos de soldadura en unión de aceros AHSS del tipo martensíticos.

CONTENIDO

Resumen	1
Contenido	4
CAPITULO 1 INTRODUCCION	7
CAPITULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Preguntas de Investigación	12
2.3 Hipótesis	12
2.4 Objetivo General	13
2.5 Objetivos Específicos	13
2.6 Justificación	14
CAPITULO 3 MARCO TEORICO	15
3.1 Introducción	15
3.2 Clasificación de los Aceros Avanzados AHSS	17
3.2.1 Aceros Fase Dual (Dual Phase DP)	18
3.2.2 Aceros de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP)	22
3.2.3 Aceros Martensíticos (Martensitic Steel MS)	24
3.2.4 Aceros Fase Compleja (Complex Phase CP)	26
3.2.5 Aceros Ferrítico – Bainíticos (Ferritic – Bainitic FB)	27
3.2.6 Aceros de Plasticidad Inducida por Maclaje (TWIP)	27
3.3 Soldadura de Puntos por Resistencia Eléctrica RSW	28
3.3.1 Antecedentes	28
3.3.2 Fundamentos	29
3.3.3 Morfología del Punto de Soldadura	30
3.3.4 Ciclo de Soldadura	30
3.3.5 Principios de Funcionamiento	31

3.3.6	Gradiente de Temperatura	32
3.3.7	Tiempo	35
3.3.8	Fuerza de Soldadura	37
3.3.9	Efecto de Desviación	37
3.3.10	Impulsos Múltiples	38
3.3.11	Medición de Parámetros de Soldadura	39
3.3.12	Equipo	41
3.3.13	Parámetros que Afectan la Soldadura	41
3.3.14	Soldadura de Aceros Recubiertos	43
3.3.15	Electrodos	45
3.3.16	Fuerza de Electrodos	46
3.3.17	Tiempo de Soldadura	46
3.3.18	Corriente de Soldadura	47
3.3.19	Tiempo de Sostenimiento	48
3.3.20	Desviación de Corriente	48
3.3.21	Enfriamiento del Electrodo	49
3.3.22	Sensibilidad del Tiempo de Sostenimiento	49
3.3.23	Formación del Punto de Soldadura	51
3.3.24	Propiedades Mecánicas	54
3.3.25	Defectos en la Soldadura	55
3.3.26	Efectos de los Elementos de Aleación	56
3.3.27	Especificaciones de Calidad	58
3.4	Soldabilidad de los Aceros Avanzados AHSS	59
3.5	Soldadura de Puntos por Resistencia Eléctrica para Aceros Avanzados AHSS	62
3.5.1	Balance de Calor	63
3.5.2	Modo de Tránsito de Energía de soldadura	65
3.5.3	Geometría del Electrodo	66
3.6	Optimización de Procesos de Soldadura	67
3.6.1	Modelo de Redes Neuronales	68

CAPITULO 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL	72
4.1 Determinación de Variables	72
4.2 Diseño de Experimentos	73
4.3 Elaboración de Probetas de Soldadura	74
4.4 Realización de Pruebas de Soldadura	76
4.4.1 Prueba de Desprendimiento	77
4.4.2 Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante	78
4.4.3 Prueba de Microdureza	79
4.4.4 Análisis Metalográfico	79
4.4.5 Modelo de Redes Neuronales	80
CAPITULO 5 ANALISIS DE RESULTADOS	82
5.1 Diámetro de Punto de Soldadura	82
5.2 Profundidad de Indentacion	84
5.3 Correlación Diámetro - Indentacion	85
5.4 Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante	86
5.5 Correlación Diámetro – Esfuerzo cortante	89
5.6 Microdureza	90
5.7 Microestructuras	92
5.8 Entrenamiento y Validación de Modelo de Redes Neuronales	97
CAPITULO 6 CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFIA	103
LISTA DE TABLAS	108
LISTA DE FIGURAS	109
ANEXO A	112

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Actualmente los fabricantes de automóviles buscan mejorar continuamente la seguridad y la economía en el consumo de combustibles durante la fabricación de vehículos, mientras que al mismo tiempo buscan reducir los costos y el impacto ambiental, esto afecta drásticamente el diseño del vehículo y la selección de las partes para el mismo. Lograr estas metas requiere la combinación de materiales de alta tecnología, de diseños innovadores, de procesos de manufactura avanzados y de una buena comunicación entre los ingenieros de diseño, manufactura, materiales y soldadura.

Con la presentación de los resultados obtenidos por el grupo automotriz de estudio de Conceptos Avanzados en Aceros Ultraligeros para las Carrocerías de Vehículos (ULSABAVC, por sus siglas en Inglés) en el año 2002, se hizo presente el conocimiento sobre los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS por sus siglas en Inglés), de tal forma que hoy en día la industria cuenta con los materiales de alta tecnología que requiere. Estos materiales proporcionan una combinación de características como son la resistencia, formabilidad, soldabilidad, durabilidad y resistencia al

impacto, características que permiten el diseño y la manufactura de estructuras para vehículos más eficientes y a menores costos.

Dentro de la categoría de los AHSS se encuentran los aceros de fase doble (DP, por sus siglas en Inglés), los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP, por sus siglas en Inglés), los cuales presentan características de formabilidad adecuadas para el proceso de Conformado, lo que ayuda a diseños más complejos en la piezas. Otros aceros como los fase complejas (CP) y los aceros martensíticos (Mart), muestran alta resistencia a la tensión, manteniendo una buena absorción de energía durante las pruebas de choque.

La reducción de combustible puede realizarse de dos maneras: aumentando el rendimiento del motor ó reduciendo el peso del vehiculo, lo cual se puede lograr disminuyendo el espesor de sus componentes, mediante el uso de aceros avanzados AHSS. Una reducción del 1% en el peso del vehiculo, provocará una reducción del 0.5% en el consumo del combustible.^[1]

Para el año de 1995 aún no se tenían aplicaciones automotrices de los aceros avanzados AHSS, fue hasta el año 2004-2005 cuando se incremento su aplicación en carrocerías de automóviles con un 12%, un 47% lo ocupaban los aceros alta resistencia HSS y lo que corresponde al 41% los aceros convencionales . Se espera que para el año 2015 la aplicación de los aceros

AHSS se incremente hasta un 50 %.^[2] En la Figura 1.1-1 se muestra la evolución en el uso de este tipo de acero.

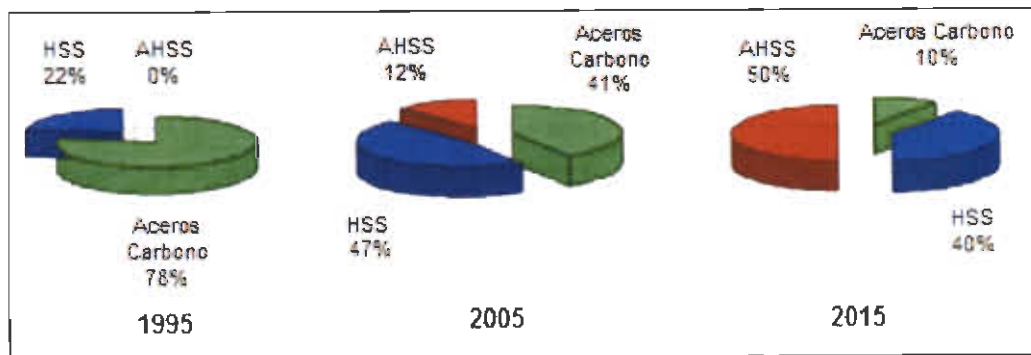


Figura 1.1-1 Evolución del uso de Aceros Avanzados AHSS en la estructura de carrocerías de automóviles^[2]

Actualmente diversas empresas automotrices dedicadas a la fabricación de automóviles han incrementado el uso de aceros avanzados AHSS en sus diseños, tal como BMW, Chrysler, Ford, GM etc. En la Figura 1.1.-2 se muestra cómo las principales compañías automotrices incluyen el uso de este tipo de aceros en la fabricación de sus vehículos.^[3]

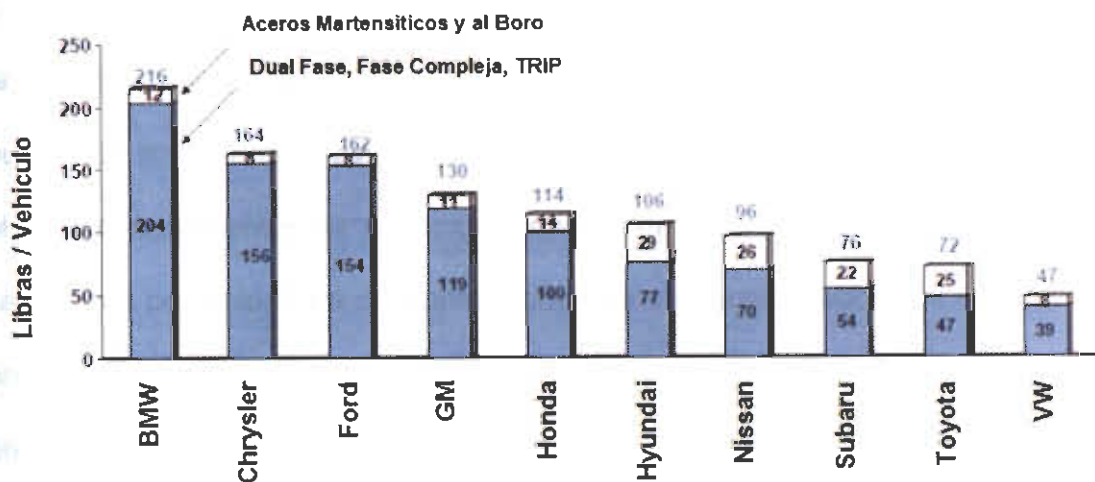


Figura 1.1-2 Contenido en peso por vehículo de aceros AHSS para 2007^[3]

Los aceros avanzados AHSS del tipo martensíticos se utilizan principalmente para la fabricación de partes estructurales de la carrocería, defensas y puertas del automóvil. En la Figura 1.1-3 se muestran las diferentes aplicaciones que tienen en las partes de un automóvil. [3]

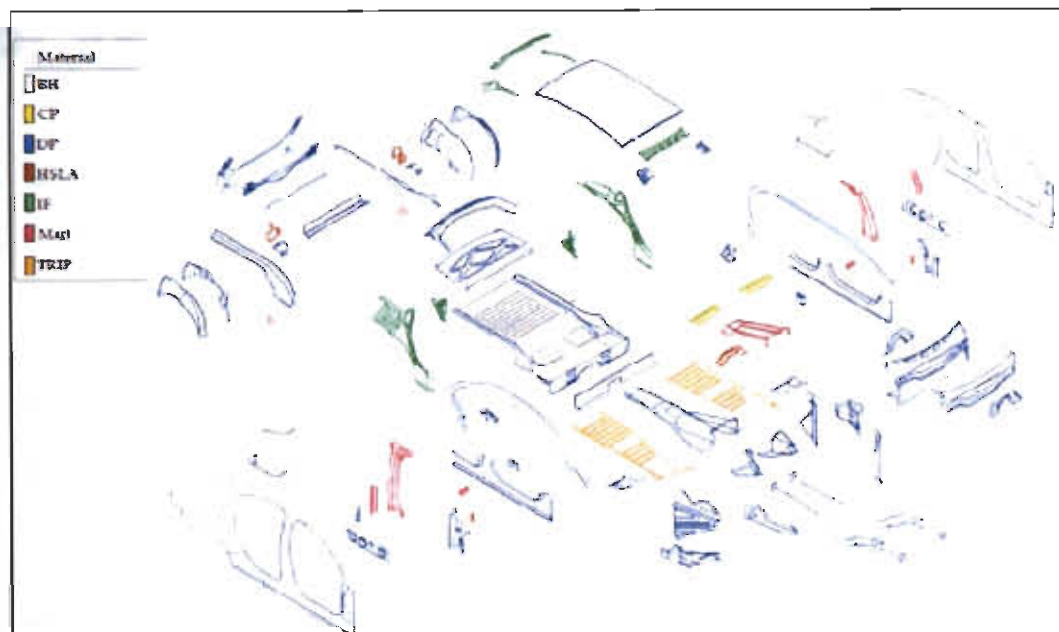


Figura 1.1.-3 Tipos de aceros seleccionados para partes individuales de un automóvil
USLAB-AVC International Iron and Steel Institute 2002 [3]

La soldadura de puntos por resistencia RSW, es el principal método de unión en la industria automotriz, en donde cada vehículo contiene una gran cantidad de puntos de soldadura. Para el uso exitoso de este tipo de aceros, es importante el caracterizar y entender el comportamiento de los aceros avanzados AHSS a ser unidos por soldadura de puntos tomando en consideración los efectos que produce el calor de entrada y su impacto en el comportamiento de sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. Otro propósito del presente trabajo es determinar los parámetros de soldadura óptimos que puedan ser utilizados en la unión de este tipo de materiales.

CAPITULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes

La industria automotriz ha estado en la búsqueda de materiales que le permitan reducir el peso de sus vehículos con el objetivo de disminuir el consumo de combustible, además de cumplir con las nuevas reglamentaciones de seguridad en las pruebas de impacto. Por esto la necesidad de contar con materiales mas resistentes con menos espesor que los tradicionalmente utilizados, como son los aceros al carbono y HSLA. El desarrollo de los AHSS ha cumplido con esta expectativa, sin embargo al ser materiales relativamente nuevos con estructuras complejas, presentan un gran reto para las tecnologías de soldadura actuales, es aquí en donde se requiere un mayor entendimiento y conocimiento de cómo estos materiales pueden ser soldados conservando las propiedades originales y así poder cumplir el desempeño de las uniones soldadas establecido en las bases de diseño

2.2 Preguntas de Investigación

1.- ¿Cuales son las principales variables que afectan la soldabilidad de los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS tipo martensiticos mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia eléctrica RSW?

2.- ¿Como interactúan las principales variables que afectan la soldabilidad de los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS tipo martensiticos mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia eléctrica (RSW)?

3.- ¿Como las variables de soldadura afectan el desempeño de la unión soldada?

4.- ¿Qué metodología de optimización puede ser utilizado en la manufactura de componentes automotrices para este tipo de aceros?

2.3 Hipótesis

Los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS del tipo martensiticos debido a sus altas propiedades mecánicas y composición microestructural compleja, son sensibles a la interrelación de las variables del proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW, que afectan su soldabilidad y modifican sus propiedades mecánicas y microestructurales, por lo tanto el desempeño de la unión soldada.

2.4 Objetivo General

Determinar las variables que afectan la soldabilidad de los Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS tipo martensíticos y establecer la interacción que existe entre éstas y el desempeño de la unión, así como la variación de sus propiedades mecánicas y microestructurales, durante la manufactura de componentes automotrices mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW.

2.5 Objetivos Específicos

- 1.- Determinar las principales variables que afectan la soldabilidad de los AHSS tipo martensíticos mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW.
- 2.- Determinar el efecto combinado de las principales variables que afectan la soldabilidad de los AHSS tipo martensíticos mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW.
- 3.- Determinar cómo las variables de soldadura modifican la estructura metalográfica resultante y cómo afecta ésta en el desempeño de la unión soldada y sus propiedades mecánicas.
- 4.- Proponer una metodología de optimización que pueda ser utilizado en la selección de los parámetros de soldadura en la manufactura de componentes automotrices para este tipo de aceros, mediante un modelo de redes neuronales.

2.6 Justificación

Actualmente se están utilizando en la industria automotriz de la región noreste de México Aceros Avanzados Alta Resistencia AHSS de tipo martensíticos que deberán ser unidos mediante el proceso de soldadura de puntos por resistencia, RSW en donde se requiere conocer las variables involucradas, así como la interacción de éstas y qué procedimientos de soldadura se requieren validar, para la obtención de soldaduras aceptables que cumplan con los requerimientos de diseño establecidos por el cliente, así como el conocimiento de las propiedades mecánicas de las soldaduras aplicadas.

CAPITULO 3

MARCO TEORICO

3.1 Introducción

Usualmente, cuando se emplean aceros de alta resistencia para sustituir a los aceros suaves u otros grados tradicionalmente utilizados en la manufactura de estructuras y paneles automotrices, la reducción en formabilidad es frecuentemente una de las consecuencias no deseadas. Para evitar esto, se han diseñado aceros microestructuralmente avanzados para combinar alta formabilidad y elevada resistencia mecánica.

Los aceros automotrices han sido clasificados de varias maneras, siendo la primera por medio de designaciones metalúrgicas:

Aceros de baja resistencia: aceros de bajo carbono, aceros libres de intersticiales, con contenidos de carbono muy bajos, menores a 0.010% (IF) y aceros suaves.

Aceros convencionales de alta resistencia: tales como aceros de alto carbono, al Carbono-Manganeso (C-Mn), endurecibles por tratamiento térmico, y HSLA (alta resistencia, baja aleación).

Aceros Avanzados de alta resistencia AHSS: Aceros Fase Dual (Dual-phase, DP, ferrita+martensita), aceros TRIP (de plasticidad inducida por transformación), Fase Compleja (CP, ferrita+martensita+bainita), Martensíticos (M, Martensita).^[4]

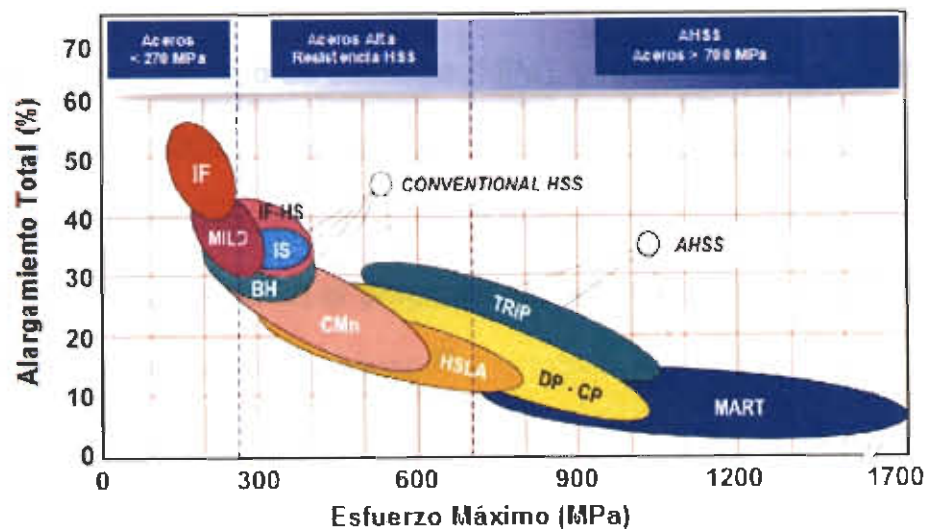


Figura 3.1-1 Relación ductilidad –resistencia para diferentes tipos de aceros.^[5]

La principal diferencia entre los aceros alta resistencia HSS y los aceros avanzados AHSS es su microestructura. Los aceros alta resistencia convencionales son de una sola fase. Los aceros avanzados principalmente, son aceros multifáses, los cuales contienen ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas únicas. Algunos tipos de aceros avanzados AHSS tienen una alta capacidad de endurecimiento, lo que resulta en un balance resistencia-ductilidad superior a los aceros convencionales. Otros tipos tienen ultra-alto

esfuerzo de cedencia y resistencia a la tensión, y presentan un comportamiento de endurecimiento en caliente.

La terminología utilizada para clasificar productos de acero varia considerablemente en el mundo, generalmente se identifica cada grado por su tipo metalúrgico, esfuerzo de cedencia (MPa), y resistencia a la tensión (MPa). Por ejemplo, DP600/800 significa un acero del tipo dual con 600 MPa de esfuerzo de cedencia mínimo y 800 MPa mínimo, de esfuerzo de tensión. Esta clasificación fue utilizada en el programa ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicule Concepts).^[6]

Tabla 3.1-1 Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC

Acero Grado	Esfuerzo Cedencia MPa	Esfuerzo Máximo MPa	Alargamiento (%)
HSLA 350/450	350	450	23-27
DP 300/500	300	500	30-34
DP 350/600	350	600	24-30
TRIP 450/800	450	800	26-32
DP 500/800	500	800	14-20
CP 700/800	700	800	10-15
DP 700/1000	700	1000	12-17
MS 1250/1520	1250	1520	4-6

3.2 Clasificación de los Aceros Avanzados AHSS

Los aceros avanzados AHSS son principalmente de multifases que contienen ferrita, martensita, bainita y/o austenita en cantidades suficientes para producir

propiedades mecánicas mayores a 550 Mpa en esfuerzo de cedencia (YS) y 700 Mpa en esfuerzo último (TS).

La metalurgia fundamental de los aceros convencionales de baja y alta resistencia en general es bien conocida tanto por fabricantes como los usuarios finales de los productos de acero, por lo que la metalurgia y el procesamiento de los aceros avanzados AHSS en algunas ocasiones se comparan con los aceros convencionales. A continuación se presenta la metalurgia básica de estos materiales, para tener un entendimiento básico de cómo sus propiedades mecánicas dependen desde su particular procesamiento y estructura. Todos los aceros avanzados AHSS se producen mediante velocidad de enfriamiento controlado desde la austenita o desde austenita más ferrita, tanto en los molinos de laminado en caliente o en la sección de los hornos de recocido continuo, para el caso de productos con este tratamiento o para productos recubiertos laminados en caliente.

3.2.1 Aceros Fase Dual (Dual Phase DP)

Los aceros DP consisten de una matriz ferrítica con martensita, como segunda fase en forma de islas. Incrementando la fracción en volumen de la segunda fase martensítica, generalmente se incrementa la resistencia. Los aceros DP se producen por enfriamiento controlado desde la fase austenítica (en productos laminados en caliente) o desde una zona ferrita más austenita (para productos laminados en frío y con recocido continuo y productos recubiertos por inmersión

en caliente) para transformar algo de austenita en ferrita, luego se realiza un enfriamiento rápido para transformar la austenita remanente en martensita. Dependiendo de la composición y la ruta de proceso, los aceros laminados en caliente requieren tener capacidad de resistir un estirado en los bordes, entonces puede tener algo de bainita.

La Figura 3.2-1 muestra un esquema de la microestructura del acero DP, la cual contiene ferrita más islas de martensita. La fase suave de ferrita generalmente es continua, dándole a estos aceros excelente ductilidad. Cuando se deforman, la deformación se concentra en la fase de ferrita de baja resistencia rodeando las islas de martensita, creando su particular velocidad de endurecimiento por trabajado que lo caracteriza.

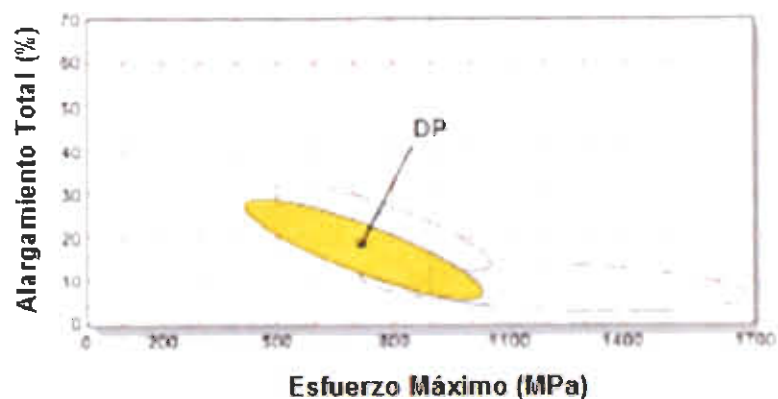


Figura 3.2-1.- Representación esquemática de islas de martensita en una matriz de ferrita. ^[6]

Estos aceros son producidos de manera general a partir de aceros hipoeutectoides (Ferrítico - Períticos) mediante un tratamiento térmico que consiste en un recocido o austenitización parcial a temperaturas ubicadas en la región intercrítica (entre A_3 y A_1) del diagrama Fe-Fe₃C, que descompone la estructura ferrítico-perlítica inicial en una microestructura ferrítico (α) – austenítica (δ), al transformar la perlita (ferrita+Fe₃C) en austenita, y seguido por un temple promueve la transformación de austenita a martensita, generando un material de estructura bifásica con contenidos variables de ferrita y martensita. Ver figuras 3.2-2 y 3.2-3. [7]

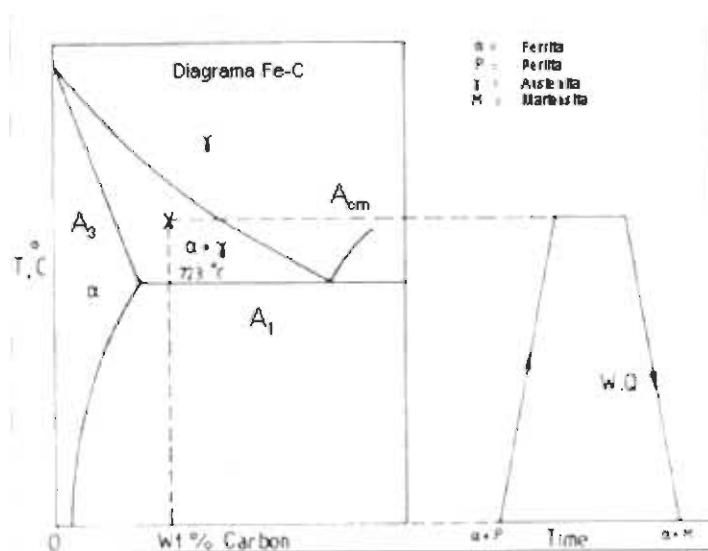


Figura 3.2-2 Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero de fase dual (DP). [8]

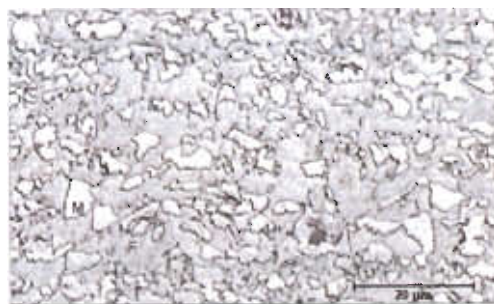


Figura 3.2-3 Metalografía de un acero de fase dual (DP), mostrando una microestructura consistente de ferrita (oscuro, F) y 11% de martensita (claro, M).

Los aceros DP también pueden ser fabricados mediante un procesamiento termomecánico que consiste en austenitizar completamente el acero y laminarlo en caliente en la región austenítica, seguido de enfriamiento al aire en la región bifásica ($\alpha+\delta$), para finalmente templear en agua. ^[9]

La temperatura de temple seleccionada influye en el nivel de resistencia alcanzado por el producto final. A temperaturas más elevadas, mayor la cantidad de austenita que durante el temple transforma en martensita. Se añaden al acero Mn, Cr y Mo para incrementar la templabilidad del material. Así, el proceso de enfriamiento y la templabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.

La resistencia de los aceros depende principalmente de la cantidad y dureza de la martensita en la estructura, la cual puede variar de 10 a 40% en peso, dentro de la matriz de ferrita. ^[10]

Otra característica relevante del comportamiento mecánico de los aceros DP es que no exhiben el fenómeno de punto de cedencia, o cedencia discontinua que causa la aparición de bandas de Luders, lo que evita problemas de apariencia superficial.

Composición Química de Aceros Dual Phase 600

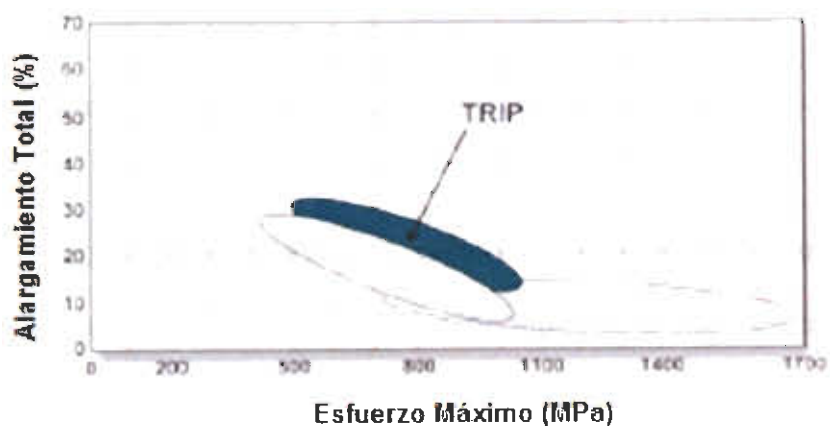
	C	Mn	Si	P	S	N	Al	Ti	Nb	V	B	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn
%	.115	1.55	.186	.026	.005	.0032	.035	.002	.003	.002	.0003	.012	.347	.026	.110	.003

3.2.2 Aceros de Plasticidad Inducida por Transformación (Transformation Induced Plasticity TRIP)

Su microestructura consiste principalmente de tres fases: ferrita, bainita y austenita retenida, aunque también es común la presencia de martensita. Cuando la energía de activación necesaria es inducida durante la deformación, la austenita retenida transforma a martensita mejorando significativamente el endurecimiento por trabajado del material. [9]

Los aceros TRIP usualmente contienen mayor cantidad de carbono y silicio y/o aluminio que los aceros DP, a fin de promover su microestructura multifase. El ciclo térmico aplicado para fabricarlos es similar al utilizado en los aceros DP. La lámina es calentada rápidamente en la región intercrítica para formar una mezcla de austenita y ferrita. La mayor diferencia es la introducción de un mantenimiento isotérmico en la región bainítica, (o un enfriamiento lento) para generar bainita y retener austenita en la estructura final. Esto se logra al deprimir la temperatura M_s abajo del cero al enriquecer en carbono la austenita no transformada. El enriquecimiento en carbono solamente mediante la formación de ferrita es insuficiente. Por lo tanto, un mayor enriquecimiento en carbono se alcanza mediante la formación de bainita. Se añaden Si y Al no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida, sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la formación de bainita. De esta manera el carbono rechazado desde la ferrita enriquece la austenita, la

cual queda retenida en la microestructura final. ^[9,10]. La figura 3.2-4 muestra un esquema de la microestructura de los aceros TRIP.



TRIP



Ferrita
Martensita
Bainita

Austenita Retenida

Figura 3.2-4.- Esquema de la microestructura de los aceros TRIP. ^[9]

Se ha demostrado que los aceros TRIP ofrecen una ductilidad superior y un mayor grado de endurecimiento por trabajado que los grados de acero DP con el mismo nivel de resistencia mecánica.

Sin embargo, la producción de aceros TRIP involucra un costo adicional debido a que el procesamiento es más complicado y por la adición de aleantes al comparárseles con los aceros DP.

Composición Química de Aceros TRIP 800

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr.	Mo	V	Ti	Sn	Al	Cu	B
%	0.232	1.653	1.55	0.004	0.010	0.036	0.033	0.018	0.006	0.004	0.006	0.041	0.033	0.002

3.2.3 Aceros Martensíticos (Martensitic Steel MS)

Para crear los aceros martensíticos, la austenita que existe durante el rolado en caliente o recocido es transformada casi totalmente a martensita durante el temple (enfriado rápidamente) desde una temperatura en fase austenítica (superior a A_3 o A_{cm}) hasta temperatura ambiente, la transformación provoca una estructura martensítica dura en la cual el carbono, originalmente en solución en austenita, se encuentra en forma de solución sólida. La transformación martensítica ocurre, a diferencia de la transformación perlítica, en forma adifusional, en un proceso de deslizamiento de carácter altamente cristalográfico, que lleva a una microestructura lenticular o en listones.

La martensita corresponde a una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. La transformación ocurre en forma atérmica, en un rango de temperaturas bien definido para un acero específico. Inicia a una temperatura M_s (Martensite start) y termina a una temperatura M_f (Martensite finish), ocurre en forma gradual con el enfriamiento. La austenita no transformada después de M_f se le conoce como austenita retenida o residual. Dados los deslizamientos que realiza la red durante la transformación se produce una alta densidad de dislocaciones y en ocasiones microfisuras.

Los aceros martensíticos son caracterizados por una matriz martensítica con pequeñas cantidades de ferrita o bainita. Dentro del grupo de los aceros multifase, los aceros martensíticos muestran niveles de alto esfuerzo a la tensión, arriba de 1700 Mpa como esfuerzo ultimo. Estos aceros son sujetos a tratamiento térmico de relevado de esfuerzos para proveer ductilidad y adecuada formabilidad con alta resistencia. [6].

El carbono es agregado a los aceros martensíticos para incrementar templabilidad y fortalecer la martensita; manganeso, silicio, cromo, molibdeno, boro, vanadio y níquel son también usados en varias combinaciones para incrementar la dureza [6]. La figura 3.2-5 muestra un esquema de la microestructura de los aceros martensíticos.

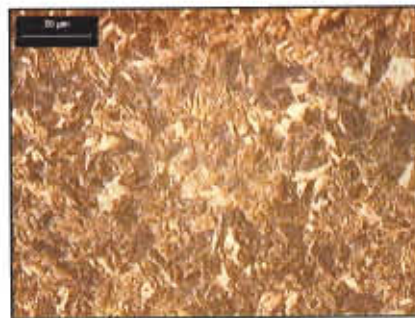
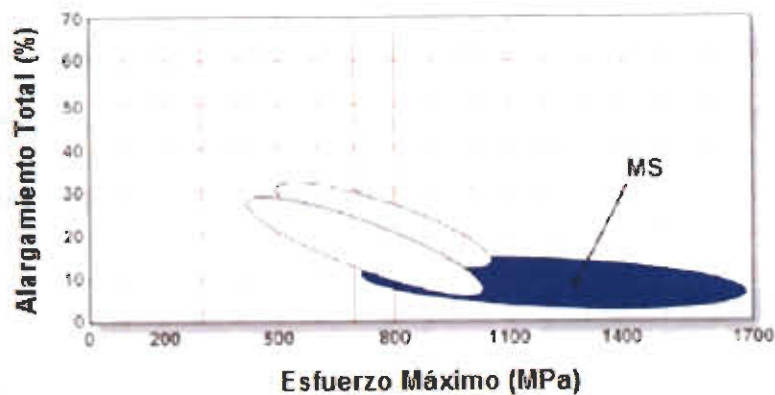


Figura 3.2-5 Esquema de la microestructura de los aceros Martensíticos. [6]

Composición Química de los Aceros Martensíticos

	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
%	0.19	0.004	0.49	0.004	0.24	0.03	.018	0.04	0.019	0.004	0.002	0.046	0.002

3.2.4 Acero Fase Compleja (Complex Phase CP)

La microestructura de los aceros Fase Compleja (CP) esta compuesta de pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita contenida en un matriz de ferrita/bainita.

Se crea un extremo refinamiento de grano para retardar la recristalización o precipitación de elementos microaleantes como Ti o Cb. En comparación con los aceros DP, estos aceros muestran significativamente alto esfuerzo de cedencia y esfuerzos a la tensión de 800 Mpa o más. Están caracterizados por alta energía de absorción y alta capacidad de deformación [6]. La figura 3.2-6 muestra un esquema de la microestructura de los aceros CP.

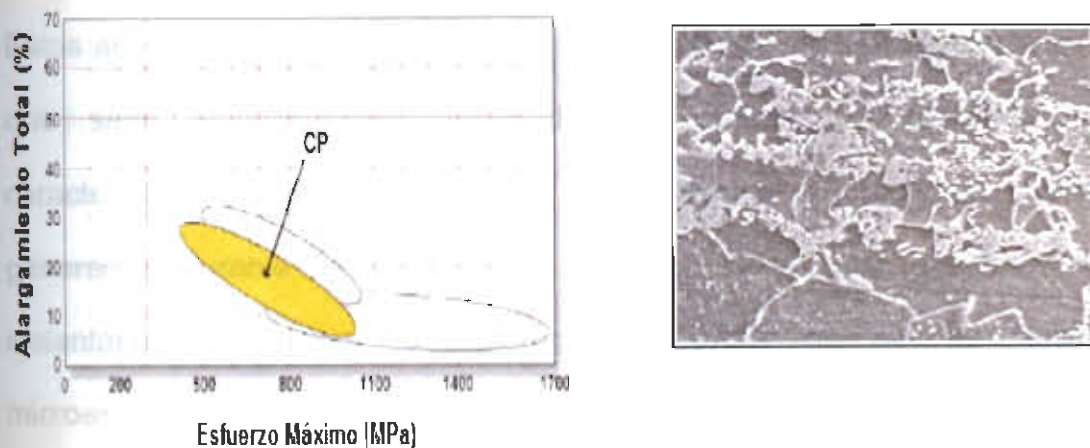


Figura 3.2.6 Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de fase compleja.

3.2.5 Aceros Ferrítico – Bainíticos (Ferritic – Bainitic FB)

Estos aceros contienen una estructura de ferrita fina y bainita. El esfuerzo se obtiene por refinamiento de grano y por la bainita presente, este tipo de acero esta disponible como producto laminado en caliente; tienen buena soldabilidad, buen rendimiento al impacto y resistencia a la fatiga. ^[6] La figura 3.2-7 muestra un esquema de la microestructura de los aceros FB.

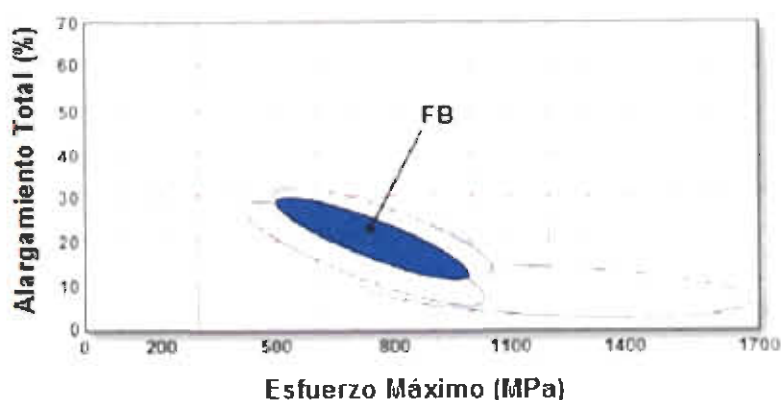


Figura 3.2.7 Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de FB ^[6]

3.2.6 Aceros Plasticidad Inducida por Maclaje (TWIP)

Estos aceros tienen altos porcentajes de manganeso (17- 24%) lo cual causa que sean completamente austéniticos a temperatura ambiente. Esta característica es el principal modo de plasticidad inducida por maclaje, generadas durante la deformación. Las maclas causan un incremento instantáneo del rango de endurecimiento (valor n), así es como la microestructura llega a ser muy fina. El resultado del maclaje se manifiesta dándole resistencia al acero. Los aceros TWIP combinan una extrema

resistencia con una alta formabilidad. El valor n incrementa para un valor de 0.4 a un esfuerzo ingenieril aproximado de 30 % y entonces permanece constante hasta una elongación total alrededor del 50 %. La resistencia a la tensión es mas alta que 1000 Mpa [6]. La figura 3.2-8 muestra un esquema de la microestructura de los aceros TWIP.

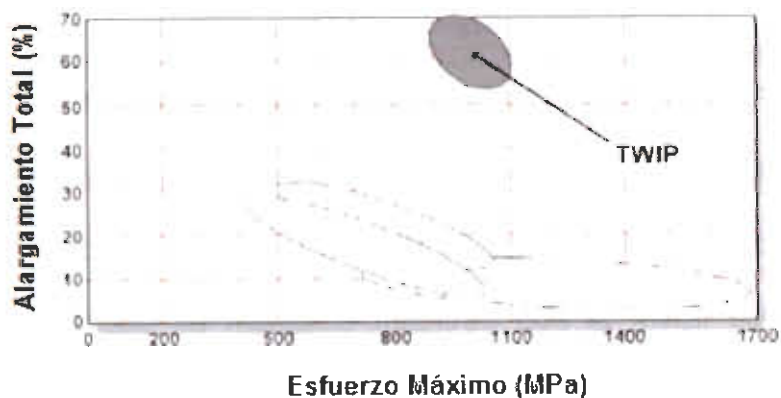


Figura 3.2-8 Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de TWIP [6]

3.3 Soldadura de Puntos por Resistencia Eléctrica RSW

3.3.1 Antecedentes

La soldadura de puntos por resistencia eléctrica (Resistance Spot Welding, RSW) ha sido ampliamente utilizada desde 1950^[11] y es el principal proceso de unión de laminas de acero en la industria automotriz. La soldadura por resistencia fue inventada por Elihu Thomson en 1877 y ha crecido enormemente desde que el primer automóvil soldado fuera introducido en 1933. Este proceso se ha convertido el medio predominante para el ensamblaje automotriz.^[12]

3.3.2 Fundamentos

La soldadura por resistencia eléctrica, es un proceso en el cual, superficies en contacto son unidas con uno o varios puntos mediante la generación de calor debido a la resistencia al paso de una corriente eléctrica, que circula a través de unos electrodos que sujetan y aplican presión a las piezas que se desean unir. Las superficies en contacto en la región de concentración de la corriente son calentadas por un pulso de corto tiempo de bajo voltaje y un alto amperaje de corriente para formar la unión soldada. Cuando el flujo de corriente cesa, la fuerza del electrodo se mantiene mientras que el metal soldado se enfría rápidamente. ^[13] En la Figura 3.3-1 se muestra un diagrama del proceso de soldadura por resistencia, así como también una gráfica con la variación de la resistencia que se genera en diferentes puntos del contacto lámina-lámina.

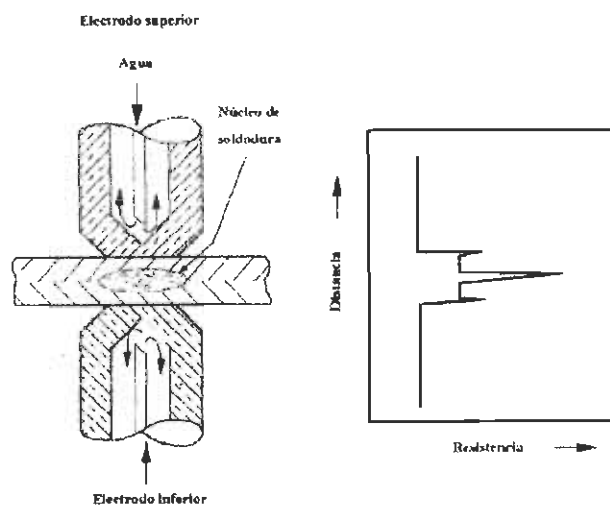


Figura 3.3-1 Esquema representativo de la soldadura por puntos ^[14]

3.3.3 Morfología del Punto de Soldadura

Un punto de soldadura por resistencia se puede dividir en tres partes:

1. **Punto de soldadura:** que representa la huella que los electrodos dejan impresa en la lámina cuando éstos sujetan las piezas de trabajo.
2. **Núcleo de soldadura o zona de fusión:** es el corte transversal del botón de soldadura que representa el material que se ha fusionado.
3. **Zona afectada por el calor ZAC:** zona alrededor del núcleo en la cual el material no se ha fusionado pero su microestructura ha sido alterada.

3.3.4 Ciclo de Soldadura

El ciclo típico de soldadura por puntos consiste generalmente de varios pasos o etapas que se describen a continuación:

Tiempo de presión (ST-Squeeze Time): es proporcionado antes de que la corriente comience a fluir y permite que los electrodos desarrollen la fuerza necesaria para sujetar las piezas de trabajo. En este punto, los contactos de soldadura son energizados y la corriente empieza a fluir.

Tiempo de soldadura (WT-Weld Time): es el tiempo total de flujo de la corriente. La corriente puede alcanzar rápidamente el nivel de la corriente de soldadura, o se puede programar una acumulación gradual de la corriente (up

slope). Para aplicaciones automotrices, este tiempo por lo general alcanza valores pequeños ciclos (1 ciclo = 1/60 seg) ó segundos.

Tiempo de sostenimiento (HT-Hold Time): cuando la corriente deja de fluir, el tiempo de sostenimiento asegura la coalescencia apropiada del punto de soldadura. En esta etapa las piezas de trabajo se encuentran sujetas y dentro de los electrodos hay un flujo de agua que permite el enfriamiento de los mismos.

Tiempo de separación (OT-Off Time): es el tiempo en el cual la fuerza de los electrodos es liberada de las piezas de trabajo. ^[14]

3.3.5 Principios de Funcionamiento

La energía calorífica se genera cuando la corriente eléctrica pasa a través de una resistencia eléctrica. La razón a la cual se genera está dada por:

$$W = I^2R \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

W = Potencia eléctrica (Watts)

I = Corriente (Amperes)

R = Resistencia (Ohms)

Si la potencia aplicada es sobre un intervalo de tiempo t (seg), el calor generado en la resistencia es:

$$Q = I^2 R t \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $Q = \text{Watts-seg o Joules}$

3.3.6 Gradiente de temperatura

La Figura 3.3-2 muestra el gradiente de temperatura de un punto de soldadura debido a las resistencias totales de los elementos involucrados en el proceso y en la Figura 3.3-3 se puede apreciar las temperaturas que normalmente se generan durante la soldadura:

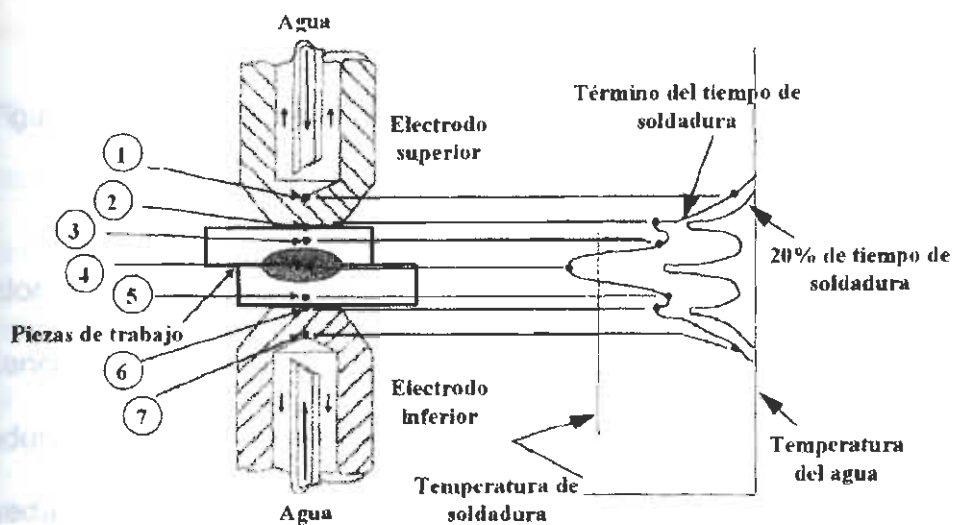


Figura 3.3-2 Gradiente de temperaturas para un punto de soldadura. ^[15]

Hay siete resistencias conectadas en serie:

1. Electrodo superior.
2. Contacto entre el electrodo superior y la lámina superior.
3. Lámina superior
4. Contacto entre las láminas superior e inferior.
5. Lámina inferior.
6. Contacto entre la lámina inferior y el electrodo inferior.
7. Electrodo inferior.

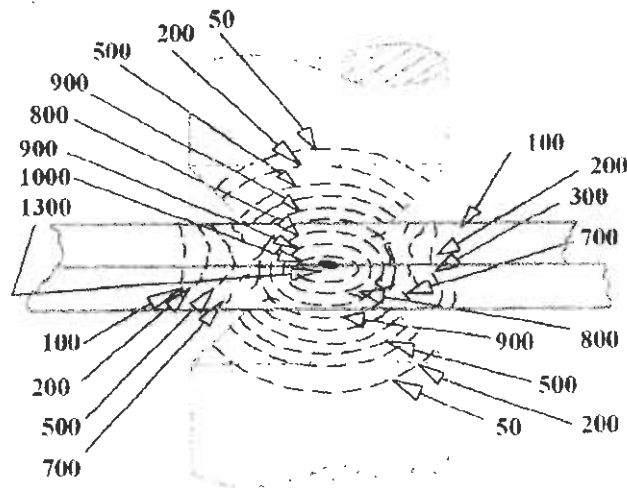


Figura 3.3-3. Temperaturas (en °C) que se generan en las piezas de trabajo y sus alrededores durante el proceso de soldadura. ^[15]

El calor se genera en cada una de éstas secciones en proporción a la resistencia de cada una. Sin embargo, se requiere que el calor para la soldadura se concentre en el punto 4 y es necesario reducir el calor lo más que se pueda en los demás puntos. Al inicio de la soldadura la temperatura en todas las partes está representada por la línea vertical de temperatura del agua. El punto con la resistencia más alta es el 4 y es aquí donde se genera rápidamente el calor. Los puntos con las resistencias más altas subsecuentes al 4 son 2 y 6, y la temperatura también se eleva en estos puntos, pero a una

menor velocidad. El calor generado en 2 y 6 se disipa rápidamente en los contactos con los electrodos 1 y 7, mientras que el calor en 4 es parcialmente atrapado y la disipación es más lenta conforme el tiempo de soldadura progresa, la velocidad de calentamiento en el punto 4 es mayor que para 2 y 6. La temperatura de soldadura está indicada con una línea punteada. ^[15]

Los electrodos usados en la soldadura por resistencia deben tener una alta conductividad eléctrica para mantener el calor interno generado al mínimo y una alta conductividad térmica para disipar el calor rápidamente de las zonas 2 y 6. También requieren de resistencia física a la deformación causada por la fuerza aplicada a éstos. ^[15]

Las superficies de contacto están definidas por las zonas 2 y 6. De nuevo, la resistencia eléctrica debe mantenerse en el mínimo, esto puede hacerse de dos maneras: teniendo una superficie de trabajo suave y limpia y controlando la fuerza del electrodo. Si las superficies están sucias, con óxidos y con huecos, la temperatura en estos puntos se elevará casi tan rápido como en las superficies en contacto, lo que resulta en la expulsión de metal, erosión del electrodo etc.

Cuando las superficies están sujetas a una baja fuerza del electrodo, el contacto metal-metal puede ser solo un pequeño porcentaje del área total de contacto superficial. Conforme la fuerza incrementa los picos de la rugosidad de la superficie son oprimidos, incrementando el contacto metal-metal real,

reduciendo de esta manera la resistencia. Este incremento en la fuerza del electrodo también disminuye la resistencia en el contacto de las superficies. ^[15]

En la práctica se supone que los dos electrodos son idénticos y que las piezas de trabajo son del mismo espesor y de material similar. Si esta relación cambia, entonces el gradiente de calor (Figura 3.3-2) ya no será simétrico. ^[15]

3.3.7 Tiempo

Debido a que el calor generado es igual al producto de la potencia por el tiempo en el que es aplicada, el tiempo en el que la corriente de soldadura existe, se convierte en uno de los factores que controlan el calor total generado.

En la Figura 3.3-2 se observa que el tiempo se mueve hacia la izquierda desde el punto de inicio (línea sólida vertical). Si el tiempo se proyecta más allá de lo que se muestra en la figura, la temperatura en la zona 4 sobrepasará el punto de fusión en áreas diminutas del material de trabajo, causando depósitos con gas. El resultado será la expulsión de partículas del material o chispas. Si los puntos 2 y 6 tienen óxidos también puede suceder lo anterior. La continua aplicación de corriente causará que los picos sean menos pronunciados, el núcleo de soldadura completará su crecimiento hacia las caras del electrodo, y las zonas 3 y 5 se volverán plásticas, produciendo una severa distorsión en las caras de los electrodos. Además, la zona afectada por el calor se desviará hacia las láminas más allá de los electrodos. En la mayoría de los casos, en un

tiempo durante este intervalo, las pérdidas por radiación serán iguales al calor de entrada, de este modo se detendrá el incremento posterior de temperatura.

De las ecuaciones (1) y (2) se demuestra que la generación de calor es proporcional al cuadrado de la corriente. De esta forma, despreciando pérdidas, al duplicar la corriente se cuadruplicará el calor desarrollado sobre cualquier período de tiempo. A una cierta prolongación, el tiempo y la corriente pueden ser complementarios, esto es, un cambio deseado de calor puede asegurarse ya sea por un cambio en el tiempo o en la corriente. La transferencia de calor es cuestión del tiempo, y en el desarrollo del tamaño adecuado del núcleo, el elemento tiempo no puede ser acortado mucho a pesar del incremento de corriente.

Los primeros efectos de la insuficiencia de tiempo se notan cuando el calor se genera demasiado rápido en los tres contactos de las superficies, lo que provoca picaduras y chispas, sobre todo en las superficies de los electrodos en contacto.

Cuando la corriente cesa, la generación de calor se detiene y las piezas de trabajo comienzan a enfriarse. Debido a la conductividad térmica de los electrodos, su enfriamiento con agua permitirá que rápidamente alcancen la temperatura de ésta. Las superficies en contacto 2 y 6 conducen calor a los electrodos, además de nivelar casi de inmediato los picos en estos puntos, entonces el centro se enfría gradualmente. La velocidad de enfriamiento se

determina por las mismas condiciones que gobiernan la cantidad de calor de entrada. Sin embargo, si los electrodos son levantados inmediatamente después de que la corriente se detiene no serán capaces de absorber el calor de la soldadura, los picos en las superficies del electrodo se incrementarán, los valles entre los picos desaparecerán y el enfriamiento será retardado. Debido a que la presión se retira mientras que la soldadura todavía está en estado plástico ó fundido, ésta puede ser de baja calidad. [15]

3.3.8 Fuerza de soldadura

Para una geometría dada del electrodo y una condición superficial de la pieza de trabajo, la resistencia de contacto es inversamente proporcional a la fuerza del electrodo. Si la cara del electrodo presenta un radio exterior, una mayor fuerza aumenta el área efectiva de contacto y reduce la densidad de corriente. Además, un incremento en la fuerza del electrodo reduce el calor generado. [15]

3.3.9 Efecto de desviación

Al efectuar una serie de puntos de soldadura, si un punto de estas se aplica cerca de otro, se presentará un efecto de desviación (shunting), el cual equivale a tener dos resistencias en paralelo. La corriente circulará a través de las dos rutas en proporción inversa a su resistencia. La acción de la primera soldadura elimina la resistencia de la interfase en ese punto y como las superficies en contacto de los electrodos son las mismas, la división de la corriente dependerá

de la resistencia de la segunda soldadura a la resistencia de la ruta de la corriente a través de la primera soldadura.

En la Figura 3.3-4 se aprecia que el metal entre los electrodos se vuelve un circuito dividido; parte de la corriente se desvía hacia A mientras que el resto circula en B. Si la distancia entre los puntos A y B es grande, entonces la resistencia de A será alta comparada con B y el efecto puede ser despreciado. Si la distancia es corta, una cantidad considerable de la corriente se desviará ^[15]

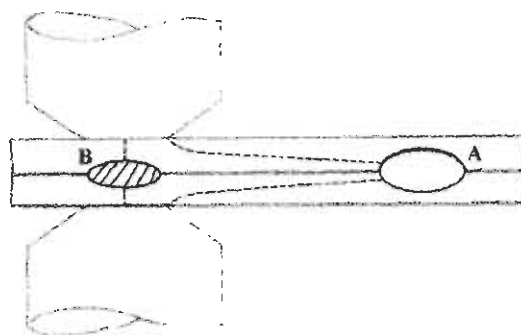


Figura 3.3-4 Efecto de desviación entre dos puntos de soldadura. ^[15]

3.3.10 Impulsos Múltiples

Cuando se sueldan láminas gruesas se usan con frecuencia impulsos múltiples. La principal ventaja de este programa se debe a que durante el tiempo de enfriamiento entre los impulsos, la alta conductividad térmica de los electrodos disipa más calor de las superficies externas de las piezas de trabajo que la que se disipa de la zona de soldadura. Esto incrementa el gradiente de temperatura entre la zona soldada y las superficies externas de la pieza de trabajo

permitiendo una mayor entrada de calor sin excesivo sobrecalentamiento de los electrodos con las áreas de contacto comparado con la soldadura con un solo impulso. ^[15]

3.3.11 Medición de Parámetros de Soldadura

Los parámetros medidos más comúnmente para asegurar el proceso adecuado de soldadura y su aceptabilidad son:

- El tiempo de soldadura, generalmente medido en ciclos.
- La corriente de soldadura que puede ser medida en amperes en el transformador de la máquina soldadora.
- La fuerza del electrodo que generalmente es medida en Lb ó Kg mediante la variación de la presión de aire del cilindro del electrodo. La fuerza se mide utilizando un manómetro o una celda de carga
- La resistencia del material, puede ser medida como la suma de las resistencias de contacto y de volumen. ^[14]

Es posible establecer un intervalo de corriente en el cual los puntos de soldadura tengan un tamaño aceptable y se obtengan en un tiempo de soldadura particular. Este intervalo se puede expandir para otros tiempos de soldadura y producir de esta forma una región o curva de soldadura en la cual el núcleo de soldadura producido sea aceptable. La figura 3.3-5 ejemplifica una curva de soldadura.

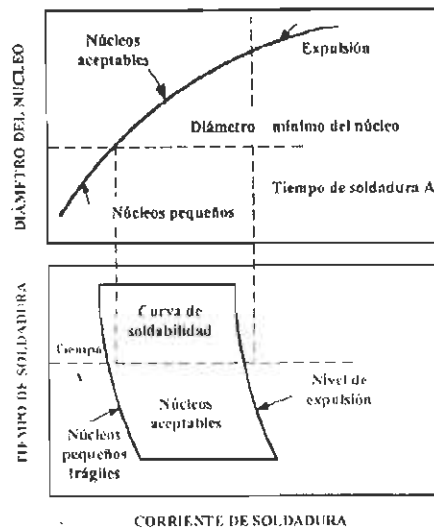


Figura 3.3-5 Representación de una curva de soldadura. ^[14]

Conforme la corriente se incrementa, el diámetro del núcleo se incrementa hasta o, en la mayoría de los casos, más allá del nivel de corriente de expulsión. Soldaduras hechas con corrientes o tiempos que exceden la curva más alta de expulsión (Figura 3.3-5) se consideran inaceptables. Así mismo las soldaduras realizadas con corrientes o tiempos debajo de la curva más baja (Figura 3.3-5) tienen núcleos de tamaño insuficiente o exhiben ruptura interfacial durante las pruebas y son también inaceptables. Solamente las soldaduras efectuadas con corrientes y tiempos que se encuentren dentro del área de la curva de soldadura serán aceptables. ^[14]

3.3.12 Equipo

Las máquinas de soldadura por puntos están compuestas por tres elementos principales:

Circuito eléctrico: que consiste en un transformador de soldadura, un interruptor de rosca y un circuito secundario.

Circuito de control: que inicia y mide la duración del flujo de corriente y regula la corriente de soldadura.

Sistema mecánico: consiste de una caja, material fijo y otros dispositivos que sostienen y sujetan la pieza de trabajo y aplican la fuerza de soldadura. ^[13]

3.3.13 Parámetros que Afectan la Soldadura

Existen varios factores que afectan la formación del punto de soldadura, sus propiedades y las características de desgaste en los electrodos. Estas variables pueden dividirse en dos clases: las relacionadas con el proceso de soldadura y las relacionadas con el acero.

Variables del proceso de soldadura

1. Material del electrodo
2. Diseño del electrodo

3. Fuerza del electrodo
4. Tiempo de soldadura
5. Corriente
6. Tiempo de sostenimiento.
7. Secuencia de soldadura/desviación.
8. Templado posterior a la soldadura.

Variables relacionadas con el acero

1. Composición química.
2. Limpieza,
3. Proceso de laminación.
4. Condición superficial.
5. Recubrimiento.
6. Espesor.

3.3.1

En general, los factores principales que afectan el intervalo y el nivel de corriente son aquéllos que:

3.3.1.1

1. Causan variaciones en la resistencia de la superficie (fuerza del electrodo, condición superficial).
2. Causan variaciones en la energía de entrada (tiempo de soldadura, corriente, desviación).
3. Promueven falla interfacial prematura del núcleo (tiempo de sostenimiento, química, proceso).

Los factores que fomentan el rápido deterioro del electrodo son aquéllos que promueven alta temperatura o esfuerzos mecánicos al electrodo (resistencia del material, diseño y fuerza del electrodo, tiempo de soldadura, corriente de soldadura) y los que promueven la aleación y fusión no homogénea del electrodo (química, condición superficial, recubrimientos).

Las propiedades mecánicas de las soldaduras pueden verse afectadas por muchos factores, entre los cuales se encuentran:

1. Geometría de la pieza, espesor de la lámina y el arreglo de los puntos de soldadura.
2. Condiciones de soldadura (tiempo de soldadura y sostenimiento, corriente de soldadura).
3. Tratamientos post-soldadura.
4. Condiciones de prueba (temperatura, velocidad, atmósfera)

3.3.14 Soldadura de Aceros Recubiertos

Los recubrimientos con contenidos de Zn, Sn o Al son muy usados en láminas de acero, principalmente para mejorar la resistencia a la corrosión. Estos recubrimientos presentan problemas al soldar las láminas. ^[14]

Las condiciones de soldadura dependen del tipo de recubrimiento. Los recubrimientos de Fe-Zn tienen una mayor resistencia superficial que los que contienen Zn puro, y por lo tanto requieren solamente de corrientes de soldadura un poco más altas que los aceros sin recubrir, de espesor equivalente. ^[16] El problema más serio es que al tener el acero un recubrimiento causa un deterioro muy rápido del mismo, el cual se manifiesta por picaduras y agrandamiento del diámetro del electrodo. Esto causa una gran reducción en la densidad de corriente resultando en una disminución en el diámetro del botón. En estos casos, solamente se pueden hacer unos cuantos de miles de puntos antes de que el electrodo requiera rectificación, comparado con los 10000 puntos que se pueden realizar en materiales sin recubrir sin que el electrodo se rectifique. ^[14]

Muchos aceros de alta resistencia tienen rangos de corriente muy reducidos. En algunos casos, esta restricción en la soldadura se debe a las fallas interfaciales de los núcleos de soldadura ^[17], lo que resulta en una zona de fusión aparentemente más pequeña. Yamanchi y Taka ^[18] han demostrado que los aceros de alta resistencia pueden ser muy susceptibles a la expulsión de material durante la soldadura, y esto se adjudica a su alta resistividad eléctrica, aunque la alta resistividad permite que se produzcan puntos de soldadura utilizando menores corrientes. ^[19]

3.3.15 Electrodo

Los materiales de los electrodos para la soldadura por resistencia eléctrica deben tener suficiente conductividad térmica y eléctrica, y baja resistencia de contacto para prevenir la incineración de la superficie de la lámina y la formación de aleación en la cara del electrodo. Además, debe tener una resistencia adecuada para soportar la deformación a las presiones y temperaturas de operación. ^[13]

Los materiales utilizados en los electrodos son por lo general aleaciones base Cu, y pueden ser reforzadas o endurecidas mediante la adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación. Las aleaciones de Cu usadas en la soldadura por resistencia eléctrica han sido clasificadas por la Resistance Welding Manufacturers Association (RWMA). ^[14]

La forma de la cara del electrodo es muy importante para tener una soldadura satisfactoria. Los electrodos de cono truncado con área de contacto plana se recomiendan para soldar aceros galvanizados. El ángulo del electrodo debe de ser de 120-140° para el mejor desempeño. El diámetro de la cara de contacto deberá ser de cuatro a cinco veces el espesor del material a ser soldado. ^[20] En la Figura 3.3-6 se muestran las diferentes geometrías de los electrodos.

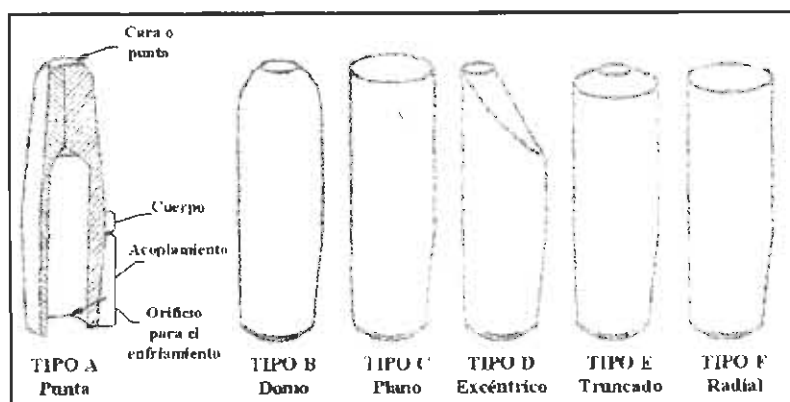


Figura 3.3-6 Geometrías de electrodos para soldadura por puntos ^[13]

3.3.16 Fuerza del electrodo

Se ha encontrado que el uso de menores presiones en los electrodos que las utilizadas normalmente para soldar aceros sin recubrimiento, resultan en diámetros de puntos más consistentes y en un alargamiento de la vida útil del electrodo. Para materiales de mayor resistencia se requiere incrementar la presión en el electrodo para asegurar que las partes que se unen estén haciendo contacto. Una presión muy baja causará expulsión prematura del Zn que puede resultar en la pérdida del Zn en la superficie, mientras que una presión alta demanda una corriente de soldadura excesiva que tenderá a reducir la vida útil del electrodo. ^[14]

3.3.17 Tiempo de Soldadura

Los tiempos de soldadura recomendados para acero galvanizado alcanzan de un 50 a un 100% más que los usados en aceros sin recubrimiento de espesores

equivalentes. Este tiempo extra es aparentemente necesario para desplazar el Zn de la zona de soldadura, antes de que se genere el calor suficiente para producir la fundición del metal. Tiempos de soldadura largos o excesivamente cortos reducen la vida del electrodo. El tiempo largo da una vida reducida debido al incremento de la duración del contacto con el recubrimiento de Zn fundido y el incremento resultante en la interdifusión Cu/Zn, además que los largos tiempos llevan a la erosión de los electrodos. Los tiempos cortos proporcionan una vida corta, debido a los ciclos severos de calentamiento/enfriamiento. ^[14]

3.3.18 Corriente de Soldadura

Debido a la disminución en la resistencia de contacto de las interfases de Zn, los requerimientos de corriente para soldar aceros galvanizados son siempre mayores que para los aceros sin recubrimiento. Este incremento en corriente puede ser de un 25 hasta un 50% más grande, además de que puede causar calentamiento elevado en el electrodo y reducir su vida. Autores como Freytag ^[21] y Green ^[22] suponen que la razón principal para las altas corrientes, es que la resistencia en la superficie de contacto del acero galvanizado es mucho más baja que para un acero laminado en frío sin recubrir. Los recubrimientos de Zn más suaves y de alta conductividad proveen un buen contacto entre los electrodos y las piezas de trabajo. Orts ^[23, 24, 25] examinó el efecto de la acumulación de Zn alrededor del núcleo en el plano de contacto y asocia la alta corriente con el desvío a través del Zn, el cual disminuye la densidad de

corriente en las superficies de contacto. Este incremento en corriente sigue fluyendo y la cara del electrodo se vuelve más caliente de lo que estaría en un acero sin recubrir. ^[14]

3.3.19 Tiempo de Sostenimiento

Se ha encontrado que cuando el tiempo de sostenimiento se mantiene en un mínimo, reduce la tendencia de la punta del electrodo a pegarse, lo cual es la principal causa del desgaste de la punta, picaduras y formación de aleaciones de Zn con el recubrimiento. Por otro lado, tiempos muy cortos y altas corrientes provocan una disminución o remoción completa del recubrimiento en la zona de soldadura, que puede convertirse en un problema de corrosión. ^[14]

3.3.20 Desviación de la corriente

Para un acero sin recubrimiento la corriente de soldadura se restringe a la ruta del estrecho contacto entre los electrodos. Cuando se unen aceros recubiertos, el recubrimiento en el plano de contacto forma una ruta de desvío, por lo tanto se requieren altas corrientes para mantener la densidad de corriente necesaria. La alta densidad de corriente eleva la temperatura del electrodo e incrementa el desgaste. Este efecto se puede observar en la Figura 3.3-7. ^[14]

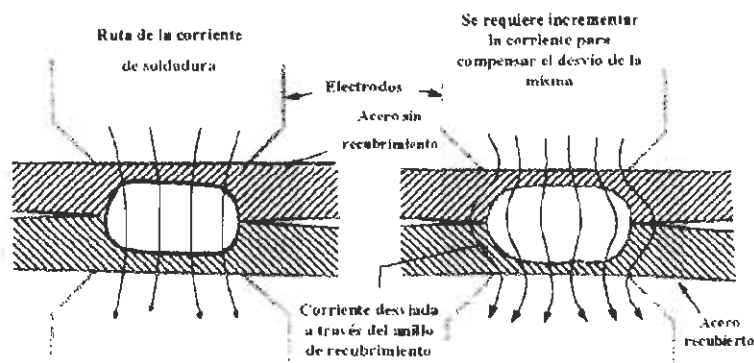


Figura 3.3-7 Comparación del efecto de desviación de corriente de soldadura en aceros recubiertos y aceros no recubiertos ^[14]

3.3.21 Enfriamiento del Electrodo

El enfriamiento del electrodo puede mejorar la vida del mismo, ya que la temperatura en las caras de estos es mayor cuando se suelda acero galvanizado que cuando el acero no es recubierto. Se reportan temperaturas de 830°C hasta 925°C para soldadura de acero galvanizado y para acero no recubierto temperaturas de 537°C hasta 648 °C. ^[14]

3.3.22 Sensibilidad al Tiempo de Sostenimiento

La sensibilidad al incremento del tiempo de sostenimiento por lo general se manifiesta por la tendencia a que se presenten fallas interfaciales en los puntos de soldadura. ^[14]

Gould, Lehman y Colmes ^[26] sugirieron que la susceptibilidad a la falla interfacial es debido a los siguientes factores: un alto estado de esfuerzos de la soldadura, la presencia de rutas preferenciales de grietas en el núcleo y una microestructura susceptible. La presencia de rutas preferenciales de grietas, como la porosidad o grietas de solidificación, podrían permitir que se inicie una grieta en la superficie de contacto y propagarse desde una porosidad o grieta hacia otra a lo largo de la superficie de contacto de la soldadura. Una microestructura con gran cantidad de martensita puede producir fractura frágil por contracción.

La martensita se puede formar en los puntos de soldadura, aún a bajos contenidos de carbono. La martensita dura facilita una ruta para que la grieta se propague. Además, velocidades de enfriamiento rápido pueden conducir a que se quede atrapada alguna porosidad hacia las orillas externas de la soldadura, donde se concentran los esfuerzos cuando se efectúan pruebas de desprendimiento. También el enfriamiento rápido se ha asociado con la tendencia a que ocurra el agrietamiento por solidificación, que puede provocar que se presente falla interfacial. Con tiempos cortos de sostenimiento puede permitírsele a la soldadura enfriarse a una velocidad más baja y así minimizar el agrietamiento.

La química del acero es un factor contribuyente a la sensibilidad. Adiciones de P, por lo general en aceros endurecidos por solución sólida, se asocian con la porosidad en el núcleo del metal solidificado. Se sabe que el C y el Mn ayudan

a la formación de martensita en el enfriamiento. El espesor del material puede alterar el modo de solidificación. Lentas velocidades de enfriamiento pueden reducir la tendencia al agrietamiento por solidificación además de reducir la formación de martensita. También tienden a cambiar de lugar porosidades lejos de la periferia del núcleo. [27]

3.3.23 Formación del Punto de Soldadura

Conforme el núcleo del punto de soldadura crece, calienta el metal circundante. Durante la producción de un punto de soldadura, el material calentado experimenta varias etapas diferentes que incluyen la expansión, recristalización, transformaciones de fase en estado sólido, deformación plástica, fundición, vaporización, solidificación y en ocasiones agrietamiento. El diagrama de la Figura 3.3-8 muestra una curva de resistencia dinámica donde se puede apreciar las diferentes etapas para la formación de los puntos de soldadura.

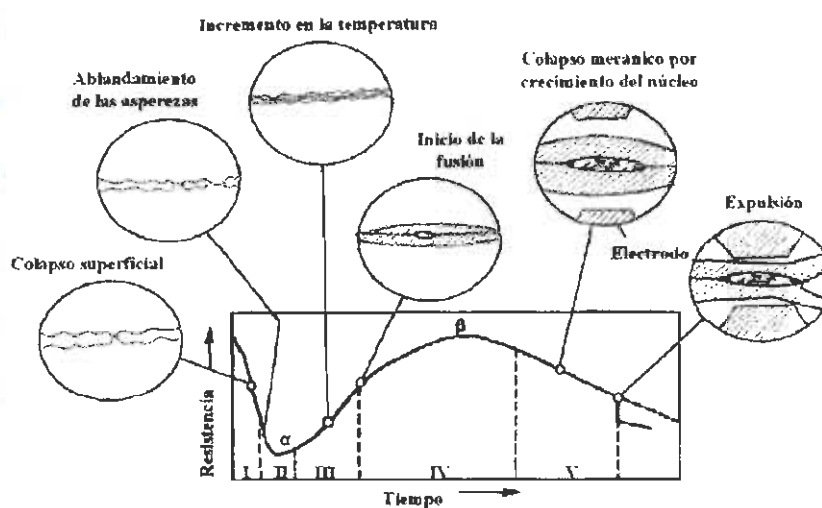


Figura 3.3-8 Curva de resistencia-tiempo en las etapas de formación del núcleo de soldadura [14]

Etapa I

Las piezas de trabajo hacen contacto debido a la fuerza de los electrodos. Esto crea áreas de contacto eléctrico en los puntos donde la rugosidad de la superficie se tocan. Se aplica el voltaje entre los electrodos, causando el flujo de la corriente en los puntos de micro contacto. La resistencia inicial es muy alta debido a las posibles impurezas presentes en la superficie, por lo tanto la generación de calor inicial se concentrará en las superficies, sobre todo en el punto de contacto entre las piezas y los electrodos, este calor causará que los contaminantes colapsen y provoquen una caída en la resistencia.

Etapa II

Después que los contaminantes colapsan, se presenta el contacto metal-metal. Sin embargo la resistencia en la superficie sigue siendo relativamente alta debido al área limitada para el flujo de la corriente, proporcionada por los contactos de la rugosidad. Conforme el calor aumenta las rugosidades se suavizan y el área de contacto se incrementa causando que la resistencia disminuya. Al mismo tiempo, el incremento en temperatura provoca que la resistividad aumente provocando un efecto opuesto. La competencia entre estos dos mecanismos determina si la resistencia se incrementa o disminuye, y entonces determina la posición del mínimo α . Eventualmente el incremento en el área de contacto será superado por el efecto del aumento en la temperatura y la resistencia total comenzará a elevarse.

Etapa III

Durante este período el aumento en la resistividad debido al incremento en temperatura domina la curva de resistencia. El término de esta etapa corresponde a la fusión local que empieza a ocurrir con el contacto de las asperezas.

Etapa IV

La compresión de las piezas de trabajo continúa con el incremento en la temperatura, causando que la resistencia y la resistividad aumenten. Pero el calor que se genera también causa derretimiento adicional que ocurre en las superficies, acrecentando el tamaño de la región derretida y el área transversal disponible para el flujo de corriente. Este mecanismo origina que la resistencia se reduzca. También la creciente suavización puede provocar un colapso mecánico, acortando el camino para el flujo de corriente y bajando la resistencia. El pico β se debe a la estabilización de la temperatura, mientras que el crecimiento del núcleo y el colapso mecánico empiezan a dominar y de esta manera la resistencia comienza a aminorarse.

Etapa V

Más allá del pico β , el crecimiento del núcleo líquido y el colapso mecánico continúan. Si el núcleo crece a un tamaño tal que no puede ser contenido por el metal sólido circundante bajo la compresión de los electrodos puede ocurrir la expulsión. ^[14]

3.3.24 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de un punto de soldadura dependen principalmente de las siguientes características:

- El tamaño y dureza del núcleo de soldadura.
- La profundidad de la indentación del electrodo en la superficie de la soldadura, lo que ocasiona el adelgazamiento del núcleo.
- La microestructura de la zona afectada por el calor ZAC, la cual domina su resistencia y ductilidad.

Sin embargo, la resistencia de un punto de soldadura es competitiva en naturaleza, entre la capacidad de resistir la carga del núcleo y la de la ZAC. Para alcanzar una resistencia máxima, el punto de soldadura debe tener un tamaño de núcleo suficiente para proporcionar mayor resistencia a la fractura comparada con la de la zona afectada por el calor. Existen posibilidades de formar martensita revenida en la región externa del ZAC, ésta martensita puede debilitar la región. El incremento en la energía de entrada provoca la formación de la ferrita acicular gruesa que puede formarse en la soldadura y de esta forma debilita la región. ^[28]

3.3.25 Defectos en la Soldadura.

Los tipos de defectos o discontinuidades que pueden encontrarse en la soldadura por resistencia son los siguientes:

Porosidades.- Discontinuidad tipo cavidad que se forma por gas atrapado durante la solidificación. La porosidad por lo general es encontrada en la línea central del núcleo de fusión. Puede ser causada por el sobre calentamiento, presión inapropiada, liberación prematura de la presión o aplicación tardía de presión.

Falta de fusión.- Condición donde la fusión no se completa. Se manifiesta como una cavidad en la línea central del núcleo. Es causada por las mismas condiciones que las porosidades.

Falta de penetración.- Condición en la cual la penetración en la unión es menor que la especificada.

Huecos por contracción.- Discontinuidad tipo cavidad que se forma normalmente por la contracción durante la solidificación.

Grietas.- Discontinuidad que se caracteriza por una punta afilada y una alta razón de longitud/ancho, al desplazamiento de apertura. Las grietas pueden ser inducidas por sobrecalentamiento, por retirar la presión antes de que el enfriamiento de la soldadura sea completado, carga inapropiada, traslape de unión pobre o la expulsión del exceso de metal de la soldadura.

Figuras.- Pequeñas discontinuidades parecidas a las grietas con solo una diminuta separación (desplazamiento de apertura) de la superficie fracturada. La apariencia de la soldadura en la superficie debe ser uniforme en la forma y relativamente lisa, además debe estar libre de fusión superficial, indentaciones profundas de los electrodos, incrustaciones del electrodo, agujeros, grietas, separación entre láminas y coloración anormal alrededor de la soldadura. Sin embargo, la apariencia superficial no siempre es un buen indicador de la calidad de la soldadura, ya que la desviación de corriente y causas de insuficiente calentamiento o penetración incompleta, no dejan efectos visibles en la pieza de trabajo. ^[13]

3.3.26 Efectos de los Elementos de Aleación

Azufre (S)

Debe mantenerse debajo de 0.035% y no sobrepasar 0.05%, arriba de esta cantidad el metal tiende a exhibir fragilidad en caliente, lo que ocasiona grietas en la soldadura y en la zona afectada por el calor, debido a que no tiene la suficiente resistencia a altas temperaturas para soportar los esfuerzos a los que se somete durante el enfriamiento.

Carbono (C)

Si la concentración de C no excede del 0.2%, virtualmente no tiene efecto en la soldadura. El incremento del contenido de C promueve la formación de productos de transformación de bajas temperaturas.

Cobalto (Co)

Las aleaciones con Co son soldables, pero debido a su alta tenacidad y resistencia requieren de grandes presiones de los electrodos en la soldadura.

Cromo (Cr)

Utilizado para incrementar resistencia a la abrasión, desgaste y corrosión, además de endurecer el acero y sus efectos en la soldadura son iguales a los del Ni.

Fósforo (P)

Se considera una impureza y no tiene un efecto benéfico en la soldadura, por lo que su concentración se debe mantener lo más bajo posible. Por encima de 0.04% tiende a hacer las soldaduras frágiles y causa grietas.

Manganeso (Mn)

En concentraciones hasta 1% no tiene efecto en la soldadura, del 1-2% afecta de tal modo que las variables del proceso deben tener un mejor control, por encima del 2% todavía es soldable, pero se deben elaborar programas de soldadura y tratamientos térmicos.

Molibdeno (Mo)

Como en el caso del Ni, para soldar se requieren elevadas fuerzas de soldadura, debido a que el Mo proporciona endurecimiento al acero.

Níquel (Ni)

Tiene mínimo efecto en las operaciones de soldadura por resistencia, ya que es soldable en todas las concentraciones. Debido a que la adición de este elemento aumenta la dureza o tenacidad de una aleación, por consecuencia las presiones de soldadura deben incrementarse.

Silicio (Si)

Hasta 0.35% no causa efecto alguno, cuando se usa en más altos porcentajes (1-3%) no es soldable [13,15].

3.3.27 Especificaciones de Calidad

Existen diferentes tipos de especificaciones de calidad para soldadura de puntos por resistencia eléctrica en la literatura, los cuales son:

1. **Práctica recomendada.**- Han sido establecidos para la soldadura de aceros por la American Welding Society (AWS) [29] y la Resistance Welding Manufacturer's Association (RWMA) [30, 31]. En la práctica recomendada se establecen parámetros de soldadura recomendados para aceros de bajo carbono, los cuales varían con los espesores de las partes que se van a soldar.
2. **Proceso de estándar.**- Es utilizado para asegurar la calidad de la producción en línea de soldadura por puntos.
3. **Procedimiento de calidad del punto de soldadura.**- Se usa para valorar la soldadura de un material para inclusión o exclusión de éste de una lista de proveedores calificados de un material particular. Estos procesos son utilizados por las principales compañías automotrices como Ford, General Motors ^[32], Chrysler ^[33], Nissan Toyota, Honda etc. para calificar a los proveedores de material. ^[14]

3.4 Soldabilidad de los Aceros Avanzados AHSS

La soldadura es un proceso metalúrgico complejo que incluye fusión, solidificación, fenómenos superficiales y reacciones entre el metal base y los materiales de aporte y gases de protección utilizados. Estas reacciones ocurren mayormente en procesos de soldadura que en procesos de fundición de metales ó tratamientos térmicos, por esta razón es indispensable tener un buen entendimiento de las variables que afectan al proceso para obtener los resultados esperados.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas y químicas de los metales a unir y de los materiales de aporte que se van a utilizar además de la utilización a la que estará destinada la pieza, del medio ambiente en el que estará en servicio y de las instalaciones disponibles.

Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia pueden ser soldados satisfactoriamente para aplicaciones automotrices. Estos aceros difieren de los aceros convencionales por su composición química y microestructura. Al momento de ser soldados, sufrirán un cambio en la microestructura. El alto calor de entrada, provocara un mayor efecto sobre la microestructura. En el enfriamiento rápido, existirá la formación de diferentes fases como ferritas, martensitas y/o bainitas en el metal soldado y en la zona afectada por el calor.

En los aceros avanzados AHSS la alta resistencia es lograda por la modificación de su microestructura. En la figura 3.4-1 se presentan la capacidad de carga en algunos tipos de aceros avanzados AHSS

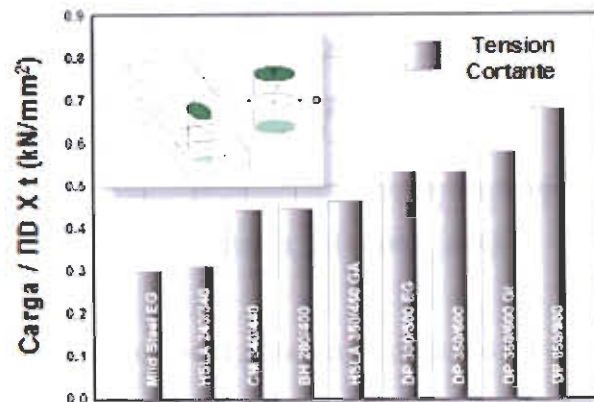


Figure 3.4-1 Cargas en soldaduras de puntos en distintos tipos de aceros ^[34]

La microestructura original se modifica mientras se realiza el proceso de soldadura. Entre mayor sea la entrada de calor mayor es el efecto en la modificación de la microestructura. Entre mas rápido sea el enfriamiento se obtendrán estructuras martensíticas y/o bainíticas en la soldadura y la zona afectada por el calor, las cuales modificaran las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la unión soldada. En la figura 3.4-2 y 3.4-3 se presenta la variación de microdureza.

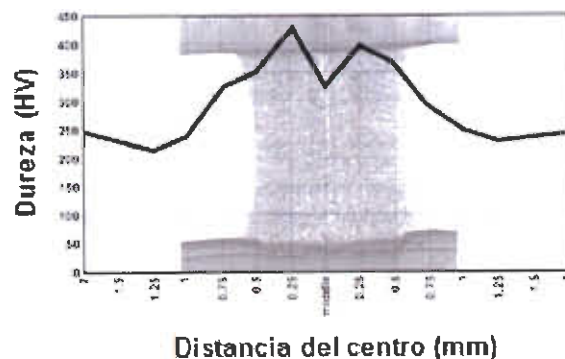


Figure 3.4-2 Dureza en Soldaduras HF de Aceros DP 280/600 ^[34]

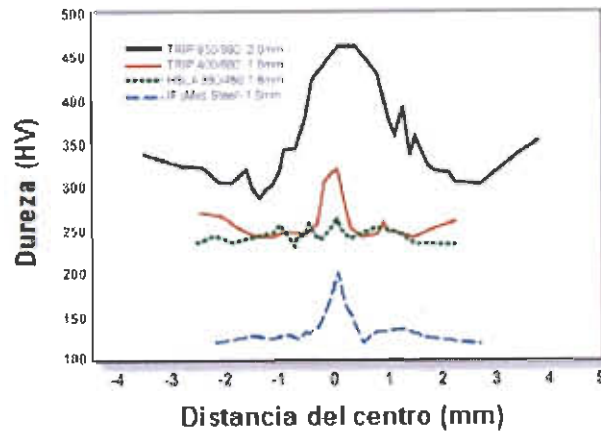


Figura 3.4-3 Variaciones de dureza en soldaduras de varios tipos de aceros ^[34]

Cuando se unen aceros AHSS, el control de los parámetros de soldadura es la parte más importante para una unión de soldadura satisfactoria. En la figura 3.4-4 se muestran algunos ejemplos de programas óptimos de parámetros de soldadura para aceros avanzados AHSS

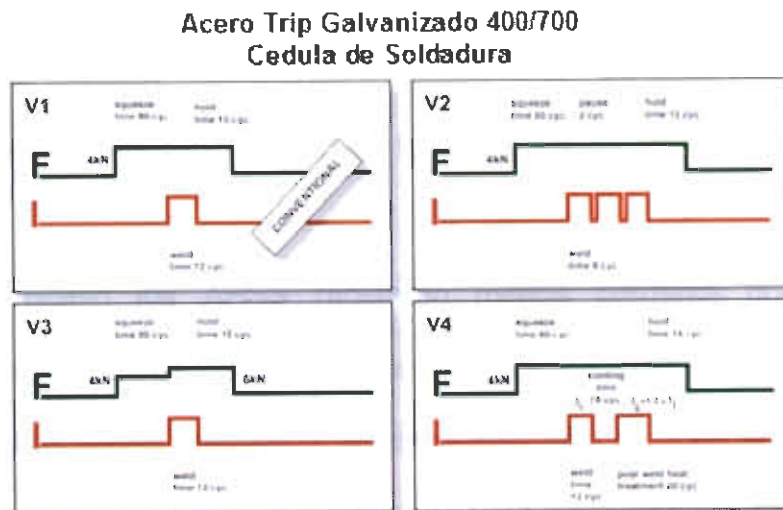


Figure 3.4-4 Cedula de soldadura optimas para aceros AHSS ^[34]

3.5 Soldadura de Puntos por Resistencia Eléctrica para Aceros AHSS

Si cualquier tipo de AHSS se utiliza por primera vez, el usuario deberá considerar los mismos parámetros que aplica para la soldadura de aceros suaves, considerando lo siguiente:

- Incrementar la fuerza del electrodo por un 20% o más, dependiendo de su esfuerzo de cedencia.
- Incrementar el tiempo de soldadura cuando sea apropiado.

Si estos cambios son insuficientes, entonces se trata con los siguientes cambios adicionales:

- Tratar con soldadura multi-pulso (algunos pulsos o post-calentamiento).
- Utilizar diámetro más grande o cambiar el tipo de electrodo.
- Aumentar el tamaño mínimo de la soldadura.

En este proceso los AHSS requieren menos corriente que los aceros convencionales, aceros de alta resistencia baja aleación y aceros suaves, ya que los AHSS tienen resistencia eléctrica mas alta.^[35,36] En la figura 3.5-1 se muestra la variación en corriente requerida para distintos tipos de aceros. Por lo tanto, los niveles de corriente para AHSS no se aumentan y se pueden incluso reducir dependiendo de la composición química material. Sin embargo, AHSS

puede requerir fuerzas más altas del electrodo para el mismo espesor de los aceros convencionales porque la fuerza del electrodo depende de la resistencia del material. [14,17]

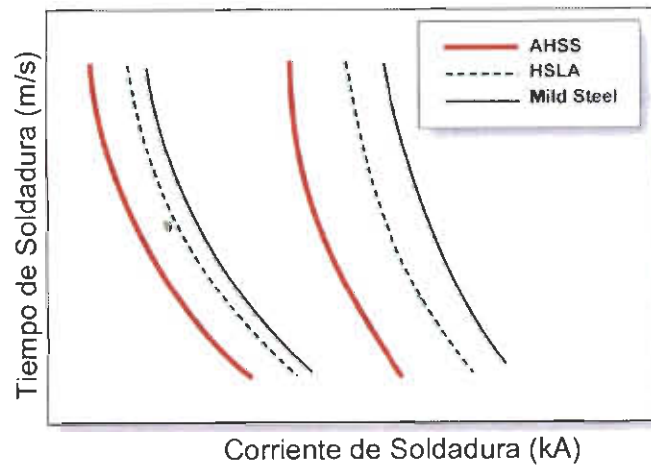


Figura 3.5-1 Grafica donde se muestra que los AHSS requieren menor corriente que los Aceros suaves y aceros de alta resistencia baja aleación. [34]

3.5.1 Balance de Calor

El calor de entrada es definido por:

$$Q = I^2Rt$$

Donde: Q = Calor de entrada

I = Corriente de soldadura

R = Resistencia interfacial entre laminas

T = tiempo de soldadura

El calor de entrada tiene que ser cambiado dependiendo del espesor y grado del acero. Comparando un acero de bajo esfuerzo de un espesor en particular, con un acero AHSS del mismo espesor necesitará menos corriente.

Semejantemente, el material de espesor menor necesita menos corriente que el de calibre grueso. Controlando el calor de entrada según el espesor y el grado se llama balance de calor en la soldadura de puntos por resistencia.

Para espesores constantes, la tabla 3.5-1 muestra la clasificación de los aceros basada en el nivel de esfuerzo. Con el aumento de números de grupo se requieren una fuerza más alta del electrodo, un tiempo más largo de la soldadura y una corriente más baja para la soldadura de puntos satisfactorios. Las combinaciones de materiales con un grupo diferente se pueden soldar con poco o nada de cambios en parámetros. La diferencia de dos o tres grupos puede requerir consideraciones especiales en términos del tamaño de electrodo, fuerza o tipo de fuente de poder.

Tabla 3.5-1 Clasificación de los aceros para soldadura de puntos de resistencia ^[36]

Grupo	Esfuerzo mínimo de Tensión	Producto
1	< 350 Mpa	Suave 140 -270
		BH 180/300
		BH 210/320
		BH 240/340
2	350 - 500 Mpa	BH 260/370
		HSLA 280/350
		HSLA 350/450
		DP 300/500
3	> 500 - 800 Mpa	DP 350/600
		TRIP 350/600
		DP 500/800
		TRIP 500/800
		CP 700/800
4	> 800 Mpa	DP700/1000
		MS 950/1200
		MS 1150/1400
		MS 1250/1520
		HF 950/1300

3.5.2 Modo de Transferencia de Energía de Soldadura

Los AHSS se pueden soldar con ambos modos, CA y CD. La corriente directa de media frecuencia (MFDC) tiene una ventaja sobre la corriente alterna convencional, debido a la corriente unidireccional y continua. El modo de corriente no tiene ninguna diferencia significativa en la calidad de la soldadura. La CA y la CD pueden producir fácilmente soldaduras aceptables. También se ha observado que los tamaños del punto son estadísticamente más grandes al usar la soldadura de CD, con los mismos parámetros secundarios de soldadura. Algunos estudios han demostrado que el soldar con MFDC corriente directa media frecuencia proporciona mejoras en el balance de calor y tamaño del botón de soldadura. En la figura 3.5-2 se muestra el efecto de los diversos modos de corriente en el tamaño del botón.

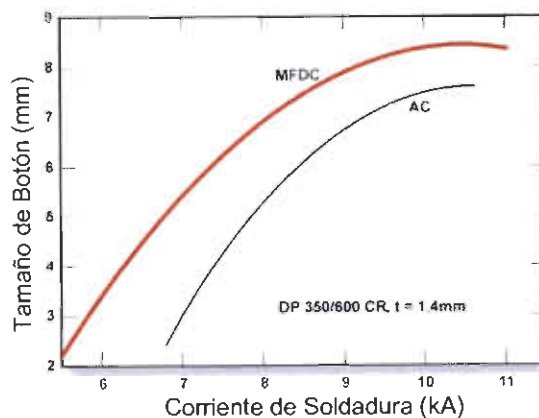


Figura 3.5-2 Rangos para 1.4 milímetros de acero laminado en frío del DP 350/600 en diversos modos de corriente con pulso simple. ^[36]

3.5.3 Geometría del Electrodo

Aunque hay diferencias en proceso de soldadura dependiendo del material y forma del electrodo (cono truncado y domo), los aceros AHSS se pueden soldar con todo tipo de formas. La forma de domo del electrodo asegura los botones incluso en corrientes más bajas debido a densidades de corrientes más altas en el centro del domo (figura 3.5-3). La curva de electrodos en forma de domo ayudará a disminuir el efecto del desalineamiento del electrodo. Sin embargo, estos tienen menos vida en los aceros recubiertos debido a los bordes redondos, pero tendrán pocas tendencias a tener grietas superficiales en comparación con el electrodo truncado. [6,14]

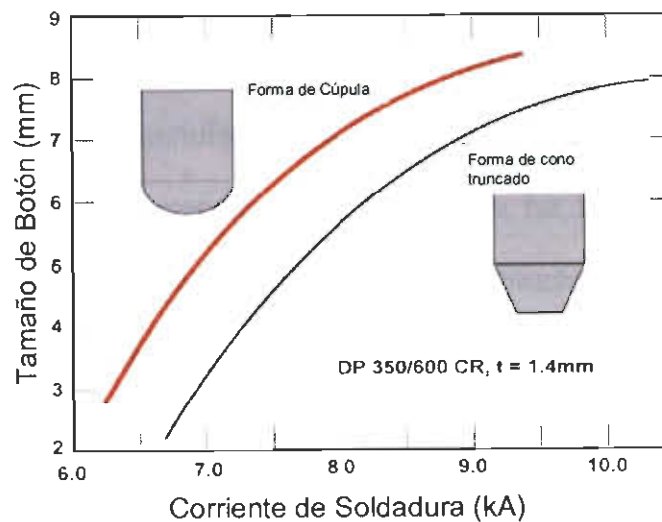


Figura 3.5-3 Efecto de geometría del electrodo usando Corriente Alterna y pulso simple. [36]

3.6 Optimización de Procesos de Soldadura

En la actualidad las empresas se están apoyando en nuevas tecnologías o métodos numéricos para mejorar los procesos, algunos de estos métodos son los sistemas inteligentes y métodos estadísticos. Existen diferentes técnicas en sistemas inteligentes para mejorar, optimizar, pronosticar y predecir procesos industriales, una de estas técnicas son las redes neuronales, dentro de estas redes existen diferentes tipos, como la red Retropropagación; en cuanto a las técnicas estadísticas existen métodos como Diseño de Experimentos, Regresiones múltiples etc. Son algunas de las herramientas más utilizadas para modelar y mejorar procesos. Últimamente el ciclo de vida de los productos han sido reducidos, y la variabilidad de modelos en los productos se han incrementado, reduciendo la cantidad de lotes de producción al introducir nuevos procesos de manufactura y materiales avanzados. Los procesos de soldadura no son la excepción, por lo que se ha buscado el desarrollo de metodologías para ajustarlos, sin embargo en muchos de los casos el ajuste basado en prueba y error sigue siendo la práctica más común. ^[37]

En el proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW los parámetros de soldadura más comúnmente controlados son la presión, corriente y tiempo, estos parámetros regulan la calidad del punto de soldadura, por lo tanto la combinación correcta de ellos proporcionara un valor adecuado para una característica de calidad requerida. El presente trabajado muestra la metodología de redes neuronales para predecir el conjunto de soluciones

óptimas graficando una superficie de respuesta RSM que puede proporcionar los valores óptimos de Presión, Corriente, y Tiempo para la obtención de los valores requeridos de diámetro de punto de soldadura, y resistencia al esfuerzo cortante de la unión.

3.6.1 Modelo de Redes Neuronales

Una Red Neuronal es un sistema compuesto por un número de elementos agrupados en capas que se encuentran relacionados o interconectados. La interconexión es hecha por una sinapsis artificial llamada peso. El ajuste de estos pesos altera el desempeño de la red neuronal. Las redes neuronales tiene la capacidad de aproximarse a funciones utilizando una gran cantidad de información proveniente tanto de datos experimentales como históricos. (Freeman, 1993; Haykin, 1999; Yen, 2000). ^[38,39,40]

Una red neuronal, esta compuesta por un vector de n entradas $[(X_p = x_{p1}, x_{p2} \dots, x_{pN})^t]$, con los cuales la red trabajará, tienen una estructura de pesos sinápticos (w_{ji}^h) que son utilizados para aumentar o disminuir los valores de entrada. Se componen también de un umbral o bias (θ^h) , los cuales se aplican para reducir la entrada a la función de activación. Otro componente de una red es el operador matemático suma, donde se hace la operación de suma de los componentes de las señales de entrada multiplicados por sus respectivos pesos. Por ultimo existe la función de activación o transferencia (i_{pj}) , donde se

define la salida de la neurona (net_{pk}^o, o_{pk}). Para el proceso de aprendizaje su funcionamiento es conocido como algoritmo de aprendizaje, su objetivo es modificar los pesos con el propósito de minimizar la función. ^[41,42] Figura 3.6-1

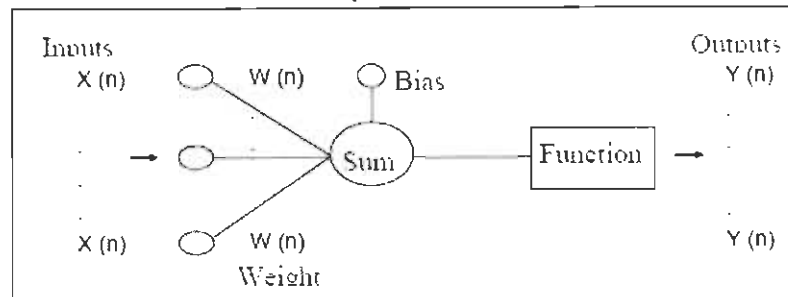


Figura 3.6-1 Estructura de una Red neuronal ^[41]

$$net_{pj}^h = \sum_{i=1}^N w_{ji}^h X_{pi} - \theta_j^h \quad (1)$$

$$i_{pj} = f_j^h(net_{pj}^h) \quad (2)$$

$$net_{pk}^o = \sum_{j=1}^L w_{kj}^o i_{pj} - \theta_k^o \quad (3)$$

$$o_{pk} = f_k^o(net_{pk}^o) \quad (4)$$

Las redes multicapas son entrenadas habitualmente con el algoritmo de aprendizaje denominado Retropropagación (Backpropagation), uno de los algoritmos con más importancia histórica en el desarrollo de las redes neuronales, el cual se muestra en la figura 3.6-1. Las redes neuronales asociadas a este algoritmo se definen como redes Retropropagación. ^[43] Este algoritmo es una derivación del algoritmo de mínimos cuadrados. Los pesos son sucesivamente ajustados en una dirección opuesta al vector gradiente. A esto se le llama algoritmo de descenso acelerado, y es formalmente descrito por:

$$W \leftarrow W - \eta G \quad (5)$$

Donde G es el vector gradiente y η el parámetro de aprendizaje. Se pueden considerar dos casos para el cálculo del vector gradiente y posterior ajuste de los pesos. Usualmente hay una capa interna y una capa de salida en la red multicapa Perceptron. Las neuronas de la capa de salida calculan el gradiente local de la siguiente manera.

$$\delta_n = eFA'(\sum_{i=1}^I W_{ni}X_i) \text{ Where } e = d - O_n \quad (6)$$

Las neuronas de la capa interna calculan el gradiente local de la siguiente manera:

$$\delta_n = eFA'(\sum_{i=1}^I W_{ni}X_i) \sum_k \delta_k W_{kn} \quad (7)$$

Donde k representa todas las neuronas de la siguiente capa conectada a la neurona n , el ajuste de los pesos esta dada por:

$$W_{ni} \leftarrow W_{ni} + \alpha(Wa_{ni}) + \eta \delta_n X_{ni} \quad (8)$$

Donde Wa es el último valor del peso. Se realizan ajustes usando un *momentum* α . Este parámetro y el rango de aprendizaje deben ser definidos antes del procedimiento de entrenamiento. La arquitectura esta determinada por el número de neuronas de entradas y salida; sin embargo es necesario establecer el número de la capa interna. La generación de un modelo de redes neuronales involucra cuatro etapas.

Etapa 1: Arquitectura (Número de neuronas entrada - interna - salida) y definición de parámetros.

Etapa 2: Generación y validación de datos experimentales mediante el uso de un diseño de experimentos apropiado.

Etapa 3: Entrenamiento de la red neuronal para generar un modelo.

Etapa 4: Validación del modelo utilizando datos experimentales no utilizados en el procedimiento de entrenamiento.

Algunas consideraciones prácticas deben de tomarse en cuenta, los pesos iniciales son aleatorios. Los ajustes del parámetro de aprendizaje y el parámetro del *momentum* es crucial en el aprendizaje. Es recomendable diseñar un experimento para encontrar el ajuste apropiado. Las mismas consideraciones deben tomarse con el número de neuronas en la capa interna. ^[38]

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la realización del proyecto de investigación se utilizó un acero especificación GMW 3399M-ST-S CR 900T/700Y MS tipo martensítico de 900 MPa mínimo, de esfuerzo de tensión y 700 Mpa de esfuerzo de cedencia mínimo con un espesor de 1.5 mm , utilizado actualmente en la manufactura para partes estructurales de carrocerías de automóviles ^[44]. A continuación se muestran las propiedades mecánicas de este material.

Análisis Químico

%C	%S	%Mn	%P	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%V	%Nb	%Ti
0.08	0.005	0.54	0.009	0.02	0.01	0.04	0.02	0.012	0.004	0.002	0.037

Propiedades Mecánicas

Carga Máxima Kgf	Esfuerzo Máximo MPa	Esfuerzo de Cedencia MPa	Dureza Promedio HRc
994	1030	917	32

4.1 Determinación de Variables

De acuerdo con el análisis del estado del arte para el proceso de soldadura de puntos por resistencia eléctrica en aceros, las principales variables de proceso a ser consideradas en la experimentación son:

- Presión (Libras, Kilogramos, Bar.)
- Corriente (Amperes)
- Tiempo (Milisegundos, Ciclos)

4.2 Diseño de Experimentos

Las principales variables de proceso consideradas en la experimentación son: corriente (C) y tiempo (T). La presión (P) se mantuvo constante tal y como se usa en el proceso actual de soldadura. Para evaluar cómo las variables seleccionadas afectan la soldabilidad de los aceros avanzados AHSS tipo martensíticos, y qué interacción existe entre éstas y las características de la unión soldada, como lo son sus propiedades mecánicas y microestructurales debido al calor de entrada (Q) aplicado, se utilizó el siguiente diseño de experimentos. El cual se muestra en la Tabla 4.2-1

- Diseño: 3^2
- Niveles: 3 (-1, 0 +1) Bajo, Nominal ,Alto
- Factores: 2 (Corriente **A**, Tiempo **t**)
- Presión: Constante
- Replicas: 2 por probeta (P1a y P1b, T1a y T1b)

Tabla 4.2-1 Diseño Experimental

Parametros de Control de Proceso					
Parametro	Unidad	Notacion	Lmites		
			Bajo	Nominal	Alto
Presion	Libras	P	-1	0	1
Corriente	Amperes	C	670	670	670
Tiempo	Ciclos	T	8000	9500	12000
			12	18	24

Diseño de Experimentos DOE							
Probeta No.	ENTRADA			SALIDA			
	Matriz	Diametro Punto	Tension Esfuerzo Cortante	Microdureza	Calor Entrada KJ	Q=i ² Rt	
	P	C	T	(mm)	(Kg/mm ²)	(HV 500)	
1	670	8000	12	P1	T1	P1	1664
2	670	8000	18	P2	T2	P2	2496
3	670	8000	24	P3	T3	P3	3328
4	670	9500	12	P4	T4	P4	2340
5	670	9500	18	P5	T1	P5	3519
6	670	9500	24	P6	T2	P6	4893
7	670	12000	12	P7	T3	P7	3744
8	670	12000	18	P8	T4	P8	5616
9	670	12000	24	P9	T1	P9	7488

4.3 Elaboración de Probetas de Soldadura

En la elaboración de las probetas de soldadura se uso como práctica recomendada el documento de la AWS D8.9 "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials" ^[45]. Por lo tanto, se elaboraron 2 tipos de probetas:

- 1.- Probetas para prueba de desprendimiento (D), microdureza y metalografía (M) probetas P1a y P1b hasta P9a y P9b.

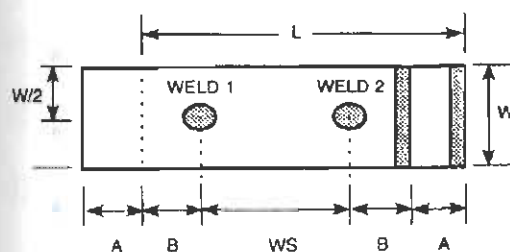


Figura 4.3-1 Probeta para prueba de desprendimiento ^[45]

2.- Probetas para prueba de tensión a esfuerzo cortante T1a y T1b hasta T9a y T9b.

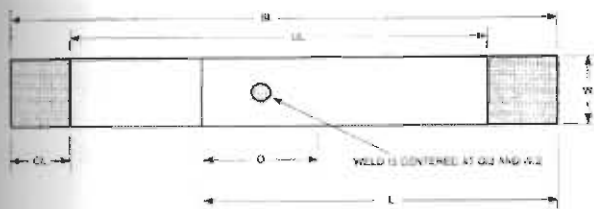


Figura 4.3-2 Probeta para prueba de tensión a esfuerzo cortante ^[45]

En la tabla 4.3-1 se muestran los parámetros de soldadura con los que se trabajó en la prueba experimental.

Tabla 4.3-1 Parámetros de Soldadura

PARAMETRO	VALOR / RANGO
Presión	670 Lb
Tiempo Soldadura	12,18, 24 Ciclos
Tiempo Sostenimiento	5 ciclos
Tiempo presión	99 ciclos
Tiempo Separación	24 ciclos
Corriente de Soldadura	8000, 9500, 12000 Amperes
Tamaño Punta de Electrodo	6.4 mm
Geometría Electrodo	Domo Cr-Cu Clase II
Flujo Agua Refrigerante	3.8 L/min.
Temperatura agua	18 – 20 °C

Las probetas de soldadura fueron realizadas con el siguiente equipo:

- Resistance Automotive Portable Gun ARO
- Control panel (Tiempo, Corriente) MEDAR
- Presión de soldadura válvulas de control (presión)
- Electrodo Clase 2 Cu-Cr

En la figura 4.3-3 se muestra el equipo utilizado para la elaboración de las soldaduras en las muestras del material



Figura 4.3-3 Equipo de Soldadura de puntos Utilizado

4.4 Realización de Pruebas de Soldadura

Para la realización de las pruebas de soldadura requeridas se tomo como practica recomendada lo indicado en el documento de la AWS D8.9 "Recomended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials". [45]

Las pruebas realizadas a las probetas de soldadura fueron:

- a) Desprendimiento (Tear Down)
- b) Tensión a esfuerzo cortante (Shear tensión Test)
- c) Microdureza
- d) Metalografía

4.4.1 Prueba de Desprendimiento

Este ensayo consiste en sujetar las láminas unidas por el punto de soldadura y mediante la sujeción con pinzas de la otra lamina unida, separar las láminas desprendiendo el punto de soldadura que las une. Ver figura 4.4-1



Figura 4.4-1 Prueba de Desprendimiento (Peel Test)

El objetivo de la prueba de desprendimiento es determinar el diámetro del punto de soldadura de soldadura y la evidencia de fusión en las laminas soldadas, esto se verifica midiendo con un vernier el punto de soldadura que queda unido en una de las laminas y visualmente evidenciando la fusión del punto de soldadura remanente en la lamina. Ver figura 4.4-2

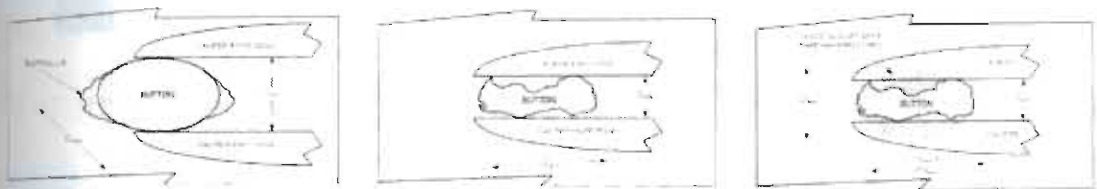


Figura 4.4-2 Técnica para la medición del diámetro del punto de soldadura. [45]

Otra de las características de calidad importante a ser considerada durante la evaluación de los puntos de soldadura, es la profundidad de indentación, la cual

se define como la depresión que dejan los electrodos en la superficie de la lamina hasta la base del punto de soldadura, debido a la cantidad de presión, tiempo de soldadura y corriente aplicada, mediante la medición de la profundidad de la depresión.

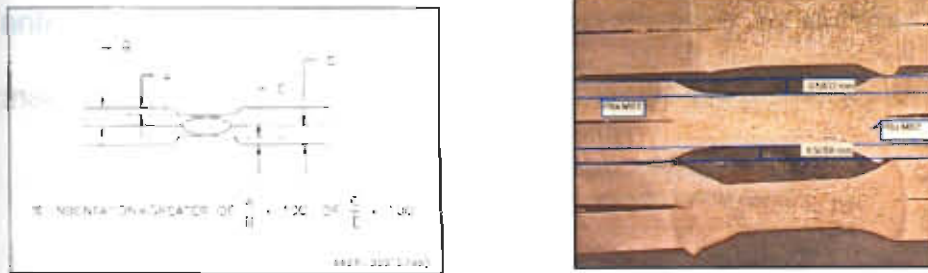


Figura 4.4-3 Medición de la profundidad de Indentacion del punto de soldadura [32]

4.4.2 Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante

Este ensayo consiste en someter las láminas unidas por el punto de soldadura a una prueba de tensión, en una maquina universal de pruebas mecánicas y registrar la carga máxima aplicada hasta el desprendimiento del punto de soldadura por esfuerzo cortante. Ver figura 4.4-4

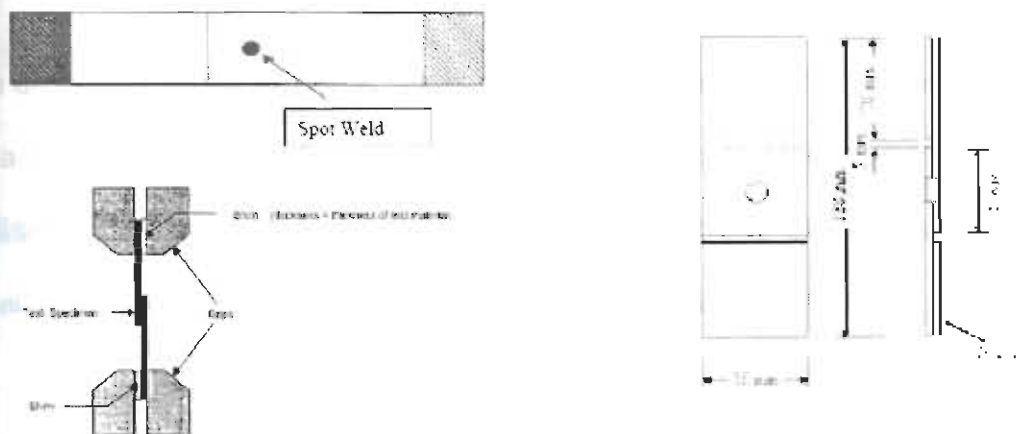


Figura 4.4-4 Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante. [45]

4.4.3 Prueba de Microdureza

Este ensayo consiste en cortar por el centro del punto de soldadura una sección de la probeta y realizar la preparación metalográfica correspondiente y mediante un microdurometro Vickers obtener un perfil de durezas en forma diagonal a intervalos de 0.4 mm o menor. Ver figura 4.4-5

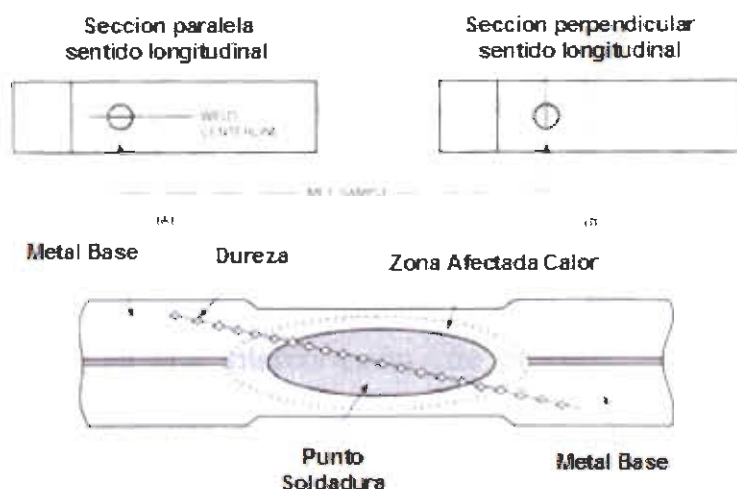


Figura 4.4-5 Prueba de Microdureza ⁽⁴⁵⁾

4.4.4 Análisis Metalográfico

Este ensayo consiste en cortar por el centro del punto de soldadura una sección de la probeta y realizar la preparación metalográfica correspondiente para el análisis de la variación de la microestructura en el metal base, zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura (botón de soldadura). Ver figura 4.4-6

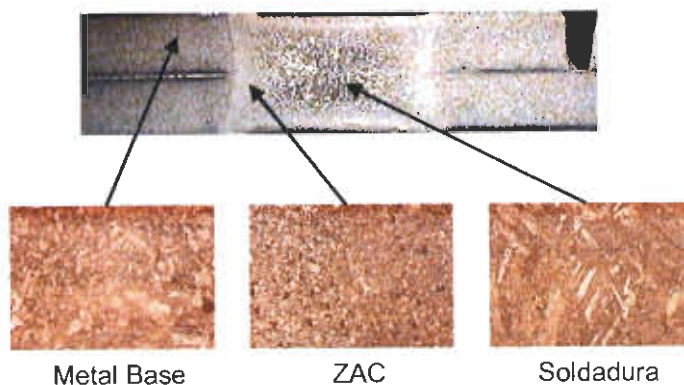


Figura 4.4-6 Prueba Metalografía

4.4.5 Modelo de Redes Neuronales

Una red neuronal es una interconexión de procesamiento de elementos o neuronas artificiales; el uso principal de este paradigma es la aproximación de funciones usando datos experimentales. El comportamiento de la red neuronal esta establecido por la conexión de sus pesos. La regla de aprendizaje ajusta los pesos para minimizar el error entre la respuesta deseada y la respuesta de la red neuronal. Las respuestas son expresadas en una base de datos con un patrón de pares de entradas - salidas. La respuesta del procesamiento de elementos es:

$$O_n = F_A \left(\sum_{i=1}^N W_{ni} X_i \right) \quad (1)$$

$$F_A(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

Donde n es una neurona artificial e i es el correspondiente elemento del vector X . La matriz W representa la conexión de pesos entre los elementos del vector X y el elemento neuronal. La función de activación F_A regula la salida de la neurona.

En este trabajo se utilizó un red neuronal con tres entradas Presión, Corriente y Tiempo y dos salidas Diámetro de punto de soldadura y Resistencia al esfuerzo cortante tal como se muestra en la Figura 4.4-7.

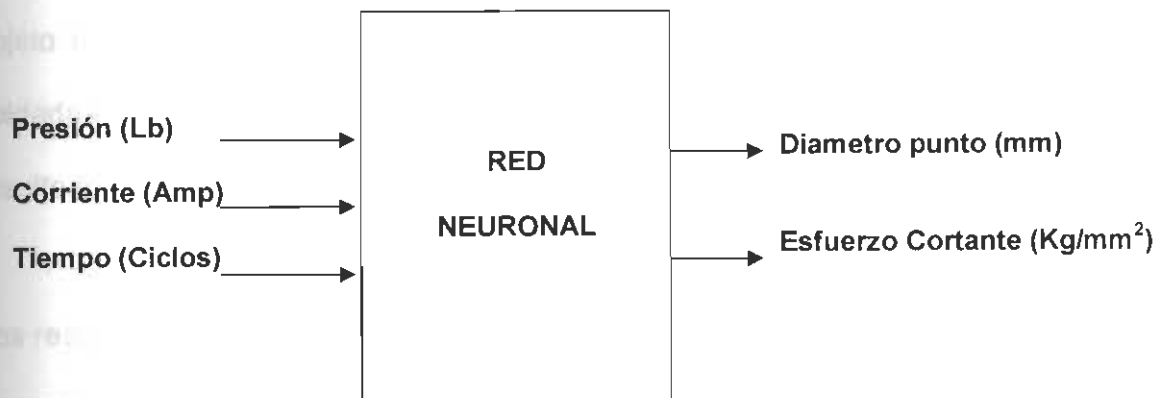


Figura 4.4-7 Arquitectura de la Red Neuronal

En el Anexo 1 se incluye el desarrollo del modelo de redes neuronales utilizado para el pronóstico del diámetro del punto de soldadura y la resistencia al esfuerzo cortante.

CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Diámetro de Punto de Soldadura

En la prueba desprendimiento se separaron los puntos de soldadura con el objeto de medir su diámetro y evaluar la evidencia de fusión en las láminas soldadas, para esto se utilizó un Vernier. En la Tabla 5.1-1 se presentan los resultados obtenidos.

Los resultados del diámetro de punto de soldadura obtenidos en las pruebas de desprendimiento, se graficaron contra los valores de calor de entrada Q , los cuales se muestran en la Figura 5.1-1. Analizando los resultados obtenidos se puede observar que a medida que aumenta el calor de Entrada Q , el diámetro del punto de soldadura aumenta, esto debido a que a medida que incrementamos la corriente (A) y el tiempo (ciclos), la cantidad de calor Q aumenta de acuerdo con la ecuación $Q=I^2Rt$, permitiéndonos el aumento del diámetro del punto de soldadura, en donde para la industria automotriz entre mayor sea el diámetro del punto de soldadura se considera una soldadura de mayor calidad.

Tabla 5.1-1 Resultados Prueba de desprendimiento

Probeta No.	Q=I ² Rt (KJ)	Diam. 1	Diam. 2	Diam. Final	Diam. Prom.	Modo Fractura	Observaciones
P1a	1664	4.7	3.5	4.10	3.65	FIF	
P1b		3.4	3	3.20		FIF	
P2a	2496	3.5	4	3.75	3.78	RB	
P2b		3.6	4	3.80		OB	
P3a	3328	5	5.6	5.30	5.18	RB	Chisporroteo bajo
P3b		4.8	5.3	5.05		RB	Chisporroteo bajo
P4a	2346	3.5	4.2	3.85	3.83	OB	
P4b		3.4	4.2	3.80		FIF	
P5a	3519	5.4	5.6	5.50	5.55	RB	Chisporroteo bajo
P5b		5.2	6	5.60		RB	Chisporroteo bajo
P6a	4693	7.2	7.7	7.45	7.35	RB	Chisporroteo medio
P6b		7.1	7.4	7.25		RB	Chisporroteo medio
P7a	3744	5.4	5.8	5.60	6.15	RB	
P7b		7.2	6.2	6.70		RB	
P8a	5616	6.8	7	6.90	6.78	RB	Chisporroteo medio
P8b		6.5	6.8	6.65		RB	Chisporroteo medio
P9a	7488	7.8	6.5	7.15	7.50	RB	Chisporroteo alto
P9b		7.5	8.2	7.85		RB	Chisporroteo alto

Nomenclatura

FIF = Full Interfacial Fracture (Fractura interfacial Total)

PIF = Partial Interfacial Fracture (Fractura Interfacial Parcial)

RB = Round Boton (Boton Redondo) con desprendimiento de metal base

OB = Oval Boton (Boton Ovalado) con desprendimiento de metal base

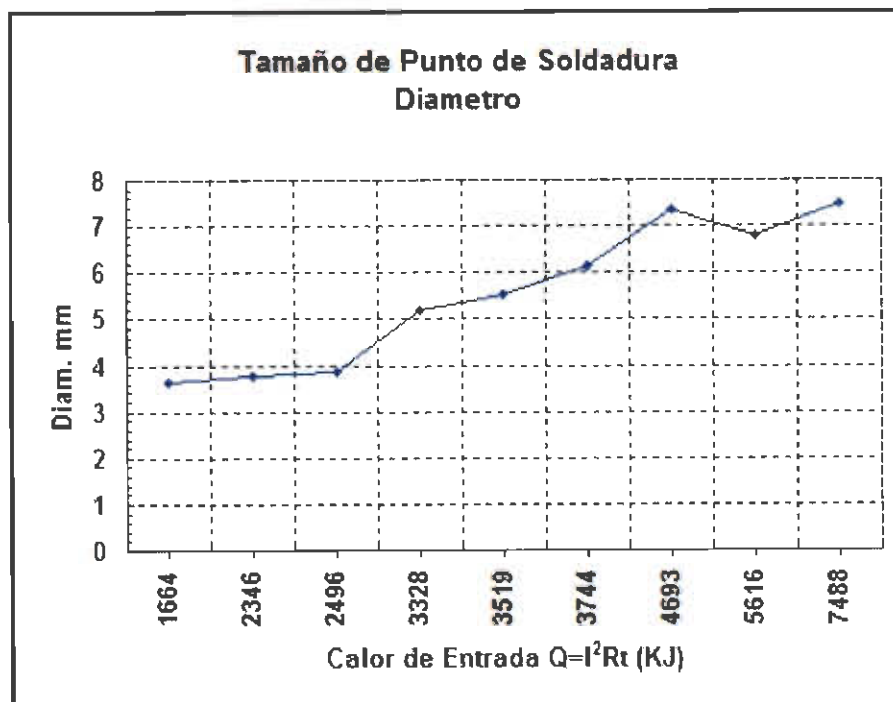


Figura 5.1-1 Resultados Diámetro de Punto

5.2 Profundidad de Indentacion

Otra característica importante a evaluar es la profundidad de indentacion, la cual se define como la depresión que dejan los electrodos de soldadura en la superficie de las láminas. En la tabla 5.2-1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.2-1 Resultados Profundidad de Indentacion

RESULTADOS PRUEBA DE SPRENDIMIENTO PROFUNDIDAD DE INDENTACION

Probeta No.	Q=12Rt (KJ)	Indentación M1 mm	Indentación M2 mm	Indentación Promedio mm	Indentación Maxima mm	Indentación Maxima %
P1a	1664	0.08	0.15	0.11	0.15	9.72
P2a	2496	0.17	0.21	0.19	0.21	13.89
P3a	3328	0.27	0.29	0.28	0.29	19.45
P4a	2346	0.19	0.15	0.17	0.19	12.50
P5a	3519	0.21	0.25	0.23	0.25	16.67
P6a	4693	0.35	0.40	0.38	0.40	26.39
P7a	3744	0.21	0.17	0.19	0.21	13.89
P8a	5616	0.58	0.52	0.55	0.58	38.89
P9a	7488	0.69	0.54	0.61	0.69	45.83

Como se puede observar en la Figura 5.2-1 a medida que aumenta el calor de entrada Q, también aumenta la profundidad de indentacion, esto debido a que a medida que la temperatura aumenta, el metal base permanece un mayor tiempo en estado liquido, permitiendo que los electrodos penetren a una mayor profundidad, siendo esto una característica de calidad que debe ser limitada a un mínimo de acuerdo con los requerimientos de calidad de la industria automotriz.

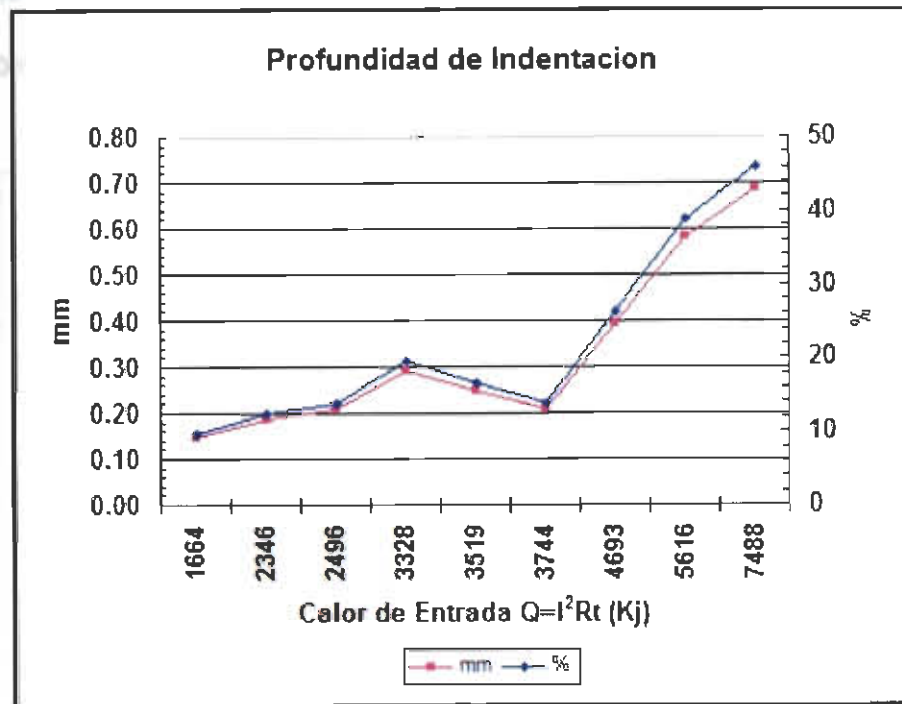


Figura 5.2-1 Grafica de resultados Profundidad de indentación

5.3 Correlación Diámetro - Indentación

Al correlacionar los resultados de diámetro del punto de soldadura contra la profundidad de indentación como se muestra en la Figura 5.3-1 se observa que presentan un comportamiento directamente proporcional, es decir a medida que aumenta el diámetro del punto de soldadura a una condición de calor de entrada Q dada, se produce una mayor indentación, lo cual es una condición de calidad restringida en la industria automotriz. Por lo tanto, los parámetros de soldadura óptimos serían aquellos que produzcan el mayor diámetro de punto

con menor valor de indentación permitido por el requerimiento de calidad aplicable.

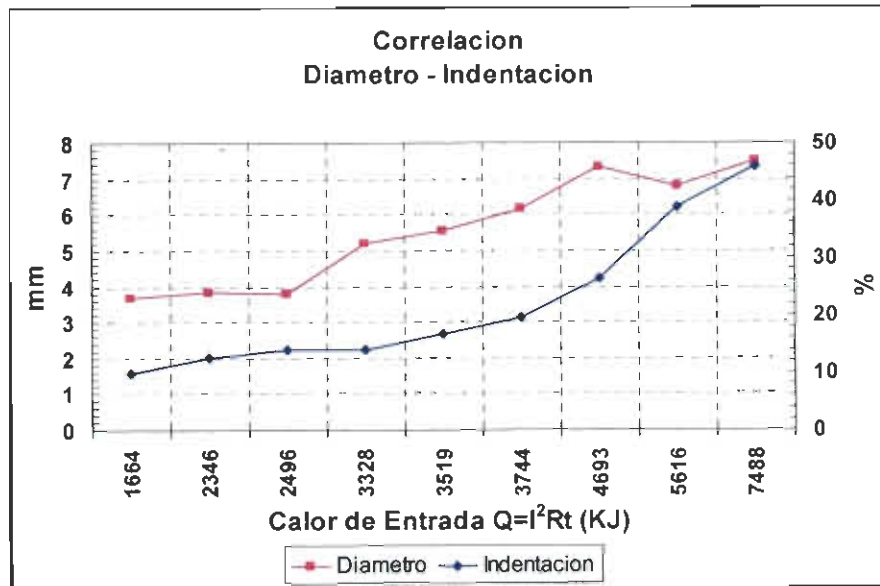


Figura 5.3-1 Grafica Correlación de resultados Diámetro - Profundidad de indentación

5.4 Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante

En la prueba de tensión a esfuerzo cortante las laminas unidas por el punto de soldadura fueron sometidas a una prueba de tensión en una maquina universal de pruebas mecánicas Marca Tinius Olsen 60 Tons , y los valores obtenidos de carga máxima y esfuerzo cortante calculado con el diámetro promedio del punto de soldadura se muestran en la Tabla 5.4-1

Tabla 5.4-1 Resultados Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante

**RESULTADOS PRUEBA TENSION
ESFUERZO CORTANTE (Shear Strength Test)**

Probeta No.	$Q=I^2Rt$ (KJ)	Carga Max Kg	Carga Max Promedio Kg	Diámetro Promedio mm	Espesor mm	Esfuerzo Cortante Kg/mm ²
T1a	1664	291	389	3.65	1.5	22.59
T1b		486				
T2a	2496	143	539	3.78	1.5	30.26
T2b		935				
T3a	3328	1044	1114	5.18	1.5	45.62
T3b		1183				
T4a	2346	440	443	3.83	1.5	24.54
T4b		446				
T5a	3519	1596	1555	5.55	1.5	59.44
T5b		1513				
T6a	4693	2390	2400	7.35	1.5	69.29
T6b		2410				
T7a	3744	1901	1869	6.15	1.5	64.47
T7b		1836				
T8a	5616	2180	2180	6.78	1.5	68.23
T8b		2180				
T9a	7488	2700	2281	7.50	1.5	64.52
T9b		1861				

Los valores obtenidos de carga máxima se grafican en la Figura 5.4-1, en tanto que los valores de resistencia al esfuerzo cortante se grafican en la Figura 5.4-2. En los resultados de esta prueba se puede observar que a medida que aumenta el calor de entrada Q , tanto la carga máxima como la resistencia al esfuerzo cortante aumentan hasta un punto máximo (4693 KJ), que es donde se obtiene el valor mayor de carga máxima y esfuerzo cortante, además de uno de los mas grandes diámetros de punto de soldadura obtenidos. Otra característica observada es que a partir de estas condiciones el incremento en resistencia no es significativo, al aumento en el calor aplicado, si no que además reduce la resistencia del punto de soldadura.

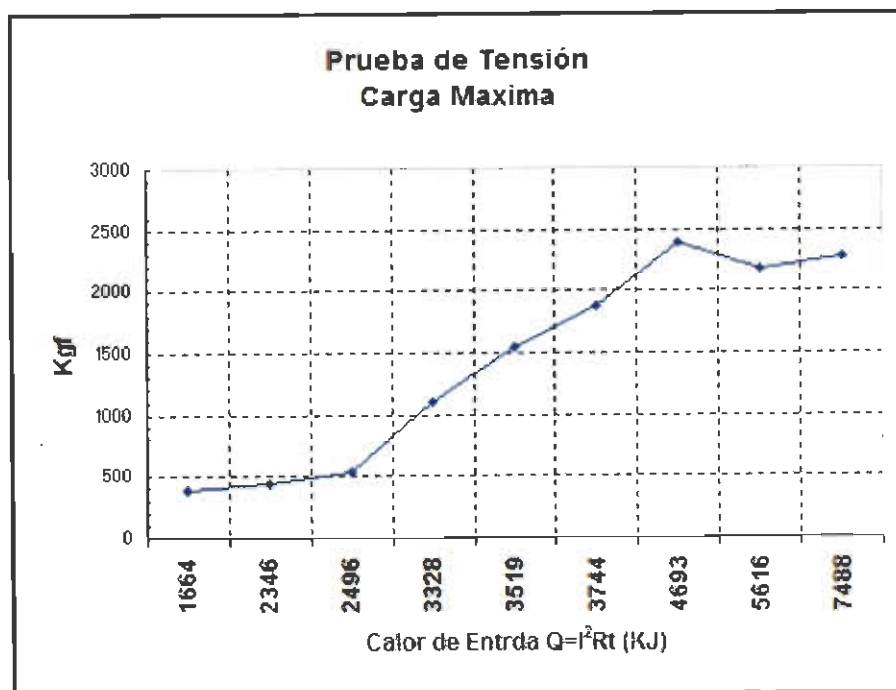


Figura 5.4-1 Resultados Prueba de Tensión Carga Máxima

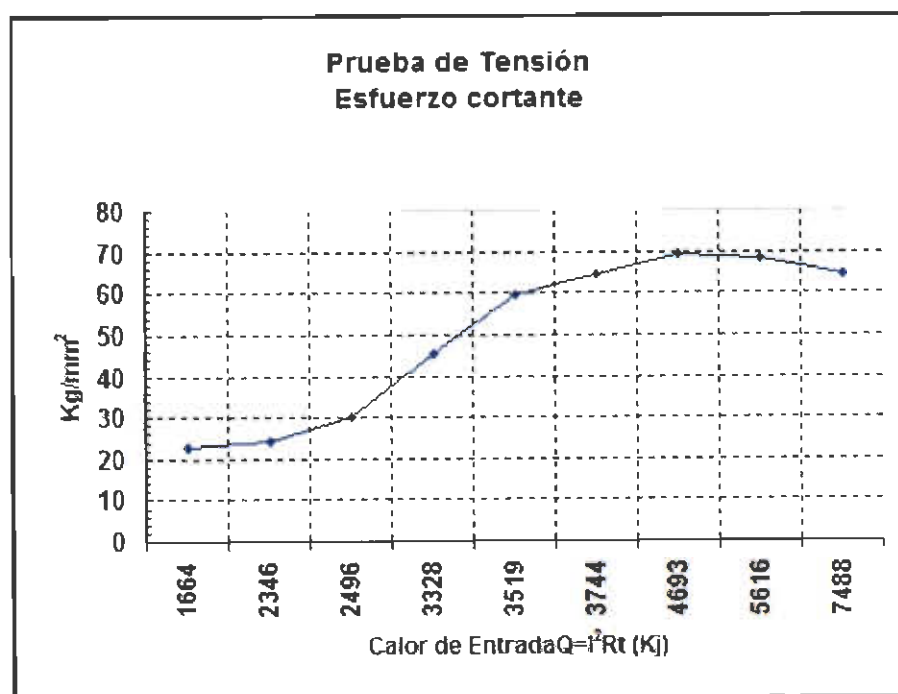


Figura 5.4-2 Resultados Prueba de Tensión Esfuerzo Cortante

5.5 Correlación Diámetro – Esfuerzo Cortante

Al correlacionar el diámetro del punto de soldadura contra el esfuerzo cortante obtenido en las pruebas de tensión, se observa en la Figura 5.5-1 que existe un valor máximo de esfuerzo cortante y que después de éste (4693 KJ), aunque el diámetro de punto se incrementa, su resistencia permanece sin grandes cambios y esto debido a que al introducir mayor cantidad de calor al punto de soldadura, sufre una mayor afectación, lo cual modifica la respuesta en sus propiedades mecánicas.

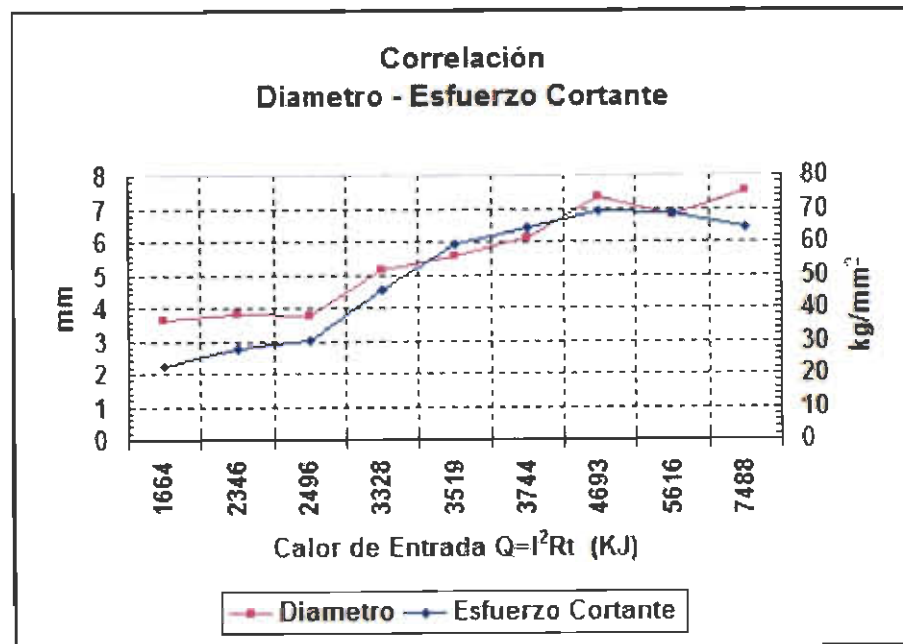


Figura 5.5-1 Grafica Correlación Diámetro – Esfuerzo Cortante

5.6 Microdureza

Para evaluar el efecto del calor de entrada Q en la dureza del punto de soldadura se obtuvo un perfil de microdureza a lo largo de la unión soldada, en el metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura (Sol). Se evaluaron las probetas con valores de calor de entrada Q, Bajo (Probeta P1, 1664 KJ), Medio (Probeta P5 3519 KJ) y Alto (Probeta P9 7488 KJ). En la tabla 5.6-1 se muestran los resultados de microdureza obtenidos a lo largo del punto de soldadura en las probetas evaluadas.

Tabla 5.6-1 Resultados Prueba de Microdureza

RESULTADOS MICRODUREZA
Dureza HV 500, HRc

Zona	Probeta No.	Dureza HV 500	Dureza HRc	Probeta No.	Dureza HV 500	Dureza HRc	Probeta No.	Dureza HV 500	Dureza HRc
MB1-1	P1a 1664 KJ	310	31	P5a 3519 KJ	350	35	P9a 7488 KJ	346	35
MB1-2		311	31		334	34		316	32
MB1-3		326	33		334	34		336	34
MB1-4		301	30		292	29		374	38
ZAC1-5		271	26		251	22		250	25
ZAC1-6		264	25		256	25		254	23
SOL-7		360	37		372	38		383	39
SOL-8		375	38		404	41		377	38
SOL-9		369	38		378	39		392	40
SOL-10		382	39		353	36		374	38
SOL-11		376	38		390	40		399	41
SOL-12		371	38		385	39		418	42
SOL-13		382	39		366	37		387	39
SOL-14		383	39		354	36		341	35
SOL-15		397	40		375	38		426	43
SOL-16		377	38		357	36		372	38
SOL-17		401	41		353	36		399	41
SOL-18		375	38		372	38		383	39
SOL-19		378	38		368	37		389	40
ZAC2-20		264	25		273	26		250	22
ZAC2-21		265	25		269	25		282	27
MB2-22		303	30		388	40		378	38
MB2-23		325	33		386	39		368	37
MB2-24		321	32		360	37		356	36
MB2-25		345	35		386	39		381	39

Los valores de microdureza obtenidos son relacionados en la Figura 5.6-1, en la cual se observa que la zona afectada por el calor (ZAC) muestra una disminución en dureza en comparación con la del metal base (MB), y la dureza obtenida en el punto de soldadura (Sol), lo cual es indicativo del efecto que tiene el calor de entrada Q en el punto de soldadura, debido al sobrecalentamiento que presenta el material, y su consiguiente afectación metalúrgica en la microestructura del punto de soldadura.

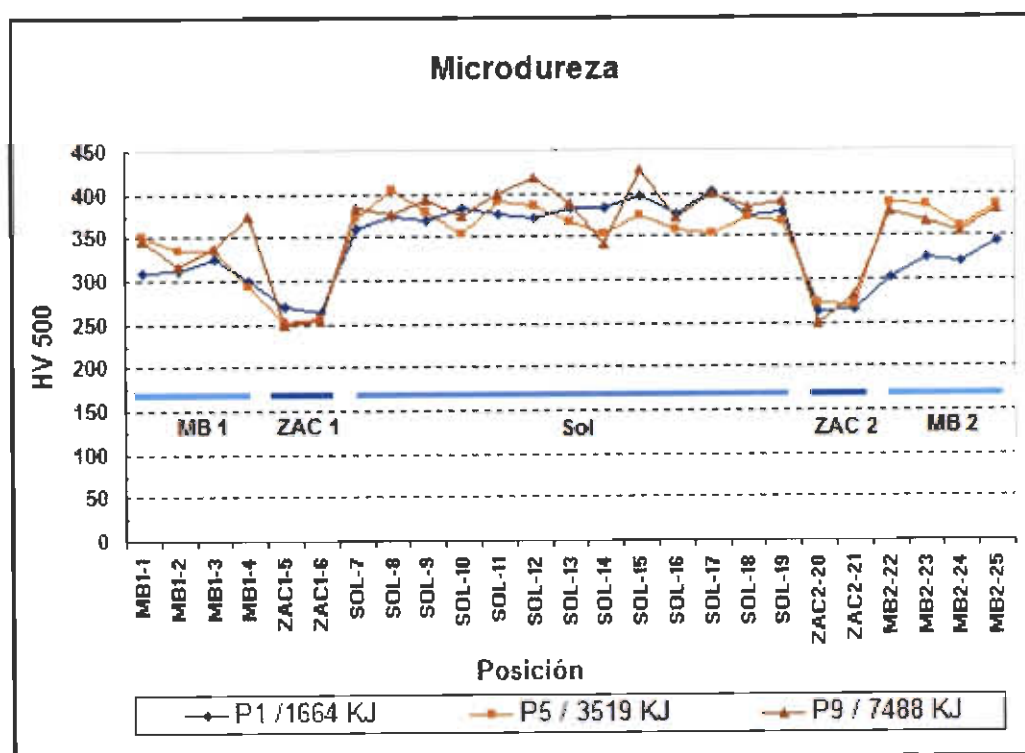










































































Figura 5.6-1 Resultados Micro durezas en Metal Base, ZAC y Soldadura

5.7 Microestructuras

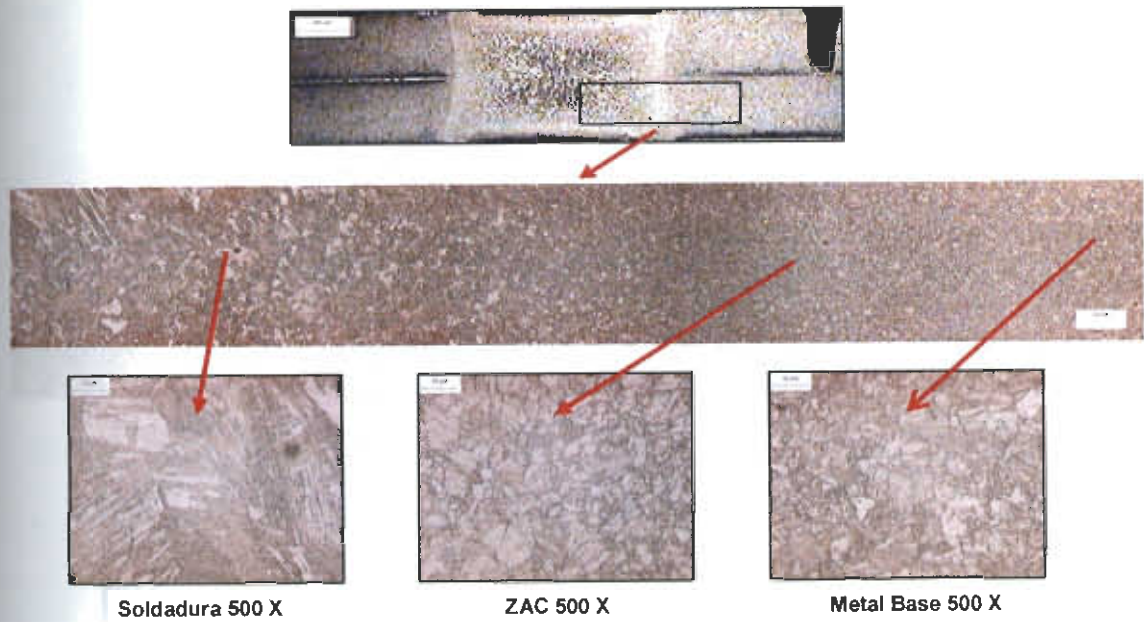
Para evaluar el efecto del calor de entrada, en la microestructura del punto de soldadura, se realizaron las metalografías correspondientes a cada una de las diferentes condiciones evaluadas. Las variaciones microestructurales que se presentan a lo largo de la unión soldada tanto en el metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura (Sol) se presentan en la Tabla 5.7-1

Tabla 5.7-1 Resultados Metalografía

PROBET A. No.	FOTO	MB-1	ZAC-1	ZAC-1	SOL	ZAC-2	ZAC-2	MB-2	Calor de Entrada Q _{in} /R _c (KJ)
		100 X	50 X	200 X	200 X	200 X	50 X	500 X	
P1									1664
P2									2436
P3									3529
P4									2346
P5									3520
P6									4633
P7									3144
P8									5636
P9									7459

La evaluación metalográfica realizada a las probetas con valores de calor de entrada Q, Bajo (P1, 1664 KJ), Medio (P5 3519 KJ) y Alto (P9 7488 KJ) se muestra en las Figuras 5.7-1, 5.7-3 y 5.7-5 respectivamente. Las cuales muestran que el metal base (MB) presenta una microestructura de martensita revenida, en tanto que en la zona afectada por el calor (ZAC) el material es calentado a una temperatura alta entre A_1 y A_3 y dado que la velocidad de enfriamiento no es tan alta como para hacer que el material no pase por esta zona de estabilidad bifásica (α y γ), esto por el contenido de carbono, donde la ferrita y la austenita coexisten a esta temperatura. Mientras que la austenita transforma a martensita durante el enfriamiento la ferrita permanece, esto da como resultado la presencia de ambas fases: martensita - ferrita en la ZAC en diferentes proporciones. Por lo tanto, la formación de la fase ferrita en la zona afectada por el calor (ZAC) produce la disminución de la dureza en esta zona y a medida que se incrementa el calor de entrada, aumenta el tamaño de la ZAC y la velocidad de enfriamiento es menor, lo cual se refleja en la disminución de la dureza en esta zona y consecuentemente de la resistencia al esfuerzo cortante debido a valores altos de calor de entrada.

En la soldadura el material es calentado por encima de la temperatura A_3 , por lo tanto es totalmente austenizado durante el calentamiento y transformado nuevamente a martensita debido a la alta templabilidad de los aceros martensíticos. Consecuentemente la microestructura y dureza de la soldadura es similar y en algunos puntos mayor a la dureza del metal base.



Soldadura 500 X

ZAC 500 X

Metal Base 500 X

ZONA	MICROESTRUCTURA
Metal base	Martensita revenida
Zona Afectada por el calor	Martensita con ferrita y bainita
Soldadura	Granos columnares dendríticos compuestos por agujas de martensita con granos de ferrita widmanstatten

Figura 5.7-1 Evaluación Metalografica Probeta P1a 1664 KJ microscopio óptico.

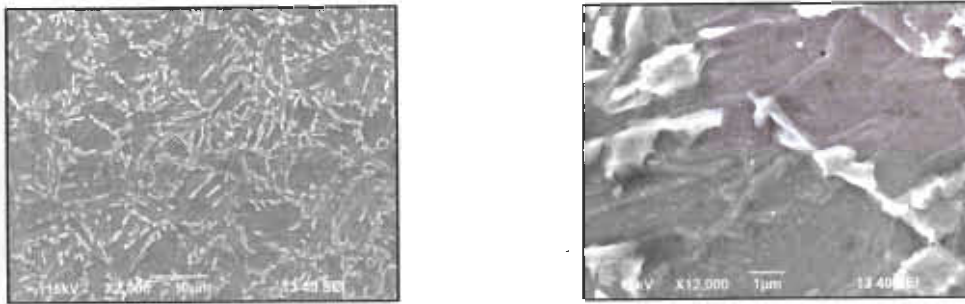
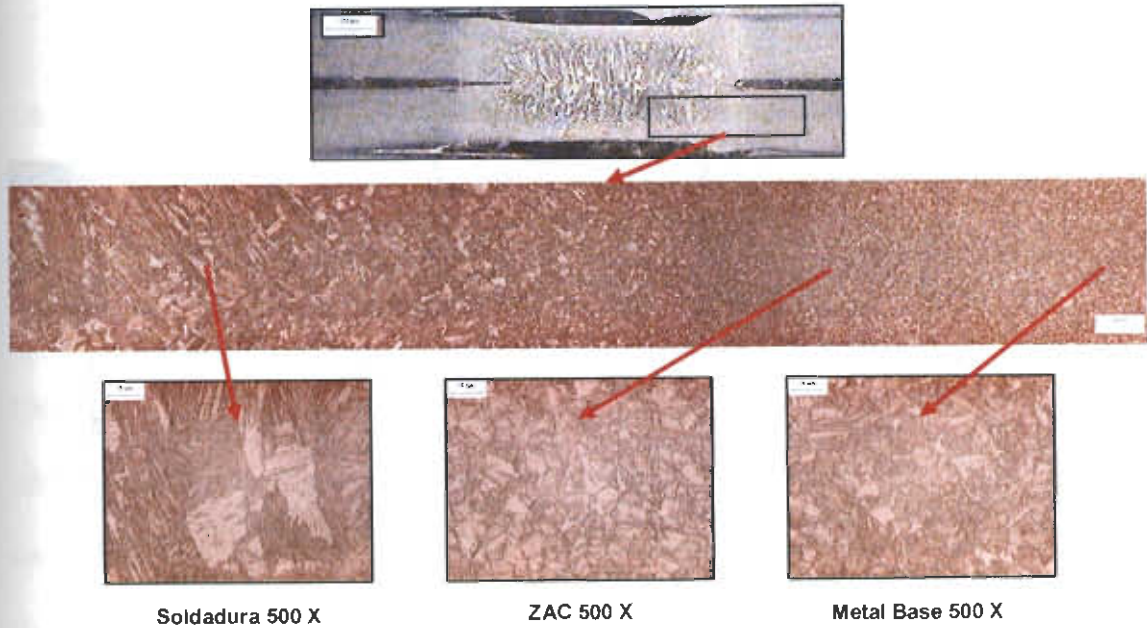


Figura 5.7-2 Evaluación Metalografica Probeta P1a 1664 KJ zona afectada por el calor microscopia MEB.



ZONA	MICROESTRUCTURA
Metal base	Martensita revenida
Zona Afectada por el calor	Martensita con ferrita y bainita
Soldadura	Granos columnares dendríticos compuestos por agujas de martensita con granos de ferrita widmanstatten

Figura 5.7-3 Evaluación Metalografica Probeta P5a 3519 KJ

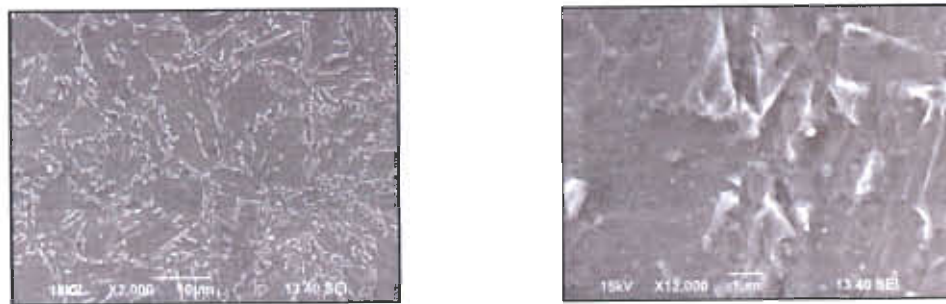
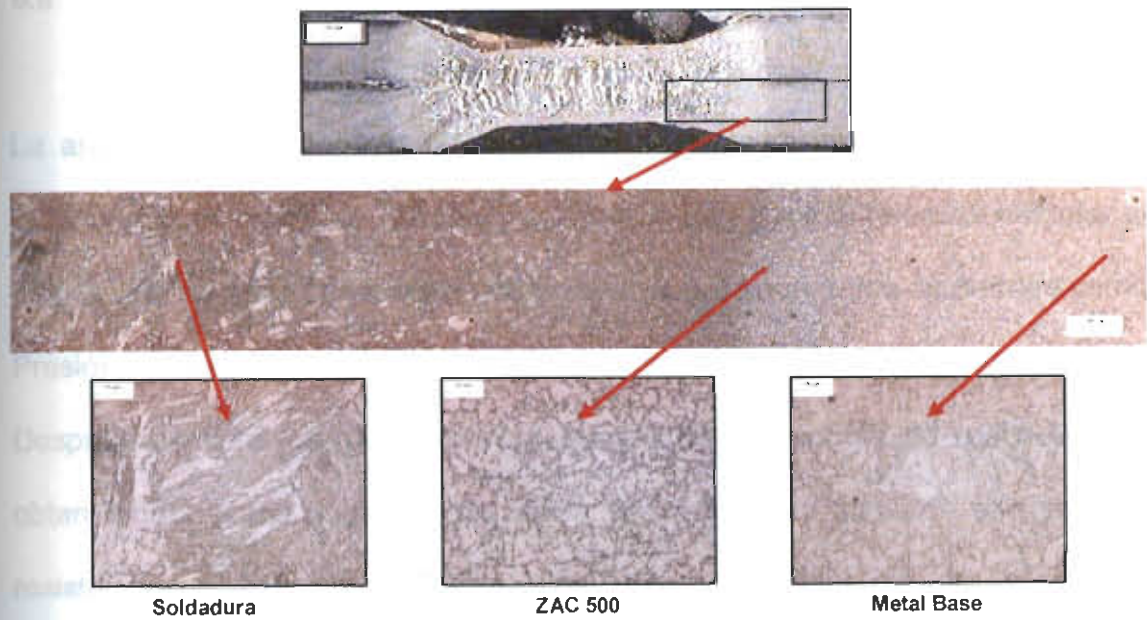


Figura 5.7-4 Evaluación Metalografica Probeta P5a 3519 KJ zona afectada por el calor microscopia MEB.



ZONA	MICROESTRUCTURA
Metal base	Martensita revenida
Zona Afectada por el calor	Martensita con ferrita y bainita
Soldadura	Granos columnares dendríticos compuestos por agujas de martensita con granos de ferrita wittmastaten

Figura 5.7-5 Evaluacion Metalografica Probeta P9a 7488 KJ

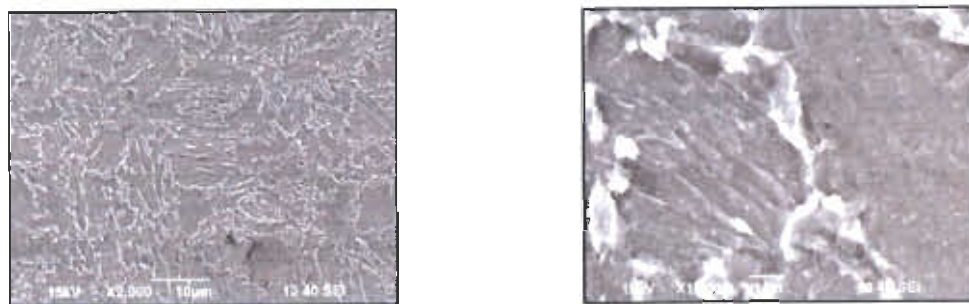


Figura 5.7-6 Evaluación Metalografica Probeta P9a 7488 KJ zona afectada por el calor microscopia MEB.

5.8 Entrenamiento y Validación de Modelo de Redes Neuronales

La aplicación de este sistema inteligente Red Neuronal Artificial requiere la introducción de datos de entrada y salida a la red. Para la tarea de modelar el proceso de soldadura por redes neuronales se utilizaron datos de entrada como Presión, Corriente y Tiempo, que se alimentaron como variables de entrada. Después de esto los datos son procesados por el modelo de red neuronal, obteniéndose como respuesta de salida, el diámetro de punto de soldadura y resistencia al esfuerzo cortante. Los datos obtenidos en el diseño de experimentos (DOE) fueron normalizados y utilizados en el proceso de entrenamiento de la red neuronal; para correr el modelo programado se utilizó el programa de análisis matemático MATLAB®, software en donde podemos hacer una correlación de los valores reales contra los obtenidos por el modelo, para el diámetro del punto de soldadura y la resistencia al esfuerzo cortante. Los parámetros de aprendizaje utilizados fueron: (i) rango de aprendizaje de 0.25, momentum de 0.125 y una capa sencilla con 30 neuronas. El entrenamiento involucra un 85 % del total de los datos y el resto fueron usados para validar el modelo de redes neuronales. Las Figuras 5.8-1 y 5.8-2 muestran el resultado del entrenamiento de la red neuronal para una respuesta normalizada.

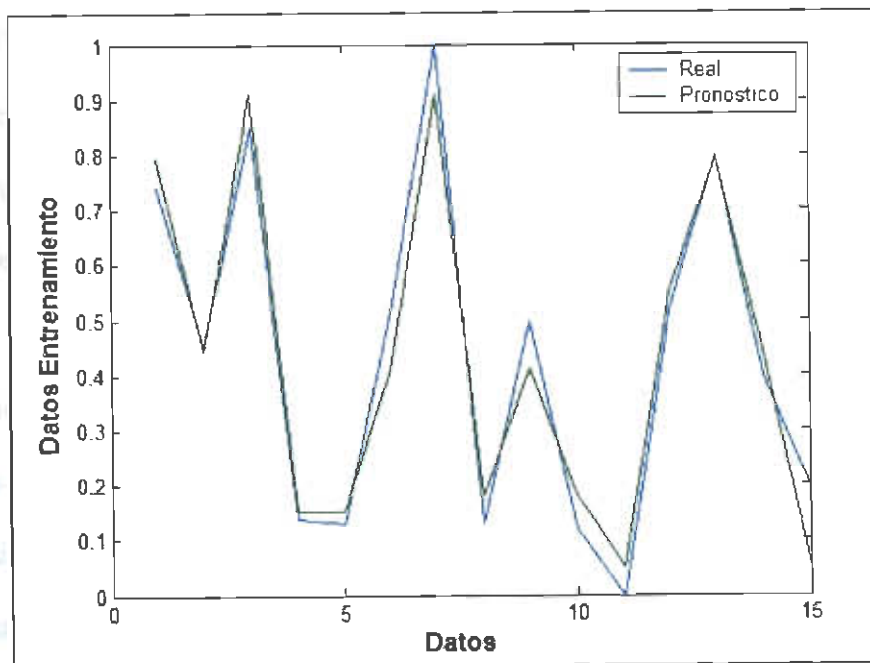


Figura 5.8-1 Resultados de entrenamiento Red neuronal para Diámetro de punto

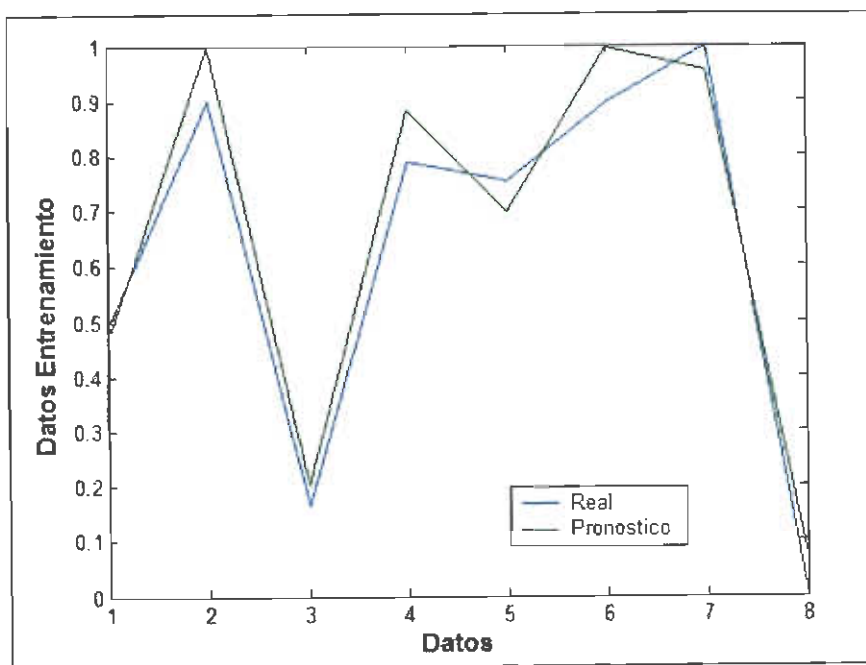


Figura 5.8-2 Resultados de entrenamiento Red neuronal para Esfuerzo Cortante

Una vez que los modelos fueron entrenados y validados los resultados, tanto para diámetro de punto como para esfuerzo cortante, se grafican en una superficie de respuesta tal y como se muestran en las Figuras 5.8-3 y 5.8-4, las cuales muestran el efecto de las variables de proceso en las características de calidad de soldadura evaluadas.

Como puede observarse en las graficas de las Figuras 5.8-3 y 5.8-4, el modelo de redes neuronales predice un valor de salida ya sea diámetro del punto ó resistencia al esfuerzo cortante, dado un valor de entrada de corriente y tiempo. De tal manera, que el modelo puede usarse también a la inversa, es decir, dado un requerimiento de calidad de soldadura específico como el diámetro de punto de soldadura, se pueden conocer los parámetros de soldadura óptimos como corriente y tiempo, evitando el proceso comúnmente utilizado de prueba y error para la obtención de una característica de calidad requerida.

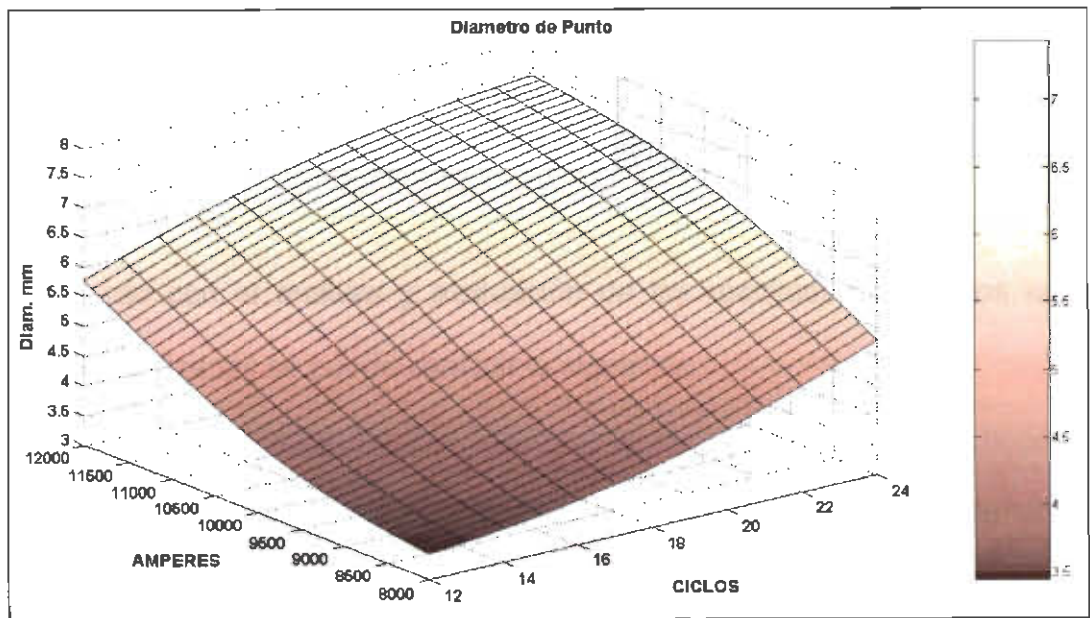


Figura 5.8-3 Superficie de respuesta Modelo de Redes Neuronales Para Diámetro de punto de soldadura

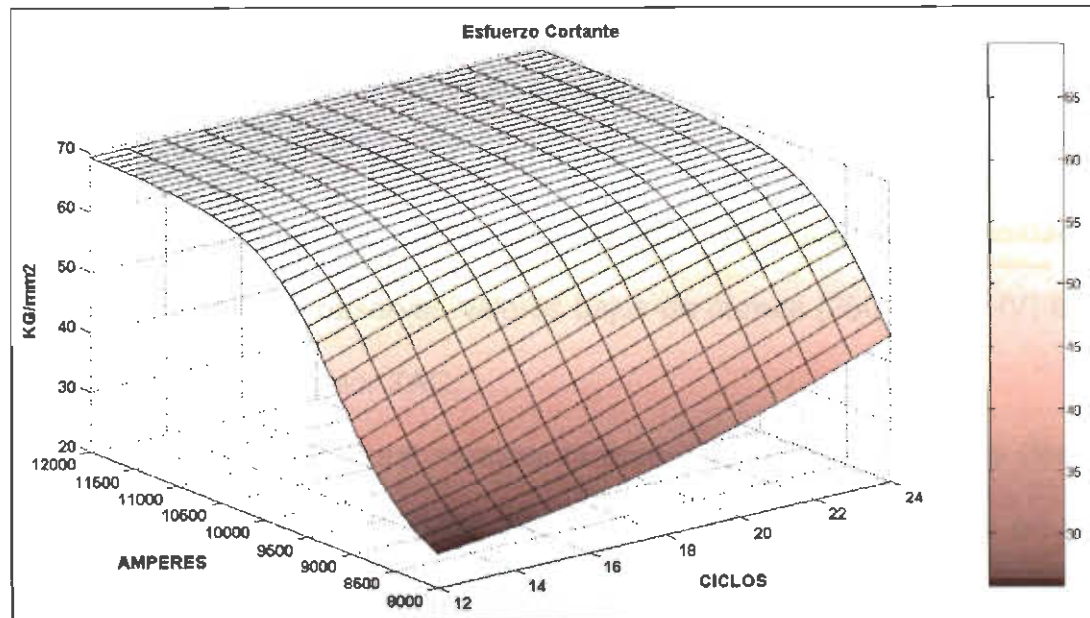


Figura 5.8-4 Superficie de respuesta Modelo de Redes Neuronales Para Esfuerzo cortante

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis y evaluación de los resultados obtenidos en las probetas realizadas se puede concluir lo siguiente:

- 1.- El diámetro y la profundidad del punto de soldadura tienen un comportamiento directamente proporcional al aumento del calor de entrada Corriente (Amp) y el Tiempo (Ciclos).
- 2.- La resistencia al esfuerzo cortante (Kg / mm^2) del punto de soldadura tiene un comportamiento directamente proporcional al aumento del calor de entrada. Sin embargo se observa que a valores altos de calor de entrada P8 5616 KJ y P9 7488 KJ presenta disminución en la resistencia al esfuerzo cortante.
- 4.- En comparación con los valores altos de dureza en metal base y soldadura (301 – 426 HV), se observan valores bajos de dureza (250 – 282 HV) en la Zona Afectada por Calor ZAC.
- 5.- El análisis microestructural muestra la presencia de fases blandas (ferrita) en la Zona Afectada por Calor ZAC, la cual disminuye su dureza en esta zona debido a la afectación por el calor de entrada.

6.- Mediante el análisis de los resultados obtenidos en las prueba realizadas se puede observar que los valores óptimos para el proceso, se encuentran entre las probetas P5 y P6 9500 Amp 18 y 24 Ciclos, P7 12000 Amp 12 Ciclos, que es donde se pueden obtener los mayores diámetros y resistencias al esfuerzo cortante con la menor indentacion aceptable.

7.- Se desarrolló un modelo por redes neuronales que correlaciona las variables de Corriente (Amp) y Tiempo (Ciclos) del proceso de soldadura de puntos por resistencia RSW. El modelo nos da información acerca de la relación que existe entre estas variables y los valores de salida estimados. Por lo tanto, el modelo puede ser utilizado para estimar los parámetros de soldadura requeridos para una característica de calidad como el diámetro de punto mínimo requerido.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Maurizio Mini 2002. AHSS Advanced High Strength Steels GED
- [2] M. D. Tumuluru; 2006. Resistance spot welding of coated high-strength dual-phase steels, *Welding Journal*, August 2006, 31.
- [3] D. Anderson, 2008 .Application and Repairability of Advanced High Strength Steels. AISI Report
- [4] J.E. Gould, S.P. Khurana, T. Li; 2006, Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels; *Welding Journal*, AWS, May 2006, 111.
- [5] International Iron and Steel Institute, 2002.Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts (ULSAB – AVC) Report / AISI.
- [6] International Iron and Steel Institute, 2006.Advanced High Strength Steel AHSS Application Guidelines September 2006. Section 1 - General Description of AHSS
- [7] S.S.M. Tavares, P.D. Pedroza, J.R. Teodósio, T. Gurova; (1999), Mechanical properties of a quenched and tempered dual phase steel; *Scripta Materialia*, 40, 8, 887.
- [8] I.A. El-Sesy, Z.M. El-Baradie; 2002 Influence carbon and/or iron carbide on the structure and properties of dual-phase steels, *Materials Letters* 57, 580–585
- [9] I.D.Choi et al. 2002, Deformation behavior of low carbon TRIP sheet steels at high strain rates. *ISIJ Int* 2002; 42(12):1483–9
- [10] S. Oliver, T.B. Jones, G. Fourlaris, 2006, Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing, *Materials Characterization*, Paper in Press, accepted 4 July 2006.
- [11] Y.J. Chao.2003 Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear or Combined Tensile/Shear Loads, , *Jouma1 of Engineering Materia1s and Technology*, Vol. 125, pp. 125-132, Abril 2003,EUA.
- [12] S. Agashe, H. Zang. 2003. Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, pp. 179 S-183 S, Julio 2003, Ohio, EUA.
- [13] ASM Handbook Volume VI, ASM Interactional Handbook Committee. Procedure Development and Process Considerations for Resistance Welding, Welding, Brazing and Soldering; Editorial ASM Intemationa1, pp. 226-230,416, 1073-1080, 1993, EUA.
- [14] Dickinson. (1984). Welding in the Automotive Industry: State of the Art, D.W, Republic Steel Corporation, Report on AISI Project No. 1201-409C, pp 1-400, 1984, EUA.
- [15] Resistance Welding Manual, Resistance Welder Manufacturers' Association, 4taEdición, Caps. 1, 2, 7, 8 y 22, 1999, Philadelphia, EVA.
- [16] F.C. Porter.(1983).Galvanizing and Welding Structural Steel, Part 2, Resistance Welding, , *Metal Construction*, pp. 676-679, November 1983.

- [17] J.M. Sawhill, J.C. Baker 1980, Spot Weldability of High Strength Sheet Steels Welding Journal Vol. 59, pp. 19s-30s, 1980, EVA.
- [18] N. Yamanchi, T. Taka. Spot Weldability of High Tensile Strength Sheet Steel. IIW doc. III-664-80.
- [19] G. Kaiser, G.I. 1982 Dunn, T.W. Eagar. The effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding, , Welding Research Supplement, pp. 167s173s, Junio 1982, EVA.
- [20] N.A. Freytag, Spot Welding Galvanized Steel, 7° International Galvanizing Conference, pp. 368-390, Holanda.
- [21] A Comprehensive Study of Spot Welding Galvanized Steel, Welding Journal, pp. 145s-156s, Abril 1965, EVA.
- [22] E.A. Green, J.J. Riley, Resistance Spot Weldability of Galvanized Steel, American Welding Society Meeting, 1963, EVA.
- [23] D.R. Orts, Master's Thesis, Ohio State University, 1967, The Effect of Zinc Coating in Resistance Spot Welding Galvanized Steel, EVA.
- [24] D.R. Orts, Welding Design & Fabrication, The Do's and Don'ts of Welding Galvanized and Aluminum Coating Steels, pp. 62-67, Diciembre 1976.
- [25] Armco Research and Technology Report Aluminized Steel Resistance Spot Welding, Fatigue and Impact Tests, Agosto 1978, EVA.
- [26] E. Gould, L.R. Lehman, S. Holmes, A Design of Experiments Evaluation of Factors Affecting the Resistance Spot Weldability of High Strength Steels, Proceedings of Sheet Metal Welding Conference VII, 1996, EUA.
- [27] W.L. Chuko, J.E. Gould.(2002).Development of Appropriate Resistance Spot We1ding Practice for Transformation Hardened Steels, , Welding Journal, pp.1s-7s, Junio 2002, EVA.
- [28] P.K. Ghosh, P.E. Gupta, R. Avtar, B.K. Jha. (1990). Resistance Spot Weldability of Comparative C-Mn-Cr-Mo Dual Phase Steel Sheet, , ISIJ International Vol. 30No. 3, pp. 233-240, 1990, India.
- [29] Recommended Practice for Resistance Welding, American Welding Society, pp. 1-66, 1966, EUA.
- [30] Resistance Welding Manual. E.J. Del Vecchio, Resistance Welder Manufacturers' Association, 1956, EUA.
- [31] Resistance Welding Equipment Standards, Resistance Welder Manufacturers' Association, Bulletin No. 16, EUA.
- [32] Automotive Resistance Spots Welds Steel. General Motors material specification metals GM4488M October 2004.
- [33] Resistance Spot Welding Automotive Components, Chrysler Corporation Process Standard No: PS-9471 <S>, Vehic1e Engineering Office, pp 120, 1998, EVA
- [34] International Iron and Steel Institute, (2006).Advanced High Strength Steel AHSS Application Guidelines September 2006. Section 3 – Joining
- [35] Beenken, (2004), Joining of AHSS versus Mild Steel," Processing State-of-the-Art Multi-phase Steel; European Automotive Supplier Conference, Berlin (September 23, 2004).
- [36] American Iron and Steel Institute, "Advanced High-Strength Steel Reparability Studies: Phase I Final Report and Phase II Final Report,"

- [37] F. Reyes-Valdes, L. T.-Torres, V. Lopez-Cortez, F. L. Cruz-Marquez, and F. Briceño-Ramirez, Correlation between GMAW process and weld quality parameters: A neural network approach applied in the automotive industry, *FABTECH and AWS 2006*, Atlanta, Georgia, 2006.
- [38] Freeman J.A. Skapura D.M. 1993. *Redes Neuronales. Algoritmos. Aplicaciones y técnicas de propagación*. Addison-Wesley. México. Pág. 306.1993.
- [39] Simon Haykin. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall. 1999
- [40] Yen John y Langari Reza. *Fuzzy Logic: Intelligence. Control and Information*. Prenhall. EUA. 2000.
- [41] Babuska Robert. *Fuzzy and Neural Control*. Delft University of Technology. Holanda. 2001
- [42] Fuller Robert 1995. *Neural Fuzzy Systems*. Abo Akademi University. Turquía.
- [43] Tsoukalas Leftery y Uhrig Robert 1998. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. Wiley - Interscience Publications.EUA.
- [44] Multi phase and ultra high strength sheet steel. General Motors Material specification metals GMW3399. February 2003.
- [45] Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials. ANSI/AWS/SAE D8.9-97. April 1997.
- [46] D. Fernández 2005. *Tesis Soldadura de aceros complejos termo galvanizados*. FIME Monterrey N.L. México
- [47] Beenken, 2004, "Joining of AHSS versus Mild Steel," Processing State-of-the-Art Multi-phase Steel; European Automotive Supplier Conference, Berlin (September 23, 2004).
- [48] Carlsson, P. Bustard, D. Eriksson, (2004).Formability of High Strength Dual Phase Steels, Paper F2004F454, SSAB Tunnlåt AB, Borlänge, Sweden
- [49] Cuddy et al, 2005, Manufacturing Guidelines When Using Ultra High Strength Steels in Automotive Applications, EU Report (ECSC) R585.
- [50] American Iron and Steel Institute, "Advanced High-Strength Steel Reparability Studies: Phase I Final Report and Phase II Final Report"
- [51] P. J. Belanger, M. S. M. Milititsky, (2004). Weld Advanced Steel Products for Light weighting at DaimlerChrysler North America, , DaimlerChrysler Corporation, Sheet Metal and Materials Engineering, Galvatech '04 Conference Proceedings, pp.51-62, April 2004, Chicago, EUA.
- [52] M. Takahashi 2003 Development of High Strength Steels for Automobiles, Steel Research Laboratories, Nippon Steel Technica1 Report No.87, 88, pp.27,Julio2003, Japan.
- [53] K. Hulka 2003).The Role Of Niobium In Multi-Phase Steel, Niobium Products Company GmbH, Düsseldorf, 2003, Alemania.
- [54] A. V. Gohil, S. M.Patel .The Finite Element Modeling of Resistance Spot Welding, , Department of Production Engineering, Shantilal Shah Engineering College, Bhavnagar, India.

- [55] S. Sun, M. Pugh. 2002 Properties of thermo mechanically processed dual-phase steels containing fibrous martensite, Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, Materials Science and Engineering A335, pp. 298-308, 2002, Nueva Zelanda.
- [56] M. Meurer, T.W. Schaumann, W. Warnecke, (2004). Selection and Use of Coated Advances High Strength Steels for Automotive Applications, R. Bode, Galvatech '04 Conference Proceedings, pp. 107-118, Abril 2004, Chicago, EUA.
- [57] Krupitzer. 2004. Designing and Manufacturing Vehicles with Advanced Strength Steels, D.P., Galvatech '04 Conference Proceedings, pp. 31-50, Abril 2004, Chicago, EUA.
- [58] Y.J. Chao.(2003) Ultimate Strength and Failure Mechanism of Resistance Spot Weld Subjected to Tensile, Shear or Combined Tensile/Shear Loads, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 125, pp. 125-132, Abril 2003, EUA.
- [59] S. Agashe, H. Zang. (2003). Selection of Schedules Based on Heat Balance in Resistance Spot Welding, Welding Journal, pp. 179 S-183 S, Julio 2003, Ohio, EUA.
- [60] ASM Handbook Volume VI, ASM Interactional Handbook Committee. Procedure Development and Process Considerations for Resistance Welding, Welding, Brazing and Soldering; Editorial ASM International, pp. 226-230, 416, 1073-1080, 1993, EUA.
- [61] Dickinson 1984. Welding in the Automotive Industry: State of the Art, D.W, Republic Steel Corporation, Report on AISI Project No. 1201-409C, pp 1-400, 1984, EUA.
- [62] P.K. Ghosh, P.E. Gupta, R. Avtar, B.K. Jha. (1990). Resistance Spot Weldability of Comparative C-Mn-Cr-Mo Dual Phase Steel Sheet, ISIJ International Vol. 30No. 3, pp. 233-240, 1990, India.
- [63] Resistance Weldability Test For Bare, Galvanized, Galvannealed, High Strength, Low Carbon, And Interstitial Free (IF) Hot And Cold Rolled Steel Sheet, Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-170, Vehicle Engineering Office, pp. 1-46, 1992, EUA
- [64] Current Adjustment Procedure for Welding Strip Pairs, Chrysler Corporation Laboratory Procedure No: LP-461K-173, Vehicle Engineering Office, pp. 1-6, 1992.
- [65] Resistance Spot Welding Automotive Components, Chrysler Corporation Process Standard No: PS-9471 <S>, Vehicle Engineering Office, pp 120, 1998.
- [66] Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials. ANSI/AWS/SAE D8.9-97. April 1997.
- [67] Recommended practices for automotive weld quality –resistance spot welding. ANSI/AWS D8.7-88. December 1988.
- [68] Standard for automotive resistance spot welding electrodes. ANSI/AWS 8.6-77. February 1977.

- [69] Recommended practices for automotive portable gun resistance spot welding. AWS D8.5-66. March 1966.
- [69] Recommended practices for resistance welding AWS C1.1M/C1.1:2000. January 2000.
- [70] Simon Haykin; Neural Networks: A comprehensive foundation; Prentice Hall,(1999)
- [71] J.Stojanovski, S. Rana; determining resistance welding parameters using artificial neural networks International conference on Industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems archive
- [72] K. B. a and A. O. b. "Optimization of different welding processes using Statistical and numerical approaches a reference guide," *Advances in Engineering Software*. vol. 39, pp. 4R3-496. 200R.
- [73] S.-I. Doong. "Multi-objective process optimization of electron beam welding inconel 71R, Master's Thesis, Department of Mechanical and Automation engineering. National Kaohsiung First University of Science and Technology. Kaohsilling City, Taiwan. 2007.
- [74] D. C. Montgomery, *Diseños y análisis de experimentos*. México: Editorial] Limusa Willey. Segunda edición, 2006.

LISTA DE TABLAS

No.	TITULO	Pág.
3.1-1	Ejemplos de grados de aceros y sus propiedades en base a ULSAB-AVC.	18
3.5-1	Clasificación de los aceros para soldadura de puntos de resistencia.	65
4.2-1	Diseño experimental.	74
4.3-1	Parámetros de Soldadura.	76
5.1-1	Resultados Prueba de desprendimiento.	83
5.2-1	Resultados Profundidad de Indentacion.	85
5.4-1	Resultados Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante.	88
5.6-1	Resultados Prueba de microdureza.	91
5.7-1	Resultados Metalografía.	93

LISTA DE FIGURAS

No.	TITULO	Pág.
1.1-1	Evolución del uso de Aceros Avanzados AHSS en la estructura de carrocerías de automóviles	10
1.1-2	Contenido en peso por vehiculo de aceros AHSS para 2007	10
1.1-3	Tipos de aceros seleccionados para partes individuales de un automóvil USLAB-AVC International Iron and Steel Institute 2002	11
3.1-1	Relación ductilidad – resistencia para diferentes tipos de aceros	17
3.2-1	Representación esquemática de islas de martensita en una matriz de ferrita.	20
3.2-2	Representación esquemática de un ciclo de tratamiento térmico para producir un acero de fase dual (DP).	21
3.2-3	Metalografía de un acero face dual (DP), mostrando una microestructura consistente de ferrita (oscuro, F) y 11% de martensita (claro, M).	21
3.2-4	Esquema de la microestructura de los aceros TRIP.	24
3.2.-5	Esquema de la microestructura de los aceros Martensíticos.	26
3.2-6	Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de fase compleja.	27
3.2-7	Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de FB	28
3.2-8	Rangos de esfuerzo de tensión y cedencia en aceros de TWIP	29
3.3-1	Esquema representativo de la soldadura por puntos.	30
3.3-2	Gradiente de temperaturas para un punto de soldadura.	33
3.3-3	Temperaturas (en °C) que se generan en las piezas de trabajo y sus alrededores durante el proceso de soldadura.	34

3.3-4	Efecto de desviación entre dos puntos de soldadura.	39
3.3-5	Representación de una curva de soldadura.	41
3.3-6	Geometrías de electrodos para soldadura por puntos.	47
3.3-7	Comparación del efecto de desviación de corriente de soldadura en aceros recubiertos y aceros no recubiertos.	50
3.3-8	Curva de resistencia-tiempo en las etapas de formación del núcleo de soldadura.	52
3.4-1	Cargas en soldaduras de puntos en distintos tipos de aceros.	61
3.4-2	Dureza en Soldaduras HF de Aceros DP 280/600	61
3.4-3	Variaciones de dureza e soldaduras de varios tipos de aceros.	62
3.4-4	Cedulas de soldaduras óptimas para aceros AHSS.	62
3.5-1	Grafica donde se muestra que los AHSS requieren menor corriente que los Aceros suaves y aceros de alta resistencia baja aleación.	64
3.5-2	Rangos para 1.4 milímetros de acero laminado en frío del DP 350/600 en diversos modos de corriente con pulso simple.	66
3.5-3	Efecto de geometría del electrodo usando Corriente Alterna y pulso simple.	67
3.6-1	Estructura de una Red neuronal.	70
4.3-1	Probeta para prueba de desprendimiento.	75
4.3-2	Probeta para prueba de tensión a esfuerzo cortante.	75
4.3-3	Equipo Utilizado.	76
4.4-1	Prueba de Desprendimiento (Peel Test).	77
4.4-2	Técnica para la medición del diámetro del punto de soldadura.	78
4.4-3	Medición de la profundidad de Indentacion del punto de	78

	soldadura.	
4.4-4	Prueba de Tensión a Esfuerzo Cortante.	79
4.4-5	Prueba de Microdureza.	80
4.4-6	Prueba Metalografía.	80
4.4-7	Arquitectura de la red neuronal.	82
5.1.1	Resultados Diámetro de Punto.	84
5.2-1	Grafica de resultados profundidad de indentacion.	86
5.3.1	Grafica correlación de resultados Diámetro – Profundidad de indentacion.	87
5.4-1	Resultados Prueba de Tensión Carga Máxima.	89
5.4-2	Resultados Prueba de Tensión Esfuerzo Cortante.	89
5.5-1	Grafica de correlación Diámetro – Esfuerzo cortante.	90
5.6-1	Resultados Micro durezas en Metal Base, ZAC y Soldadura.	92
5.7-1	Evaluacion Metalografica Probeta P1a 1664 KJ.	95
5.7-2	Evaluacion Metalografica Probeta P5a 3519 KJ.	96
5.7-3	Evaluacion Metalografica Probeta P9a 7488 KJ.	97
5.8-1	Resultados de entrenamiento Red neuronal para Diámetro de punto.	99
5.8-2	Resultados de entrenamiento Red neuronal para Esfuerzo Cortante.	99
5.8-3	Superficie de respuesta Modelo de Redes Neuronales Para Diámetro de punto de soldadura.	101
5.8-4	Superficie de respuesta Modelo de Redes Neuronales Para Esfuerzo cortante.	101

ANEXO A

A1 Modelo de Redes Neuronales Para Diámetro de punto

```

% Amperaje Ciclos Diámetro
% (Amp) (seg) (mm)
%LMTT 052008
TINP = 2+1; %Neuronas de la capa de entrada mas polarización
TMID = 25; %Neuronas de la capa media
TOUT = 1; %Neuronas de la capa externa
ETA = 0.25; %Constante de aprendizaje : entre 0.25 y 0.01
ALPHA = 0.125; %par metro de momento:menor que uno y positivo
NTEpochs=1000;
noe=0;
% o-out, r-resultante o esperado, m-medio, e-error, i-input
x=0;y=0;w=1;pat=0;cuenta=0;
[m, ma, o, oa]=RandomWeights(TINP, TMID, TOUT);
%Definir patron de entrada i
%filas= número de patron, columnas es el número de entradas
ExpData=[8000 12 4.1
8000 12 3.2
8000 18 3.75
8000 18 3.8
8000 24 5.3
8000 24 5.05
9500 12 3.85
9500 12 3.8
9500 18 5.5
9500 18 5.6
9500 24 7.45
9500 24 7.25
12000 12 5.6
12000 12 6.7
12000 18 6.9
12000 18 6.65
12000 24 7.15
12000 24 7.85
];
[DataTrain,DataVal1,DataVal2,MRRange] = GenTrainVal(ExpData,0.85);
[NTPat NTC] = size(DataTrain);
XI = zeros(NTPat,TINP); %plus bias
YO = zeros(NTPat, TOUT);
%Input-Output Especifications
% amperaje
XI(:,1) = DataTrain(:,1);

```

```

% tiempo
XI(:,2) = DataTrain(:,2);
%Bias
XI(:,3) = DataTrain(:,1)*0+1;
% diametro
YO = DataTrain(:,3);
%End of the data structure
for z=1:TOUT
    eo(z) = 1;
end
Errg=[];
emin=10000000;
for noe=1:NTEpochs
    etotal=0;
    %Shaking
    M=[XI YO];
    [M] = shaking(M);
    [pat NTcol] = size(M);
    XI = M(:,1:NTcol-1);
    YO = M(:,NTcol);
    % {aprendizaje obligatorio, patrón por patrón}
    for w=1:NTPat
        VI=XI(w,:);
        DO = YO(w,:);
        [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
        [em,eo] = BackwardBKG(DO, netm, m, o, so, neto);
        [m, ma, o, oa] = LearningBKG(VI, m, ma, sm, em, o, oa, eo, ETA, ALPHA)
        %' error:',eo(1),' salida n: ',so,' salida real: ',sr(1,w),
        etotal= eo*eo + etotal;
    end
    errcm=0.5*etotal;
    noe,errcm,
    if errcm<emin
        emin=errcm;
    end
    Errg=[Errg emin];
end
%Test Training
Ynn=[];
for w=1:NTPat
    VI=XI(w,:);
    DO = YO(w,:);
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    a=[DO so];
    Ynn = [Ynn; a];
end
plot(Ynn)

```

```

legend('Real', 'Predicted')
]]
%%***Probar el modelo ****
VR = [9000 16
],
    %Normalize input
    for col=1:2
        Lmax=MRRange(col,1); Lmin=MRRange(col,2);
        VRN(col)=(VR(col)-Lmin)./(Lmax-Lmin);
    end
    %Give a input vector;
    VI = [VRN 1];
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    %VO,pause
    %desnormalize
    R = desnormalization(so,MRRange(3,2),MRRange(3,1)),pause
%%%% **** Optimización con EVONORM *****
%create basic population
NTPr=2; %Parametros o entradas
NTGen=100;
NTI=100;
NTIS=10;
maxy=-100000000000;
%range per parameter
%M=[0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 100; 0 100; 0 100;0 1 ];
M=zeros(NTPr,2);
for param=1:NTPr
    M(param,1)=MRRange(param,2);
    M(param,2)=MRRange(param,1);
end
P = zeros(NTI,NTPr);
%Inicialization
for i=1:NTI
    for pr=1:NTPr
        P(i,pr)=desnormalization(rand,M(pr,1),M(pr,2));
    end
end
Imax=P(1,:);
FE = zeros(1,NTI);
MN = zeros(1,NTPr);
SD = zeros(1,NTPr);
Imax=P(1,:);
maxfe=-100000000000;
%Inicio
for cycle=1:NTGen
    cycle,
%Evaluation

```

```

for k=1:NTI
    VR = P(k,:);
    %Normalize input
    for col=1:2
        Lmax=MRRange(col,1); Lmin=MRRange(col,2);
        VRN(col)=(VR(col)-Lmin)./(Lmax-Lmin);
    end
    %Give a input vector;
    VI = [VRN 1];
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    %VO,pause
    %desnormalize
    FE(k) = desnormalization(so,MRRange(3,2),MRRange(3,1));
    if FE(k)>maxy
        maxy=FE(k);
        Imax=P(k,:);
    end
end
end
% Selection
[PS]=selection(P,FE,NTIS);
% Calculation
[MN, SD]=CalcPr(PS,Imax);
% Generation
[P] = GenP(MN, SD,NTI);
%Adjustment
[P] = adjustPR(P,MRRange);
end
% resultados optimizacion
'entradas optimas ', Imax
'salida maxima', maxy

```

A2 Modelo de Redes Neuronales Para Esfuerzo Cortante

```

% Ampere    Cycles shear strength
% (Amp)    (seg)    (Kg/mm2)
%LMTT 052008
TINP = 2+1; %Neuronas de la capa de entrada mas polarización
TMID = 25; %Neuronas de la capa media
TOUT = 1; %Neuronas de la capa externa
ETA = 0.25; %Constante de aprendizaje: entre 0.25 y 0.01
ALPHA = 0.125; %par metro de momento:menor que uno y positivo
NTEpochs=1000;
noe=0;
% o-out, r-resultante o esperado, m-medio, e-error, i-input
x=0;y=0;w=1;pat=0;cuenta=0;
[m, ma, o, oa]=RandomWeights(TINP, TMID, TOUT);
%Definir patron de entrada i
%filas= número de patron, columnas es el número de entradas
ExpData=[8000    12    22.59
8000  18    30.26
8000  24    45.62
9500  12    57.69
9500  18    59.44
9500  24    69.29
12000 12    64.47
12000 18    68.23
12000 24    64.52
];
[DataTrain,DataVal1,DataVal2,MRRange] = GenTrainVal(ExpData,0.85);
[NTPat NTC] = size(DataTrain);
XI = zeros(NTPat,TINP); %plus bias
YO = zeros(NTPat, TOUT);
%Input-Output Especifications
% ampere
XI(:,1) = DataTrain(:,1);
% cycles
XI(:,2) = DataTrain(:,2);
%Bias
XI(:,3) = DataTrain(:,1)*0+1;
% shear strenght
YO = DataTrain(:,3);
%End of the data structure
for z=1:TOUT
    eo(z) = 1;
end
Errg=[];
emin=1.0000000;

```



```

for noe=1:NTEpochs
etotal=0;
%Shaking
M=[XI YO];
[M] = shaking(M);
[pat NTcol] = size(M);
XI = M(:,1:NTcol-1);
YO = M(:,NTcol);
% {aprendizaje obligatorio, patrón por patrón}
for w=1:NTPat
    VI=XI(w,:);
    DO = YO(w,:);
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    [em,eo] = BackwardBKG(DO, netm, m, o, so, neto);
    [m, ma, o, oa] = LearningBKG(VI, m, ma, sm, em, o, oa, eo, ETA, ALPHA);
    %' error:',eo(1),' salida n: ',so,' salida real: ',sr(1,w),
    etotal= eo*eo + etotal;
end
    errcm=0.5*etotal;
    noe,errcm,
    if errcm<emin
        emin=errcm;
    end
    Errg=[Errg emin];
end
%Test Training
Ynn=[];
for w=1:NTPat
    VI=XI(w,:);
    DO = YO(w,:);
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    a=[DO so];
    Ynn = [Ynn; a];
end
plot(Ynn)
legend('Real', 'Predicted')
%%***Probar el modelo ****
VR = [9000 16
],
%Normalize input
for col=1:2
    Lmax=MRange(col,1); Lmin=MRange(col,2);
    VRN(col)=(VR(col)-Lmin)./(Lmax-Lmin);
end
%Give a input vector;
VI = [VRN 1];

```

```

[sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
%VO,pause
%desnormalize
R = desnormalization(so,MRRange(3,2),MRRange(3,1)),pause
%%% **** Optimización con EVONORM ****
%create basic population
NTPr=2; %Parametros o entradas
NTGen=100;
NTI=100;
NTIS=10;
maxy=-100000000000;
%range per parameter
%M=[0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 100; 0 100; 0 100;0 1 ];
M=zeros(NTPr,2);
for param=1:NTPr
    M(param,1)=MRRange(param,2);
    M(param,2)=MRRange(param,1);
end
P = zeros(NTI,NTPr);
%Inicialization
for i=1:NTI
    for pr=1:NTPr
        P(i,pr)=desnormalization(rand,M(pr,1),M(pr,2));
    end
end
Imax=P(1,:);
FE = zeros(1,NTI);
MN = zeros(1,NTPr);
SD = zeros(1,NTPr);
Imax=P(1,:);
maxfe=-100000000000;
%Inicio
for cycle=1:NTGen
    cycle,
%Evaluation
for k=1:NTI
    VR = P(k,:);
    %Normalize input
    for col=1:2
        Lmax=MRRange(col,1); Lmin=MRRange(col,2);
        VRN(col)=(VR(col)-Lmin)./(Lmax-Lmin);
    end
    %Give a input vector;
    VI = [VRN 1];
    [sm,so,neto,netm] = ForwardBKG(VI,m,o);
    %VO,pause
    %desnormalize

```

```
FE(k) = desnormalization(so,MRRange(3,2),MRRange(3,1));
if FE(k)>maxy
    maxy=FE(k);
    Imax=P(k,:);
end
end
% Selection
[PS]=selection(P,FE,NTIS);
% Calculation
[MN, SD]=CalcPr(PS,Imax);
% Generation
[P] = GenP(MN,SD,NTI);
%Adjustment
[P] = adjustPR(P,MRRange);
end
% resultados optimizacion
'entradas optimas ', Imax
'salida maxima', maxy
```