CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN DE MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

CONTROL DE CALIDAD EN LAS UNIONES SOLDADAS POR RESISTENCIA PUNTUAL EN ACEROS AVANZADOS FERRITICO MARTENSITICOS

POR

ING. FRANCISCO SAMUEL MONTEJANO MENDOZA

MONOGRAFÍA

EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 01 FEBRERO DEL 2008

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

CONTROL DE CALIDAD EN UNIONES SOLDADAS POR RESISTENCIA PUNTUAL EN ACEROS AVANZADOS FERRITICO - MARTENSITICOS

POR

ING. FRANCISCO SAMUEL MONTEJANO MENDOZA

MONOGRAFÍA

EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 01 DE FEBRERO DEL 2008

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de CV.

Gerencia de Desarrollo del Factor Humano

División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "Control de Calidad en las uniones soldadas por resistencia puntual en aceros avanzados ferritico - martensiticos", realizada por el alumno Francisco Samuel Montejano Mendoza con número de matrícula 06-ES045 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Tutor Académico

M.C. Gabriel Garcia Cerecero

Tutor en Planta
M.C. Víctor Hugo López

Asesor
M.C. Marco Aurelio Gonzalez.

Vo. Bo.
M.C. Claudia A. González Rodríguez
Coordinador de Postgrado

AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme en los momentos de dificultad, permitirme terminar satisfactoriamente mis estudios y cuidar a mi familia.

A mi familia por darme la fortaleza y la fe para lograr mis objetivos.

A mi madre por ser y estar.

A el M.C. Gabriel García por el apoyo brindado como tutor en la realización de la monografía.

Al Doctor Arturo Reyes por apoyarme desinteresadamente y compartir su conocimiento.

A todos los que con su disposición me ayudaron en la realización de este trabajo.

A todos mi agradecimiento y gratitud.

INDICE

ANTECEDENTES

1.- SINTESIS 1
2.- OBJETIVO 3
3.- INTRODUCCION 4
4.- SOLDADURA POR RESISTENCIA ELECTRICA DE PUNTOS (RSW) 7
- **4.1.-** Definición 7
- **4.2.-** Características Principales del Proceso 9
- **4.3.-** Principio del Proceso 10
- **4.4.-** Variables que Afectan la Soldadura por Resistencia 11
  - 4.4.1.- Corriente 11
  - 4.4.2.- Presión 14
  - 4.4.3.- Tiempo 15
  - 4.4.4.- Material y Condiciones Superficiales 17
  - 4.4.5.- Electrodos 18

5.- ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA (AHSS) 20
- **5.1.-** Metalurgia de AHSS 21
- **5.2.-** Aceros de Doble Fase 26

6.- CONTROL DE CALIDAD 30
- **6.1-** Pruebas Destructivas 31
- **6.2.-** Pruebas No Destructivas 32
- **6.3.-** Pruebas No Destructivas Aplicables a la Evaluación de Calidad en el Proceso RSW 33
  - **6.3.1.-** Ultrasonido 35
  - **6.3.1.1.-** Aplicaciones 40
  - **6.3.1.2.-** Ventajas y Desventajas 43
- **6.4.-** Principales Defectos 45
  - **6.4.1.-** Chisporroteo 46
  - **6.4.2.-** Fracturas 47

7.- CONCLUSIONES 53
8.- BIBLIOGRAFIA 55
9.- LISTA DE FIGURAS 57

1.
SÍNTESIS

El proceso de soldadura de resistencia por puntos (Resistance Spot Welding RSW) es usado principalmente para la unión de componentes de acero bajo carbono en automóviles, las grandes compañías ensambladoras de autos en su búsqueda por fabricar automóviles más ligeros y más seguros están introduciendo con rapidez los nuevos aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steels, AHSS) sobre otras estrategias para utilizarlos en las nuevas carrocerías de los autos. Los materiales mencionados anteriormente

Las aleaciones de los AHSS incluyen altas resistencias a la tensión (de 500 Mpa o mayores), las altas resistencias de estos aceros permiten la realización de diseños eficientes en términos de masa que economizan el consumo de acero mientras que de manera simultánea generan un incremento en la resistencia a los impactos en colisiones y disminuyen el consumo de combustible al producir autos mas ligeros, existen aleaciones de aluminio que presentan únicamente 1/3 de la densidad del acero, pero el uso de dichas aleaciones se ha visto limitada por sus altos costos y las dificultades en procesos de manufactura como formado y soldado. Los materiales mencionados anteriormente pueden ser unidos por varios procesos de soldadura pero la soldadura de puntos sigue siendo la más utilizada en la industria automotriz.

La presente investigación hace un análisis de las principales variables esenciales del proceso de soldadura por resistencia eléctrica de puntos RSW y el efecto que tiene su variación sobre la calidad de los puntos de soldadura aplicados en aceros avanzados de doble fase ferrítico martensíticos.

Finalmente se describen los principales defectos que se presentan al soldar aceros de doble fase ferrítico martensíticos y los nuevos modos de falla que se presentaran con la implementación de los aceros avanzados en la industria, así como los ensayos destructivos y no destructivos que se utilizan para asegurar la calidad.

2.
OBJETIVO

Los materiales avanzados requieren de conocimiento profundo. El uso de materiales con altas resistencias como los aceros de Doble Fase (DP), requieren de un firme control de calidad y del conocimiento de los nuevos modos de falla que se presentaran con la aplicación de estos materiales, hoy en día la industria automotriz controla la aplicación de soldadura por resistencia en aceros bajo carbono, el nuevo desafió al que se enfrentan es como soldar aceros avanzados de alta resistencia.

El objetivo de la presente investigación es:

- Describir los fundamentos del proceso de resistencia eléctrica de puntos en aceros avanzados de doble fase y las técnicas de control de calidad destructivas y no destructivas aplicables a este proceso.

- Analizar el efecto de la variación de los principales parámetros y variables esenciales en las uniones soldadas por el proceso de soldadura por resistencia (RSW) en aceros avanzados de alta resistencia de doble fase ferrítico-martensíticos (DP dual-phase).

- Determinar las principales técnicas, herramientas, pruebas destructivas y no destructivas que se utilizan para garantizar la calidad de las uniones en el producto final.

3.
INTRODUCCIÓN

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 o tratamientos térmicos, por esta razón es indispensable tener un buen entendimiento de las variables que afectan al proceso para obtener los resultados esperados.

La soldadura está relacionada con casi todas las actividades industriales, a parte de ser una importante industria por sí misma. Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó a la tortillería y remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es una técnica fundamental en la industria automotriz, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier tipo de producto hecho con metales y necesite tener geometrías complejas.

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

Existen diversos procesos de soldadura, los que difieren en el modo en que se aplica la energía para la unión. Así hay métodos en los que se calientan las piezas de metal hasta que se funden y se unen entre sí, o que se calientan a una temperatura inferior a su punto de fusión y se unen o ligan con un metal de aporte. Otro método es calentarlas hasta que se ablanden lo suficiente para poder unirlas por martilleo; algunos procesos requieren únicamente presión para la unión, otros requieren de un metal de aporte y energía térmica que derrita a dicho metal; y otras. Ver Fig. 3.1

En la actualidad el avance tecnológico que han experimentado los procesos de soldadura, dan lugar a que exista una innumerable cantidad de procesos diversos y con nuevas técnicas especializadas en su aplicación y uso.

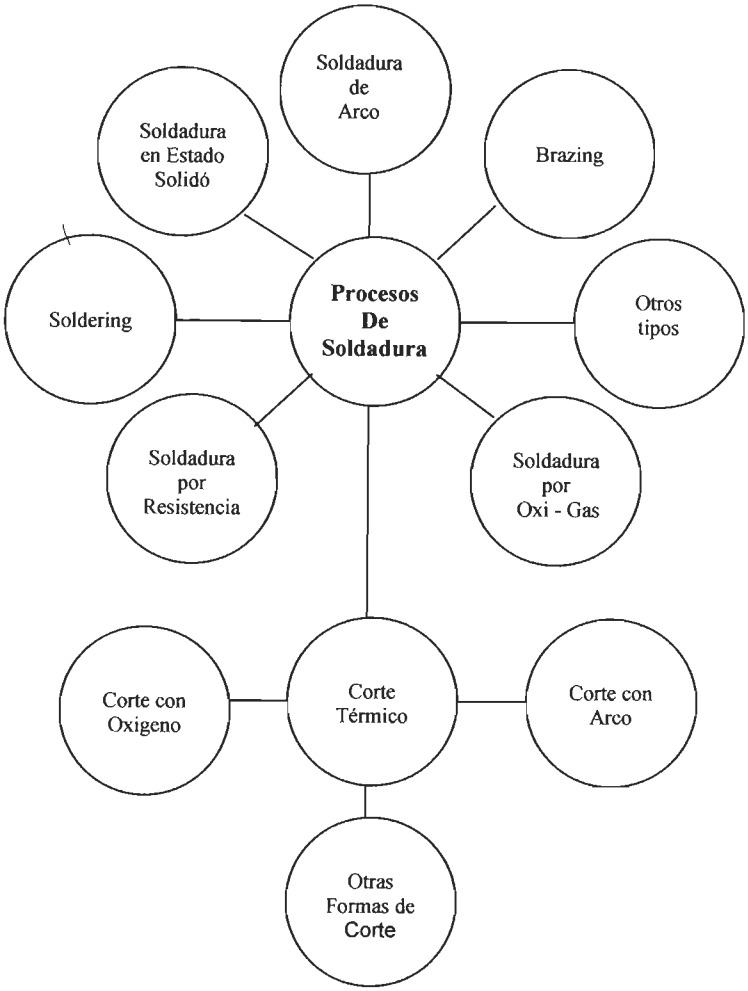


Figura 3.1. Procesos de Soldadura.

La industria automotriz no ha sido la excepción, en su constante búsqueda por mejorar la eficiencia en el consumo de acero y combustible de sus vehículos, se han desarrollado una gran cantidad de nuevos materiales que difieren en su composición química, proceso de producción y propiedades mecánicas, sin embargo, para que sea posible introducir estos nuevos aceros en la producción de un auto deben de ser soldables, con buena formabilidad, reparables y que se les pueda aplicar recubrimientos anticorrosivos. Uno de los materiales que cumple con estos requerimientos es el acero avanzado de doble fase, ya que tiene una excelente formabilidad sin sacrificar la resistencia a la tensión y al impacto, además de que la combinación de la gran ductilidad y las altas resistencias permiten la utilización de placas mas delgadas en la carrocería del auto, permitiendo la realización de diseños nuevos y más eficientes en términos de masa, que economizan el consumo de acero y combustible, mientras de manera simultanea, generan un incremento en la resistencia a los impactos en colisiones.[ASM Handbook Volumen 6, 2005][M. Marya, 2005][II&SI,2006]

El principal proceso para unir placas delgadas en la industria automotriz es el proceso de soldadura por resistencia eléctrica de puntos (RSW). Con la implementación de este nuevo tipo de aceros existe una incertidumbre de los nuevos modos de falla y de la calidad en las uniones, por esta razón se vuelve importante la interacción entre los parámetros de soldadura y los fenómenos metalúrgicos que se presentan durante la formación del punto.

4.

SOLDADURA POR RESISTENCIA ELECTRICA DE PUNTOS. (RSW)

Definición

"La soldadura por resistencia eléctrica de puntos es el principal proceso utilizado para unir placas de metal a traslape, donde por el paso de corriente eléctrica (en un tiempo determinado) y por la resistencia eléctrica (propia del metal) es generado el calor necesario para llevar el material a un estado plástico, manteniendo la fuerza necesaria para juntar las partes a soldar" [ASM Handbook Volumen 6, 2005]

Como se observa en la definición se manejan cuatro importantes variables para la soldadura por resistencia eléctrica de puntos:

Resistencia: Propiedad eléctrica que poseen todos los metales.
Corriente: Energía aplicada para calentar o fundir un metal.
Presión: Fuerza necesaria para sostener y juntar los materiales fundidos, de tal modo que al enfriarse se obtenga una unión fuerte y de buena calidad..
Tiempo: Es la duración que tendrá el impulso de corriente que calentará el material

La soldadura por resistencia se ve afectada por diversas condiciones, estas determinan los resultados de la soldadura aplicada, por lo que es indispensable conocer y controlar dichas condiciones, así es posible obtener procesos de manufactura robustos y con calidad constante.

La soldadura eléctrica de puntos es un proceso que se utiliza para unir dos o más metales con la ayuda de calor y presión. El calor es generado por la resistencia que presentan los metales al paso de una corriente eléctrica y la presión es proporcionada por los electrodos para que se pueda producir la unión de ambas piezas.[ASM Handbook Volume 6, 2005]

El proceso se utiliza para unir placas delgadas que van desde 0.5 Mm. hasta 3 Mm., la mayor concentración de calor se presenta en la interfase entre las dos piezas, el metal fundido de las dos piezas fluye y se unen, entonces la corriente se suspende y el metal fundido se solidifica formando una conexión metálica entre las dos piezas. Ver Fig. 4.1.

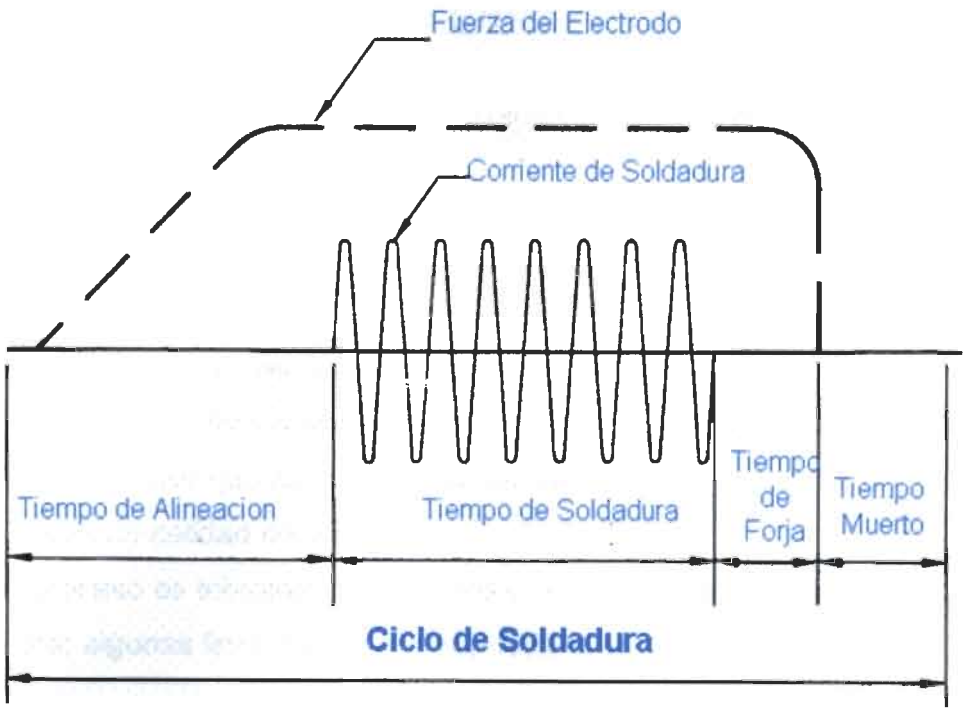


Figura 4.1. Ciclo Completo de Soldadura.

[Welding Handbook, Volume 2, p.538, AWS]

Características Principales del Proceso.

La soldadura por resistencia eléctrica de puntos es el proceso mayormente utilizado para unir placas delgadas, se usa ampliamente en la producción masiva de enceres domésticos y automóviles; si se considera que la carrocería de un automóvil normal tiene al menos 3,000 puntos de soldadura y que la producción anual de automóviles en todo el mundo se mide en decenas de millones de unidades, es posible apreciar la importancia económica de la soldadura por puntos. [Xin Long, 2006]

La unión se lleva a cabo gracias a la resistencia eléctrica del material al paso de la energía y a una fuerza de forja aplicada sobre el mismo. El área transversal de una soldadura por puntos se observa en la figura 4.2.

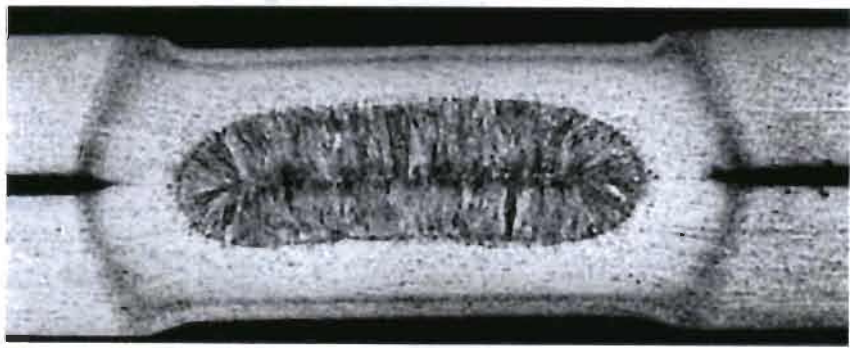


Figura 4.2. Vista transversal de un punto de soldadura.

Características Relevantes:

- La unión es muy precisa
- La unión se realiza a altas velocidades, mayor a una por Segundo.
- Es un proceso que se automatiza fácilmente.
- Control de calidad consistente.
- El proceso es tolerante a variaciones. (Proceso Robusto)
- Tiene algunas limitaciones con los materiales.

En comparación con las soldaduras de arco eléctrico, la soldadura por resistencia no usa gases protectores, fundentes o metal de aporte y los electrodos que conducen la corriente eléctrica durante el proceso no son consumibles.

Principio del Proceso.

La soldadura por resistencia es utilizada para hacer uniones en lugares específicos mediante la aplicación de calor y presión. El calor se genera al hacer pasar una corriente eléctrica a través del material utilizando electrodos de aleaciones de cobre, los electrodos también tienen la función de sostener las piezas y aplicar una presión preestablecida. El calor generado dependerá de la resistencia eléctrica, de la conductividad térmica del metal y el tiempo en que la corriente es aplicada, el calor generado se representa por la siguiente ecuación [J. Norberto Pires, 2007]:

$$E = I^2 \cdot R \cdot t$$

Donde:

E.- Energía en forma de calor

I.- Corriente eléctrica

R.- Resistencia eléctrica del metal

t.- Tiempo en que la corriente es aplicada.

Los electrodos son usados de aleación de cobre, porque, comparado con la mayoría de los metales, el cobre tiene una resistencia eléctrica más baja y una conductividad térmica más alta, esto asegura que el calor será generado en la pieza de trabajo y no en los electrodos, evitando así su desgaste y deformación prematuras. Cuando los electrodos se calientan mucho, se pueden formar marcas de calor sobre la superficie del metal. Para prevenir este problema los electrodos son enfriados con agua, la cual fluye por dentro de los electrodos disipando el exceso de calor.[ASM Handbook Volume 6, 2005]

Una vez que la corriente pasa a través del material vía los electrodos, el calor es generado principalmente en la interfase entre las dos piezas. Con el tiempo el calentamiento funde dicha interfase, el charco de material fundido es contenido por la presión ejercida por los electrodos.

Después de que se suspende la aplicación de corriente el charco de soldadura se enfría bajo la continua presión, produciendo el punto de soldadura de soldadura. La secuencia de operaciones se observa en la Figura 4.3

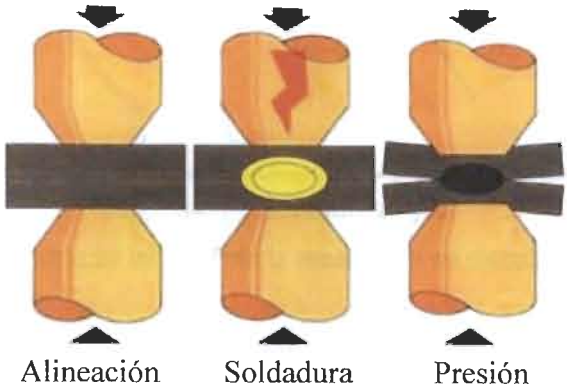


Figura 4.3. Secuencia de operaciones en la soldadura de resistencia eléctrica de puntos.

Variables que Afectan la Soldadura por Resistencia.

CORRIENTE

La corriente eléctrica necesaria para llevar el metal base a soldar, a un nivel en el que pueda mezclarse, dependerá del tipo de material, su espesor y del tiempo en el que se le aplique la corriente. Los niveles de corriente deberán ser apropiados para cada aplicación teniéndose que realizar pruebas en cupones (preajuste) hasta llegar a un nivel apropiado, donde no habrá expulsiones (chispazos por exceso de corriente) o puntos falsos (fríos). El tamaño del punto de soldadura y su resistencia mecánica aumentan al incrementar la densidad de corriente, no obstante una mayor densidad de corriente causará la expulsión del material fundido produciendo huecos internos, agrietamiento, además de

que el calor inmoderado generado por esta energía originara una depresión desmedida en las placas a unir y un rápido desgaste de los electrodos.

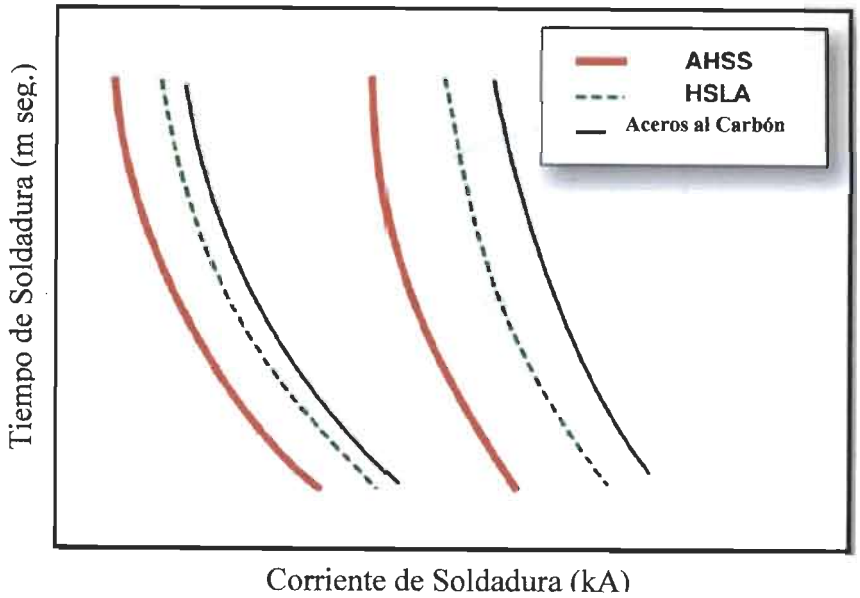


Figura 4.4. Conforme se incrementa la resistencia se disminuye la corriente.

En la formula, $Q = I^2Rt$ la corriente tiene mayor efecto que la resistencia y el tiempo de soldadura en la generación de calor, esta situación se intensifica con la utilización de aceros avanzados ya que a medida que se incrementa la resistencia del acero su capacidad de soldadura disminuye, debido a las nuevas microestructuras existentes .Ver Fig. 4.4, por esta razón la corriente es uno de los parámetros a controlar más importantes para asegurar la calidad en las uniones. El tamaño y resistencia del punto de soldadura se incrementa rápidamente con el incremento en la densidad de corriente. Una excesiva densidad de corriente puede causar la expulsión del material fundido (resultando en porosidad interna), grietas y fracturas de modos no convencionales y en una perdida en las propiedades mecánicas de la unión.

En la soldadura de puntos un exceso de corriente causa un sobrecalentamiento resultando en indentaciones en el metal base y un rápido deterioro de los electrodos. En la Fig. 4.5 se muestra la relación entre el

tamaño del punto de soldadura y la corriente aplicada a un tiempo de soldadura constante.[J. Norberto Pires,2006][II&SI,2006].

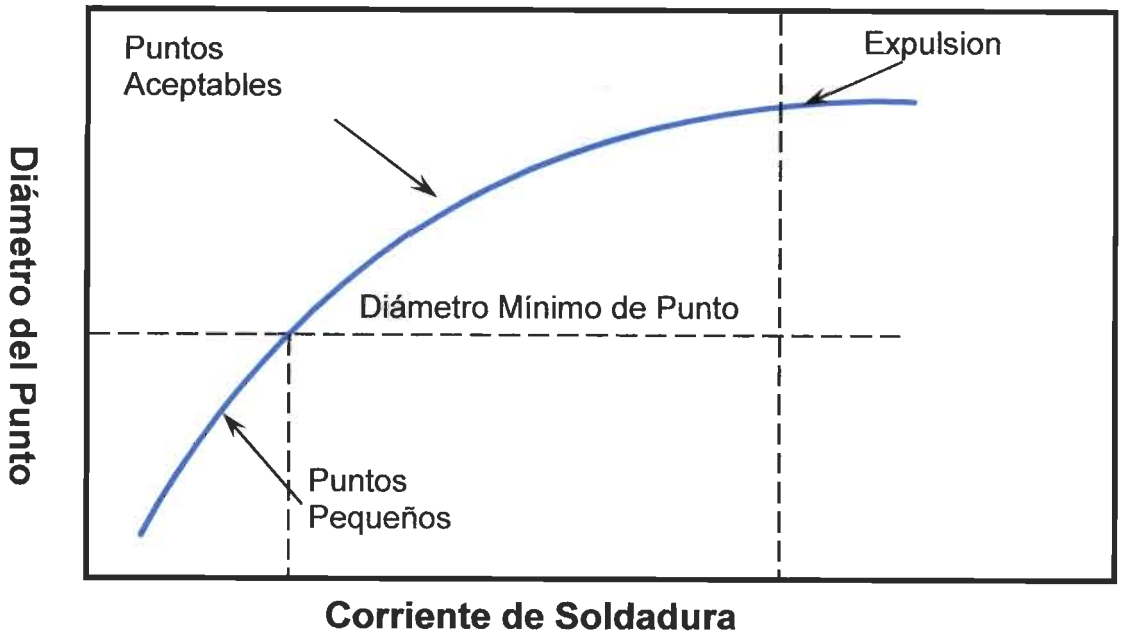


Figura 4.5. Relación entre el Diámetro del Punto y la Corriente de Soldadura en un Tiempo Constante.

El calor perdido hacia la pieza de trabajo incrementa la deformación térmica y aumenta el tamaño de la zona afectada por el calor (HAZ, heat affected zone, por sus siglas en ingles) acrecentando la cantidad de martensita en la microestructura final de las placas unidas. El nivel de corriente requerida para cualquier material es inversamente proporcional a su resistencia eléctrica y térmica. Cuando se unen placas de un material en particular de cualquier espesor, si se incrementa la corriente, el tiempo de soldadura debe de disminuir, para prevenir una identación que dañe el material, expulsión del material fundido o deteriorar los electrodos por el exceso de calor (efecto hongo). La expulsión del material define el limite máximo de corriente que puede ser utilizado para soldar dicho material.

PRESIÓN

Es la fuerza necesaria para mantener juntos y en contacto los materiales a soldar, los dispositivos que proporcionan la presión están acoplados mecánicamente a los electrodos que sujetan las placas de metal. Si se aumenta la fuerza, el área de contacto entre las dos placas crece, como consecuencia se reduce la densidad de corriente, además se disminuye la resistencia de contacto y el efecto calorífico de la corriente será menor. La densidad de corriente se representa por la siguiente ecuación:

$$J = I / A$$

Donde:

J.- Densidad de Corriente.

I .- Corriente en Amperes.

A.- Área de Contacto en mm^2.

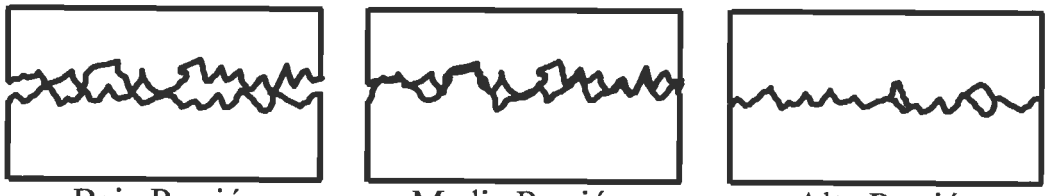


Figura 4.6. Superficie del Material Sometida a Diferentes Presiones

La explicación a este fenómeno es que la superficie de los metales a unir esta compuesta por picos y valles, si se le aplica una leve carga el área de contacto entre estos será pequeña y la resistencia al paso de la corriente aumentará, en cambio si se aumenta la presión aplicada los picos se aplastaran y el área de contacto entre las placas a soldar y el electrodo aumentara reduciendo el esfuerzo al paso de energía y la densidad de corriente. Por lo que se tendrá que incrementar el nivel de corriente para tener una buena soldadura, como ya sabemos el calor generado depende de la resistencia de los

materiales. "Entre mayor sea la presión, mayor deberá ser la corriente aplicada ya que la resistencia del contacto entre las dos placas a soldar será menor". Ver Fig. 4.6.

La resistencia al contacto por lo menos durante las primeras etapas de la soldadura es considerablemente mayor que la resistencia total del material, si el material está limpio y está unido únicamente con varios puntos de empalme, la suma de las áreas de los picos y valles que están en contacto es solo una pequeña fracción de lo que se pensaba era el área total de contacto, dada la relación entre el área de contacto y la presión aplicada, "La resistencia es inversamente proporcional a la fuerza de contacto del electrodo", sabemos que incrementar la fuerza del electrodo induce a la reducción del diámetro de soldadura, esto ocurre por que una menor resistencia al contacto implica menor generación de calor durante la soldadura. La fuerza del electrodo debe ser incrementada cuando se incrementa la corriente, de no ser así una parte del material fundido puede ser expulsado del punto de soldadura. [ASM Handbook Volume 6, 2005][J. Norberto Pires,2006]

TIEMPO

Otra variable importante de este proceso es el tiempo de soldadura. Un punto exitoso es producido solamente si se tiene un apropiado balance entre la corriente y el tiempo de soldadura. El calor total generado es proporcional al tiempo de soldadura, conforme se incrementa el tiempo, el diámetro del punto también se incrementa, un largo tiempo de soldadura tendrá el mismo efecto que un excesivo amperaje en el metal base y en los electrodos, además de que la zona afectada por el calor será mayor debido a la perdida de calor por conducción que se da hacia dentro de las placas a soldar. [ASM Handbook Volume 6, 2005]

El tiempo de soldadura es la duración que tendrá el impulso de corriente que calentará el material, este tiempo generalmente se mide en ciclos. Los equipos

de soldadura por resistencia trabajan con una frecuencia de 60 Hz, que equivalen a 60 ciclos por segundo, por lo que un ciclo durara 1/60 = 0.1666 seg. Una reducción en el tiempo de soldadura, puede no afectar la calidad del punto de soldadura si la corriente de soldadura y la presión a la que las placas son sometidas aumentan.

El calor total necesario para la formación de un punto de soldadura de un diámetro esperado, puede variarse ajustando ya sea la corriente o el tiempo de soldadura como se muestra en la Figura 4.7.

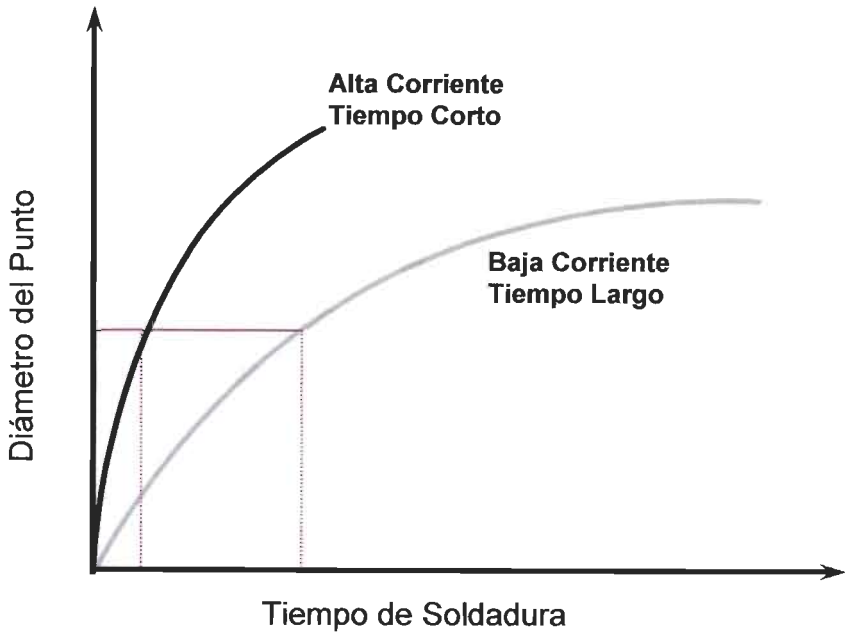


Figura. 4.7. Relación entre el Diámetro del Punto y el Tiempo de Soldadura.

En el proceso de soldadura por resistencia se pueden medir cuatro tiempos diferentes:

Tiempo de Presión es el intervalo de tiempo entre la aplicación inicial de la fuerza de los electrodos y la primera aplicación de corriente. El tiempo de presión es necesario para alinear las placas a soldar hasta que la fuerza del electrodo haya alcanzado el nivel deseado.

Tiempo de Soldar es el tiempo durante el cual es aplicada la corriente de soldadura sobre las piezas de trabajo a soldar. Es medida en ciclos de línea de voltaje, como lo son todas las funciones de tiempo. Un ciclo es 1/60 de segundos en un sistema de 60 Hz. de potencia.

Tiempo de Sostenido es el tiempo durante el cual la fuerza de los electrodos es mantenida en la pieza de trabajo después de que el último impulso de corriente de soldadura cesa. El tiempo de sostenido es necesario para permitir al botón de soldadura solidificar antes retirar la presión sobre las piezas soldadas.

Tiempo de Pausa Es el tiempo durante el cual los electrodos están desconectados del trabajo. El término es aplicable solamente donde el ciclo de soldadura es repetitivo

MATERIAL Y CONDICIONES SUPERFICIALES

La mayoría de los metales comunes pueden ser soldados por resistencia, las excepciones principales son la plata, cobre, plomo y zinc, esto debido principalmente a su alta conductividad eléctrica y térmica. Las condiciones superficiales de los materiales a soldar, que requieren observación y control son:

Oxidación: Esta condición de los materiales genera graves problemas al realizar la soldadura, ya que la película de oxido evita el contacto pleno entre las láminas y provoca un chispazo (explosión) muy fuerte, que puede dañar el equipo y producir puntos falsos.

Suciedad: Un material con polvo pegado, se comporta como el caso anterior. La suciedad puede ser también pinturas o etiquetas que provocaran un chispazo debido al falso contacto entre el electrodo y la placa a soldar y como consecuencia una falta de fusión, diámetros pequeños o fracturas en el punto de soldadura.

ELECTRODOS

Los electrodos son las piezas metálicas por las que pasa directamente la corriente eléctrica a los materiales que se van a soldar, así mismo los mantiene unidos para soldarlos. Los electrodos deben tener una alta conductividad eléctrica para mantener el calor generado internamente al mínimo y alta conductividad térmica para disipar rápidamente el calor generado en las zonas de contacto del material, además de tener una buena resistencia mecánica a la deformación física que le ocasiona la alta fuerza que aplica al presionar las placas.

En la actualidad en las prácticas en la industria automotriz existe una amplia variedad de geometrías de electrodos disponibles, cada estilo tiene características de desempeño diferentes que afectan la distribución del calor y el tamaño y geometría final del punto de soldadura, para evitar una gran variación en los resultados existen técnicas como la modelación por elemento finito que ayudan a predecir los resultados que se obtendrán con cada geometría. Ver Fig. 4.8.

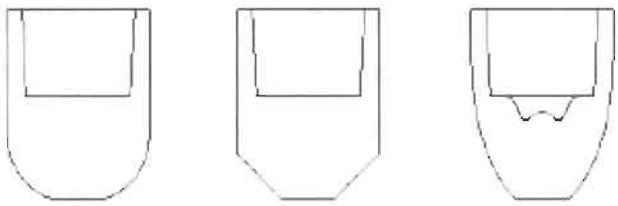


Figura 4.8. Diferentes Geometría de los Electrodos.

Debido a que los electrodos están en contacto directo con el material a soldar, reciben altas temperaturas y esfuerzo físico, deben estar sujetos a una observación continua, de tal modo que se detecten problemas antes de que se generen problemas de calidad (efecto hongo).

El efecto de la presión aportada por los electrodos en la formación y tamaño del punto de la soldadura esta controlado indirectamente por la fuerza aplicada por

el electrodo, conforme se incrementa la presión la distancia entre las placas a unir disminuye deformando las asperezas que presenta la superficie del material, lo que provoca un aumento en el área de contacto, esto induce a la formación de puntos de soldadura pequeños reduciendo las propiedades mecánicas como la ductilidad y resistencia. [ASM Handbook Volume 6, 2005] [X.Q. Zhang, 2006][Z. Han, 1990]

Es importante tener en cuenta antes, durante y después de la soldadura algunas características de los electrodos como son:

Aleación: Determina su resistencia física, conductividad térmica y eléctrica, la selección de alguna aleación en específico dependerá de la aplicación (proceso) y de la relación costo - beneficio.

Forma Física: Cuando estamos soldando dos piezas de la misma composición química y del mismo espesor, el diámetro de los dos electrodos será el mismo. Sin embargo si las piezas de trabajo son de diferentes composiciones o espesores, los diámetros de los electrodos deben de ser diferentes para mantener el balance calorífico aplicado en las dos piezas. El diámetro del punto de soldadura es ligeramente más pequeño que el diámetro del área de contacto, por lo que se debe de cuidar el efecto Hongo ya que al aumentar el área de contacto, el diámetro del punto de soldadura aumentará también. Sin embargo un incremento del 5% en el diámetro del área de contacto generará soldaduras de mala calidad ya que la densidad de corriente disminuirá y el calor generado será insuficiente para producir una buena unión.

5.

ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA. (AHSS)

En los últimos años se han hecho importantes descubrimientos de nuevos aceros y sus procesos de manufactura. Para producir vehículos más ligeros y seguros, las grandes armadoras de automóviles buscan la aplicación de los aceros AHSS como la llave para lograrlo. Ver Fig. 5.1. [II&SI,2006]

Al seleccionar los aceros de alta resistencia para reemplazar los aceros suaves usados actualmente en la industria, la reducción en la formabilidad y soldabilidad son a menudo las consecuencias incómodas. Para superarlo y lograr estructuras más ligeras los estudios recientes están enfocados a lograr aceros con mayor formabilidad, buena resistencia y que sean fáciles de unir.

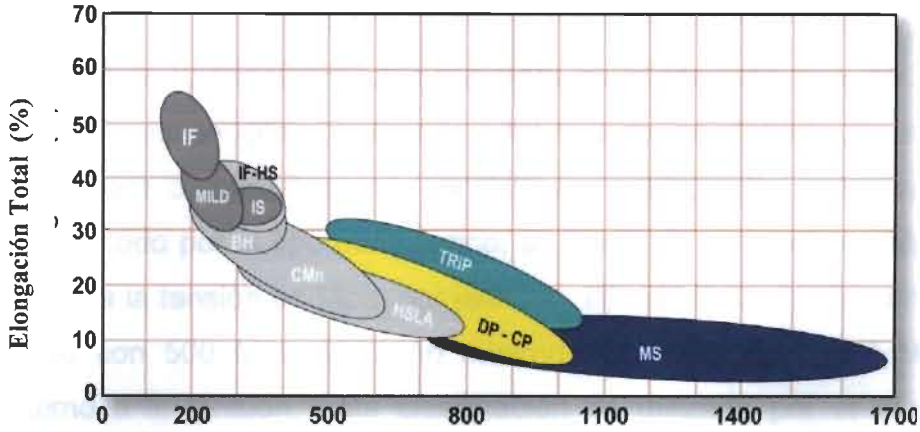


Figura 5.1. Propiedades de los aceros doble fase vs. Otros tipos de aceros.

Con el incremento en la demanda de autos más eficientes en el consumo de combustible, nuevos materiales han sido considerados sobre otras estrategias por su ligero peso y su resistencia superior con el objetivo de disminuir la masa del vehiculo logrando una reducción en el consumo de combustible. Por esta razón los aceros avanzados (AHSS) están siendo investigados para sustituir los que actualmente están en uso, aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), el aluminio es otra opción pero su uso en la industria automotriz se ha limitado debido a sus altos costos y a la dificultad en el formado y soldadura del mismo. Los aceros avanzados se obtienen por un enfriamiento controlado desde una temperatura en la región ínter crítica seguido de una transformación de austenita a martensita que varia dependiendo de los diferentes elementos de aleación. [II&SI,2006][M. Marya, 2005]

Metalurgia de los Aceros Avanzados (AHSS).

La metalurgia fundamental de los aceros convencionales de baja y alta resistencia es bien conocida por los manufactureros y los usuarios de este tipo de productos. Puesto que la metalurgia y el proceso de los aceros AHSS son algo nuevo comparado con los aceros convencionales, los aceros avanzados de alta resistencia, se describen a continuación para una mejor comprensión de cómo se obtienen sus extraordinarias propiedades mecánicas.

Debido a que la terminología utilizada para clasificar este tipo de aceros presenta variaciones en diferentes partes del mundo, se definió una manera representativa para clasificarlos, que consiste en lo siguiente; cada grado de acero es identificado por el tipo metalúrgico, su punto de cedencia en Mpa y el esfuerzo ultimo a la tensión en Mpa; por ejemplo, DP 500/800 significa un acero de doble fase con 500 Mpa de punto mínimo de cedencia y 800 Mpa de esfuerzo ultimo a la tensión. Esta clasificación es utilizada por el programa ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts). La

tabla 5.1 ilustra el rango de los aceros avanzados utilizados por la ULSAB-AVC en la construcción de autos concepto.[II&SI, 2006]

Steel Grade	YS (MPa)	UTS (MPa)	Tot. EL (%)
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

Tabla 5.1. Ejemplos de los diferentes grados de aceros usados por la ULSAB-AVC
YS: Punto de Cedencia, **UTS:** esfuerzo ultimo a la tensión, **Tot. EL:** Elongación Total.

Los aceros avanzados tienen diferentes microestructuras finales. Los aceros avanzados de Doble Fase consisten en ferrita - martensita y sus propiedades mecánicas dependen de la fracción de martensita y del tamaño de grano ferritico, los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP) consisten en ferrita, bainita y austenita; la austenita retenida juega un papel muy importante en este tipo de aceros ya que cuando son sometidos a deformación en frió la austenita retenida transforma a martensita acompañado de una gran elongación, como consecuencia muchas de las partes de los nuevos modelos de autos son hechas con aceros avanzados ya que con placas más delgadas de estos aceros se logra eficientar el combustible sin sacrificar resistencia al disminuir el peso del automóvil.[Xin Long, 2006]

En los años recientes se han visto desarrollos importantes en la tecnología del acero y los procesos de manufactura, A la par de los aceros de Doble Fase otros tipos de aceros avanzados están siendo utilizados por la industria automotriz, USLAB- AVC (UltraLight Steel Auto Body – Advanced Vehicle Concepts), para reducir el peso del vehiculo y aumentar su eficiencia y seguridad al mismo tiempo; a continuación se mencionan brevemente cada uno de ellos:

Aceros TRIP (Transformation Induced Plasticity).

La microestructura de los aceros TRIP consiste en alrededor de un 5% de austenita retenida contenida en una matriz ferrítica como mínimo, también existen fases duras como la martensita y bainita en pequeñas cantidades. Las grandes cantidades de carbono y elementos de aleación como el silicio en los aceros TRIP promueven la formación de mayores cantidades de austenita retenida en la microestructura final. Durante un proceso de deformación, las fases duras que se encuentran dispersas en la matriz ferritica presentan un efecto de endurecimiento secundario por trabajo en frió, este fenómeno también se presenta en los aceros de doble fase, sin embargo en aceros TRIP la austenita retenida también transforma a martensita incrementando la resistencia y sus propiedades mecánicas. Los aceros TRIP utilizan mayores cantidades de carbono que los aceros de Doble Fase para estabilizar la austenita a temperatura ambiente, también se adicionan altos contenidos de silicio y aluminio para acelerar la formación de la ferrita y bainita, además de que estos elementos mantienen los altos contenidos de carbono en la austenita evitando así la precipitación de carburos durante la transformación bainitica.

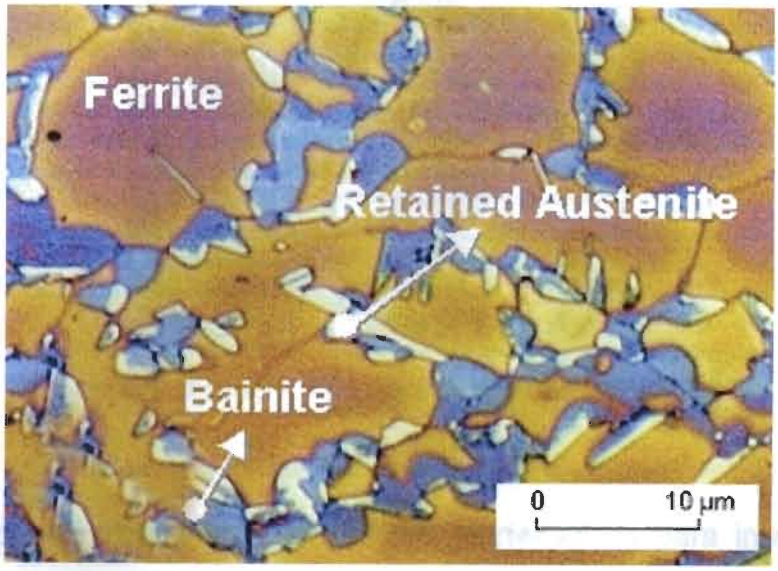


Figura 5.2. Microestructura típica de un acero TRIP.

Aceros de Fase Compleja (CP)

La microestructura de los aceros de fase compleja contiene pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita; todo dentro de una matriz de ferrita/bainita. La micro estructura de grano refinado que presenta este tipo de aceros es obtenida por una re-cristalización retardada o por la precipitación de elementos de aleación como el titanio y el niobio, en comparación con los aceros de Doble Fase, los aceros de Fase Compleja muestran un mayor punto de cedencia cuando son sometidos a los mismos esfuerzos de tensión, los aceros CP también se caracterizan por su alta absorción de energía.

Aceros Martensíticos (MS)

Para crear aceros martensiticos, la austenita original debe transformar casi completamente a martensita, estos aceros son caracterizados por una matriz martensítica con contenidos de ferrita o bainita en muy pequeñas cantidades, el grupo de los aceros martensiticos muestran las mas altas resistencias a la tensión mayores que 1700 Mpa. Estos aceros son sometidos a un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos para mejorar su ductilidad, sus propiedades de formado y soldado.

Figura 5.3. Microestructura típica de un acero Martensitico.

El carbono es adicionado a los aceros martensiticos para incrementar su dureza y resistencia, además de diferentes elementos de aleación como el manganeso, silicio, cromo, boro, vanadio, molibdeno y níkel son adicionados en

diferentes combinaciones para aumentar la dureza del acero. Los aceros martensiticos son producidos desde la fase austenitica mediante un templado severo que transforma la mayor parte de la austenita en martensita, algo similar sucede con los aceros CP pero en este caso (MS) la química es ajustada para producir menos austenita retenida.

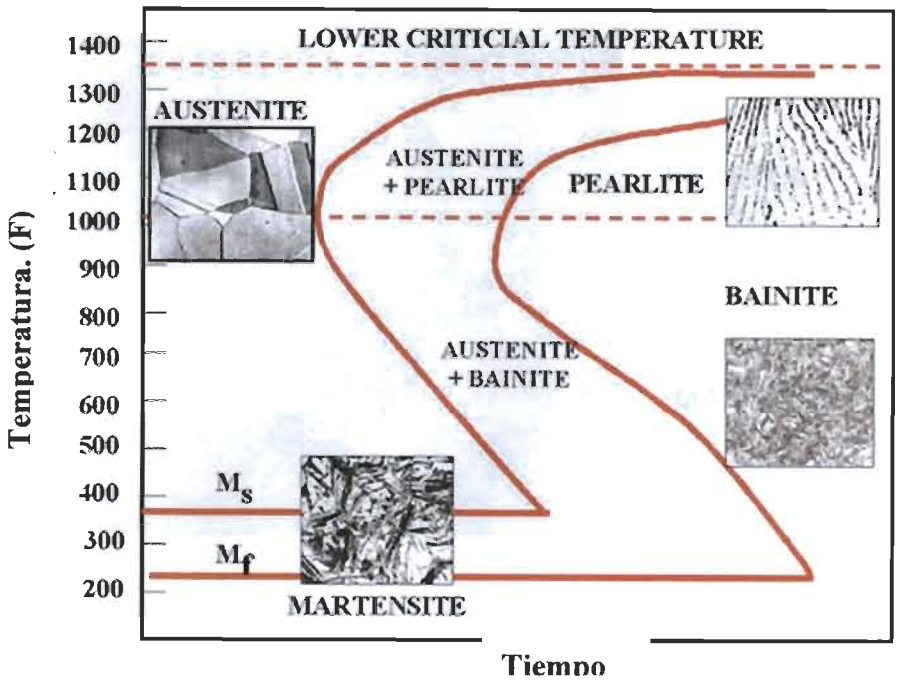


Figura 5.4. Temperaturas criticas a las que obtenemos las diferentes estructuras.

Los materiales mencionados anteriormente pueden ser soldados por varios procesos, no obstante, la soldadura por resistencia eléctrica de puntos sigue siendo el principal proceso utilizado en la industria automotriz, un vehículo puede contener más de 3000 puntos de soldadura, debido a las placas tan delgadas es importante investigar los parámetros de calidad para la soldadura de este tipo de aceros en las zonas de reducción de espesor en la placa en donde puede fallar por fatiga u otros modos de falla en los aceros avanzados.[II&SI, 2006][ANSI/AWS/SAE/D8.9, 2002][M. Mayra, 2005]

Aceros Doble Fase.

Son aceros de bajo contenido en carbono con estructura en dos fases (ferrítico-martensítica) que combinan de forma óptima la alta resistencia a la tracción propia de la martensita y la buena ductilidad que nos brinda la matriz ferritica. Ver Figura 5.5.

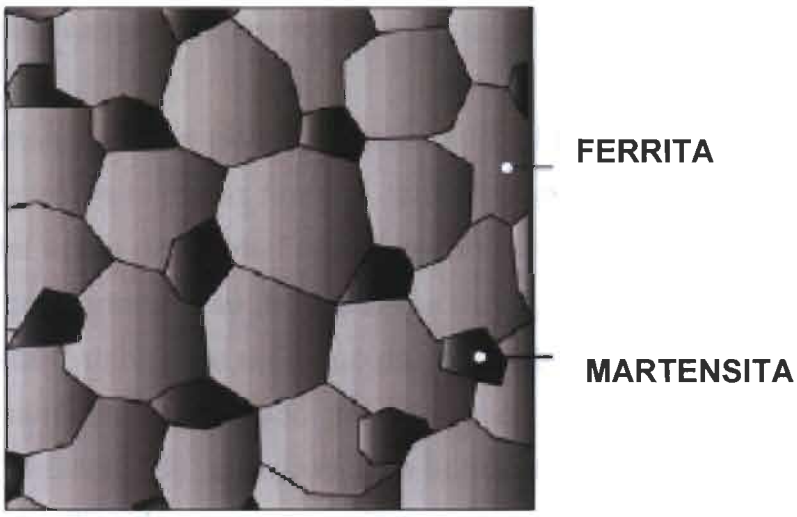


Figura 5.5. Esquema de la microestructura de un acero doble fase. La micro estructura consiste en un fina matriz ferritica con una distribución uniforme de aproximadamente el 20% de martensita, austenita retenida y bainita.

Esquema de la microestructura de un acero de doble fase, consiste en una matriz ferrítica con islas de martensita dispersas. La fase suave de ferrita está acomodada generalmente de manera continua, dando a este tipo de aceros una excelente ductilidad. Cuando estos aceros son deformados la tensión se concentra en la fase ferrítica que rodea las islas de martensita, dando lugar a un extraordinario endurecimiento por deformación que sólo se presenta en este tipo de aceros. [M. Mayra, 2005][Jay Baron, 2006] [II&SI, 2006] [Wey Tong, 2005]

En Aceros de doble fase el carbono permite la formación de martensita con diferentes velocidades de enfriamiento, incrementando la dureza del acero. Los

elementos de aleación como el Manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel agregados solos o en combinación también incrementan la dureza del material, la adición de estos elementos de aleación es cuidadosamente balanceada para obtener las propiedades mecánicas deseadas, además de no perder sus características de soldabilidad para el proceso de soldadura por resistencia eléctrica de puntos, sin embargo, cuando se unen dos placas del máximo grado de resistencia, la soldabilidad del punto requerirá variaciones en el proceso para obtener los resultados esperados.

Como la martensita es la fase más resistente, al incrementarse el volumen de esta fase dentro de la matriz ferrítica, también se incrementará la dureza y la resistencia del acero de Doble Fase, desafortunadamente si se incrementan los contenidos de martensita se reduce la ductilidad, por esta razón el volumen de esta fase está restringido a un rango del 10 al 20%. (Fig. 5.6) El contenido de martensita también es afectado por la adición de algunos elementos de aleación como el Silicio (Si), que promueve la migración de carbono de la fase ferrítica a la austenítica, lo que genera un aumento en el contenido de carbono en esta fase, las propiedades de un acero son gobernadas por la cantidad de soluto al momento de la solidificación, generalmente carbono. La presencia de este elemento altera las temperaturas a las cuales la solidificación y las transformaciones de fase comienzan.

La transformación de la austenita a ferrita durante el enfriamiento es una de las transformaciones mas importantes en un acero, el control de este proceso es la base para los tratamientos térmicos de endurecimiento del acero. Esta transformación ocurre en aceros entre los límites de A3 Y A1 (1333 ºF [723 ºC]), Ver Fig. 5.8, la austenita puede disolver hasta 2.0% de carbono en solución sólida, mientras que la ferrita solo disuelve 0.025%, lo que favorece a la aparición de aceros de doble fase mediante un proceso de recocido seguido de un rápido enfriamiento, evitando la difusión de carbono para formar la fase

martensita que disuelve el mismo contenido de carbono que la austenita en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct).[M. S. Rashid, 1981]

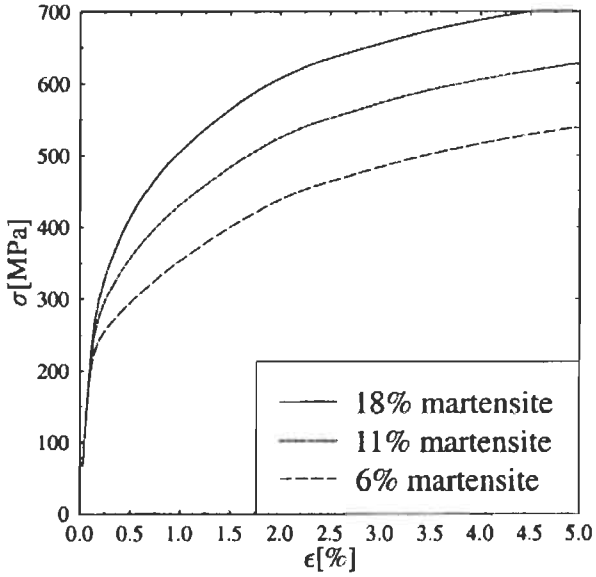


Figura 5.6. Por ciento de Martensita vs. Esfuerzo Mpa.

El alto endurecimiento por deformación sumado a la excelente ductilidad proporciona a los aceros de doble fase una mayor resistencia a la tensión que los aceros convencionales con igual punto de cedencia. El acero DP tiene un mayor endurecimiento por deformación al inicio de la prueba, una mayor resistencia a la tensión y un menor punto de cedencia que el acero HSLA. Ver Figura 5.7.

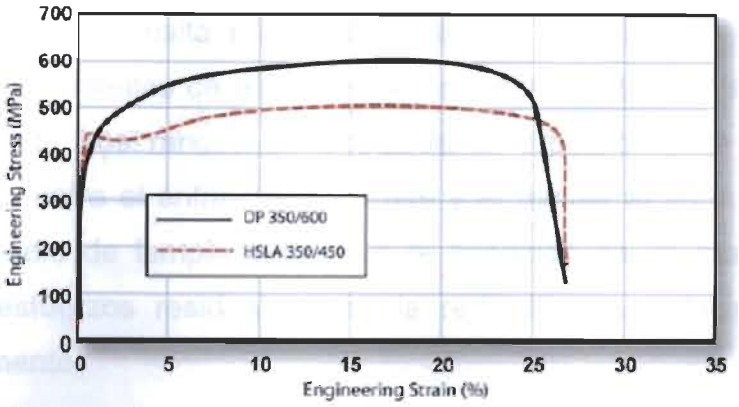


Figura 5.7. Comparación de las curvas esfuerzo deformación de un acero HSLA vs. DP.

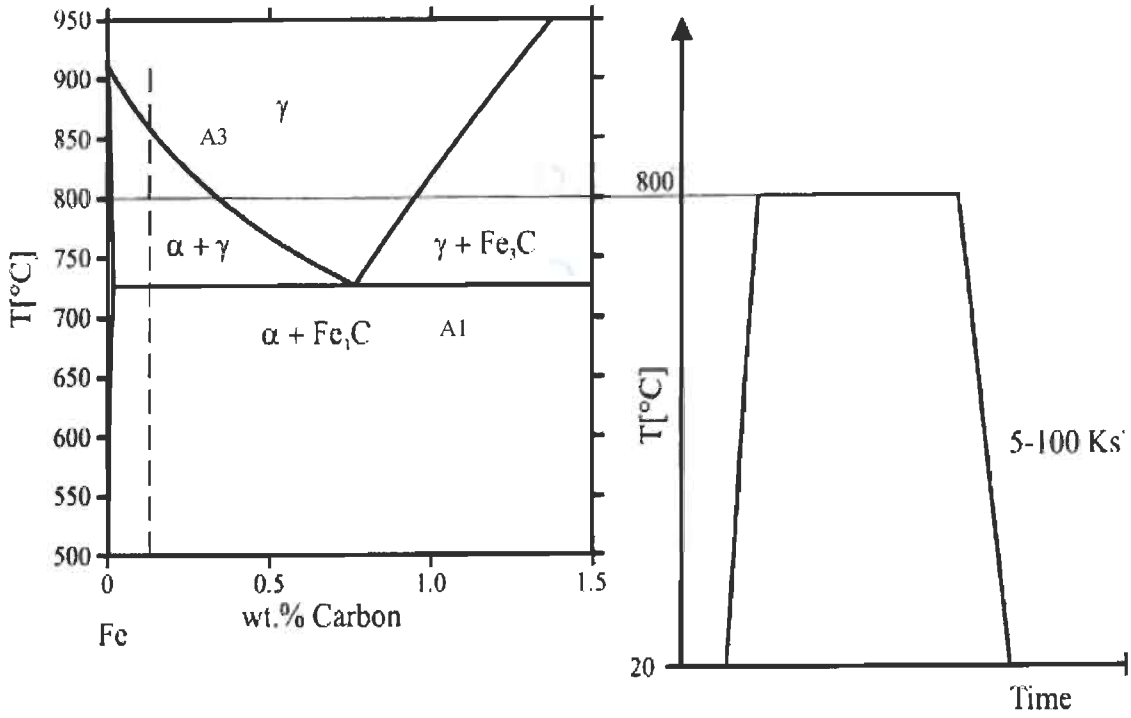


Figura 5.8. Diagrama aceros Doble Fase.

El término aceros doble fase, se refiere a que predominan dos principales fases, cúbica centrada en el cuerpo (bcc) ⇨ *ferrita* y la fase dura tetragonal centrada en el cuerpo (bct) martensita. Estas dos fases son producidas por un recocido realizado desde la temperatura "ínter critica" 800° C, A1-A3, donde la ferrita y la austenita están formadas y son estables, seguido de un rápido enfriamiento (templado) que forzará a la austenita a transformar en martensita. La cantidad de martensita en la matriz ferrifica es ajustada con el correcto control de los elementos de aleación y el correcto control de las temperaturas de enfriamiento. Los rangos de enfriamiento utilizados para producir estos aceros están entre el enfriamiento al aire y el temple al agua, una severidad alta en el medio de temple inducirá a la aparición de un mayor número de defectos y esfuerzos residuales en la red lo que reducirá la ductilidad significativamente.

6.
CONTROL DE CALIDAD

La llave para lograr una buena calidad en las uniones soldadas por RSW es controlar el proceso y los materiales. Existe e una gran cantidad de factores que afectan la formación del punto de soldadura, por esta razón es importante señalar las condiciones de soldadura, con las tolerancias razonables que se pueden presentar durante el proceso. Además de controlar las variables secundarias con el propósito de disminuir la variación durante la unión.

El material por si mismo es la primera consideración. Debemos asegurarnos del grado del material a soldar, si presenta algún recubrimiento, su tipo y espesor además de que la superficie se encuentre libre de contaminación.

Mantener el equipo de soldadura en buenas condiciones poniendo especial cuidado con las herramientas y con los electrodos. Un buen control de los parámetros de soldadura no serviría de nada si los electrodos no están bien alineados o si el área de contacto no es la adecuada. Establecer un buen sistema de enfriamiento de los electrodos es también importante para minimizar su desgaste y deformación.

Conservar los registros, del desempeño del equipo, revisando parámetros como la fuerza de los electrodos y la corriente de soldadura; ejemplo, llevar un registro diario de las pruebas destructivas y no destructivas realizadas así como

los parámetros que se utilizaron para realizar estas uniones, para tratar de identificar por que se producen desviaciones y corregir estos puntos.

Existe una gran cantidad de métodos de inspección y prueba para la soldadura por resistencia, que podemos clasificar en dos grupos los ensayos destructivos y los ensayos no destructivos, estos últimos utilizados en temas de investigación principalmente por la complejidad que representa aplicarlos en planta.

PRUEBAS DESTRUCTIVAS.

La prueba destructiva mas utilizada en la industria automotriz para verificar la integridad de la soldadura es la **prueba de cincel**, que consiste en introducir un cincel entre las dos laminas y golpearlo con un martillo hasta causar el desprendimiento de una de las placas y un hoyo en la contraparte, el botón resultante será medido y comparado con los parámetros esperados para revisar si cumple con la especificación del tamaño promedio. Ver Fig. 6.1, esta prueba es confiable cuando se aplica en uniones de placas de aceros convencionales, con la aplicación de aceros avanzados de altas resistencias el desprendimiento del botón será de modos diferentes y es necesario implementar nuevas maneras de monitorear el control de calidad de las uniones y establecer nuevos patrones a seguir.

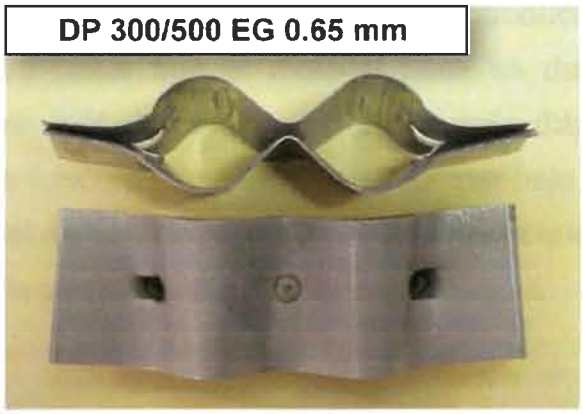


Figura 6.1. Prueba de Cincel Destructiva.

La **prueba de pelado** consiste en colocar un extremo de una lámina en un banco y sujetarla, después con unas pinzas se estira la otra lámina hasta lograr desprender una de las dos y se mide el diámetro del botón de la misma manera que en la prueba de cincel. La prueba de pelado y de cincel utilizadas para probar la calidad de las uniones soldadas por resistencia en aceros avanzados producen fractura en el metal base, este tipo de fracturas se vuelven mas comunes conforme incrementamos el espesor de las placas a soldar y su resistencia. Este tipo de fracturas están acompañadas de una ligera distorsión en el material base adyacente al punto de soldadura. [ANSI/AWS/SAE/D8.9, 2002][ANSI/AWS/D8.7, 2005]

Figura 6.2. Prueba de Pelado Destructiva.

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Las laminas delgadas también pueden ser inspeccionadas utilizando el método no destructivo de cincel, que consiste en introducir el cincel entre los puntos de soldadura hasta que el material base se deforme sin llegar al desprendimiento este método nos revela el supuesto diámetro del punto de soldadura. Una mala fusión o punto frió deberá romper bajo esta prueba, si esto no sucede el material deformado solo se martillea hasta que recupera su forma normal sin inutilizar la pieza. Ver Fig. 6.3

Antes de utilizar este tipo de pruebas para remplazar una prueba de cincel destructiva en un nuevo componente o material, se deben de correr pruebas destructivas y revisar los resultados contra la prueba no destructiva.

Figura 6.3. Prueba de Cincel no Destructiva.

Pruebas No Destructivas Aplicables a la Evaluación de Calidad en el Proceso RSW.

El campo de los ensayos no destructivos es amplio y diverso, antes de entrar de lleno en el ultrasonido es conveniente mencionar los diferentes ensayos aplicables al proceso, los ensayos no destructivos son métodos físicos indirectos, que no dañan o alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material, parte o componente sujeto a inspección.

Los ensayos no destructivos generan beneficios en distintas áreas de la empresa:

Producción

- Reducen costos de producción aplicados correctamente.
- Reducen la entrada de materia prima defectuosa.
- Reducen tiempos muertos en proceso.
- Aumentan la productividad sin aumentar la capacidad técnica instalada.
- Permiten detectar errores en cualquier paso del proceso.
    - Mal maquinado
    - Defectos de soldadura

Mantenimiento

- Ayudan a predecir el estado del equipo o material inspeccionado.
- Ayudan a programar las fechas más convenientes de reparación.
- Aumentan la seguridad de las reparaciones.
- Permiten vigilar la vida remanente de los materiales.
- Reducen los riesgos de accidentes.
- Reducen los paros imprevistos.

Aseguramiento de la Calidad

- Ayudan a reducir el recibir materias primas defectuosas.
- Ayudan a conocer y corregir los defectos ocasionados en la fabricación.
- Permiten mejorar la confiabilidad del producto.
- Ayudan a reducir los costos de otros tipos de inspección.

Los aceros doble fase es un nuevo tipo de acero desarrollado principalmente para su uso en la industria automotriz, que ayuda a cumplir con los objetivos como lo son automóviles más ligeros, más seguros y más económicos, pero su uso se ha visto limitado por las dificultades que representa soldarlo. Por esta dificultad el entendimiento de las relaciones que existen entre las variables del proceso y los aspectos metalúrgicos que ocurren durante la formación del punto de soldadura se han vuelto importantes.

El uso de estas pruebas no destructivas no eliminará las evaluaciones destructivas que se llevan a cabo en los laboratorios, pero si ayudarán a tener un mejor entendimiento de lo que pasa durante la soldadura, a la par de reducir los costos en los que se incurre cuando se destruye una pieza de trabajo.

Existen un gran número de ensayos no destructivos como lo son la inspección por rayos X, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, así como algunas herramientas como son elemento finito, software de simulación y redes

neuronales, no obstante el ensayo no destructivo que presenta las mejores características es el ultrasonido, ya que detecta el diámetro y espesor de la soldadura, además de defectos internos como lo son los huecos, grietas y faltas de fusión, es también fácil de implementar por su fácil acceso y por la gran variedad en las geometrías de los transductores que se ajustan al tamaño de las uniones. Ver Fig. 6.4.

Ultrasonido

En la industria del automóvil la unión de materiales metálicos mediante puntos de soldadura es uno de los procesos más importantes.

Una practica común para determinar la calidad de un punto de soldadura es utilizar ensayos destructivos, donde se desprende una placa de otra para determinar la presencia y tamaño del punto de soldadura, debido a que la prueba es destructiva no es reproducible y es imposible establecer una correlación entre los resultados obtenidos y la producción en masa, además de de que estas pruebas representan un elevado costo, para asegurar la calidad de las uniones la industria automotriz ha tratado de desarrollar métodos de evaluación no destructiva desde 1967.

A pesar de que el proceso de soldadura por resistencia es uno de los mayormente utilizados en la industria automotriz y de los elevados costos de producción que representan los ensayos destructivos, muy pocos métodos no destructivos son utilizados, el método de ultrasonido es conveniente por la garantía de calidad que brinda en procesos en serie así como la reducción de tiempo de inspección y de material desperdiciado. El método de Ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas eléctricas (sonido) a través de los materiales mediante un sensor que contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el

rango de los 0.5 y 25 MHz (inaudible al oído humano). [ASM, Advanced Materials & Processes, 2007] [ASM Handbook Volume 17, 2005]

El principio de la prueba no destructiva de ultrasonido se basa en que los materiales son buenos conductores de las ondas de sonido. Sin embargo las ondas no solo son reflejadas por las interfaces en el material si no también por los defectos o discontinuidades internas que se encuentran en la estructura del mismo.

El ultrasonido al entrar en un material, viaja por el, lo atraviesa y regresa al punto de origen, se atenúa o se dispersa, el viaje ultrasónico, en su interacción con los materiales, genera información útil acerca de distintos aspectos del material que atraviesa. En su viaje el ultrasonido interactúa con el material y se transforma por que el ultrasonido no transita libremente ya que el material opone una resistencia, esta resistencia varía y depende de:

La velocidad de propagación del ultrasonido y
La densidad del material a través del que el ultrasonido viaja.

El producto de esta resistencia se puede medir y el resultado se puede interpretar, el ultrasonido tiene un comportamiento si el material que atraviesa es uniforme; pero este comportamiento varia si el material presenta anomalias, el equipo detecta y registra estas variaciones y el inspector puede analizar e interpretar esta información.

El efecto de interacción entre las ondas de sonido y el material es mayor a una menor longitud de onda, esto se da cuando se utiliza una mayor frecuencia de onda. La longitud de onda se representa con la siguiente ecuación:

$$\lambda = c / f$$

Donde:

c.- Velocidad del Sonido [km/s]

f.- Frecuencia [Mhz]

λ.- Longitud de Onda [mm]

Esto significa que las ondas de ultrasonido deben ser usadas en el rango de frecuencias que va desde 0.5 hasta 25 MHz. Con frecuencias menores el efecto de interacción entre las ondas y las discontinuidades internas del material será muy baja y se volverán cuestionables los resultados de la prueba.

El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propagan a través del material hasta que pierde por completo su intensidad (atenuación) ó hasta se encuentran con una interfase o discontinuidad, es decir algún otro material tal como el aire o el agua, y como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción o distorsión. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales. El sensor se coloca en la indentacion causada por el punto de soldadura, se hacen pasar los pulsos eléctricos y los resultados se muestran en una pantalla, se necesita experiencia y conocimiento para interpretar las señales en términos de calidad.

La prueba de Ultrasonido ha sido probada en algunas aplicaciones en la industria automotriz y se ha comprobado que es un buen indicador del diámetro de la soldadura, del espesor de la soldadura, discontinuidades internas y de otras variables que afectan la calidad de la unión como son faltas de fusión, chisporroteo y huecos formados en zona de contacto entre las dos placas soldadas.

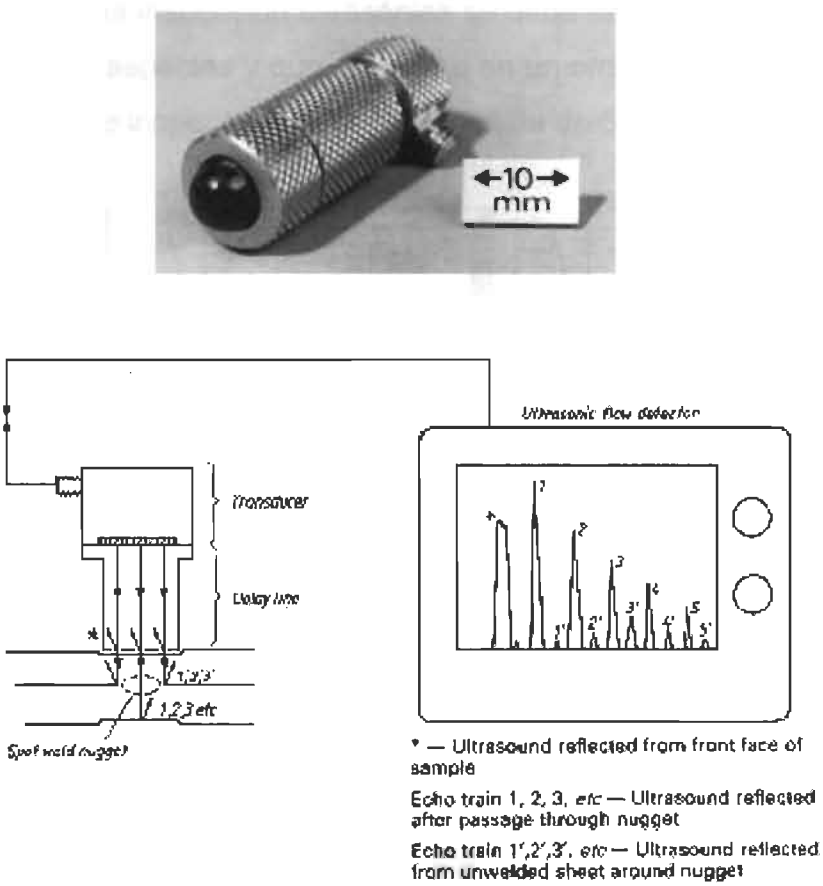


Figura 6.4. Ultrasonido aplicado en soldadura por resistencia eléctrica de puntos.

Se necesita entrenamiento especial para poder interpretar los resultados mostrados en la pantalla.

La prueba es de fácil acceso ya que solo se necesita un solo lado, además de que los sensores o probadores son fáciles de manipular, y tienen un diámetro de alrededor de 15 mm. y una longitud de 50 mm. Para poder hacer una predicción precisa mediante ultrasonido se deben conocer las dimensiones del punto, las cuales son determinadas por el tiempo de transito y la atenuación de los ecos de la onda que es propagada a través del punto de soldadura. El tiempo de transito de los ecos determina el diámetro de la soldadura, después de determinar el diámetro de la soldadura el espesor de la misma puede ser determinado con las características de atenuación del sonido los ecos disminuyen su intensidad conforme se incrementa el espesor de la soldadura.

Para realizar una inspección ultrasónica se debe seguir un proceso en el que intervienen varios aspectos y que se realiza en un orden y forma específicos. El proceso general de inspección ultrasónica consta de 5 subprocesos:

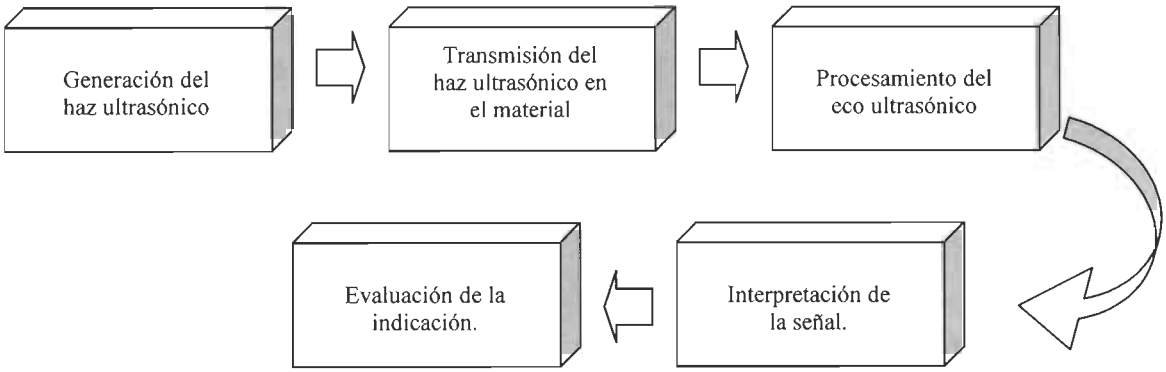


Figura 6.5. Proceso para una Inspección Ultrasónica.

Los subprocesos de la inspección ultrasónica constan de las siguientes etapas.

Generación del haz ultrasónico.

1. El equipo ultrasónico genera pulsos eléctricos
2. El cable coaxial conduce los pulsos eléctricos hasta el transductor.
3. El transductor convierte los pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas o ultrasonido.
4. El transductor transmite el haz ultrasónico al material que se inspecciona desde la pared frontal.

Transmisión del haz ultrasónico en el material.

5. El haz ultrasónico viaja por el material, llega hasta la pared final o posterior y una porción de esta regresa al origen en forma de un eco.

Procesamiento del eco ultrasónico.

6. El transductor recibe el eco ultrasónico y lo reconvierte en pulsos eléctricos.

7. Los pulsos eléctricos reconvertidos viajan por el cable coaxial de vuelta al equipo ultrasónico.
8. El equipo ultrasónico procesa los puntos y los convierte en una señal de forma de oscilograma.

Interpretación de la señal.

9. Un técnico capacitado como nivel II o III interpreta el oscilograma.

Evaluación de la indicación.

10. Un técnico capacitado como nivel II o III evalúa la indicación que el oscilograma representa.

Aplicaciones.

La evaluación por ultrasonido en soldadura por resistencia se utiliza para evaluar los siguientes 4 factores:

1.- Diámetro del Punto: El tamaño del punto de soldadura es uno de los parámetros más importantes para determinar la calidad de la unión y su resistencia. Aunque es muy difícil medir directamente el diámetro del punto de soldadura, con la ayuda de especimenes cuidadosamente seleccionados, su tamaño puede ser predicho comparando las alturas de los ecos. Ver Fig. 6.6

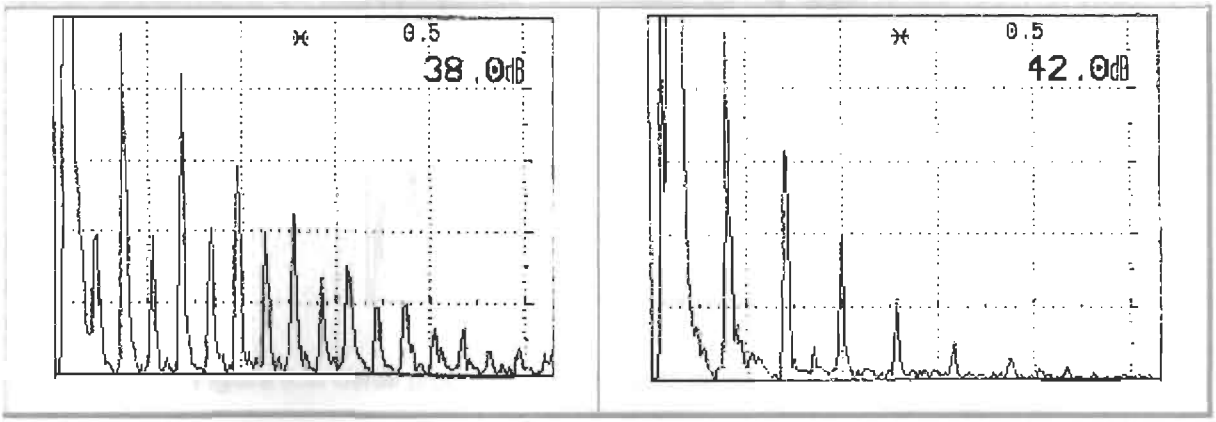


Figura 6.6. Señal producida por un punto de menor diámetro contra uno de mayor diámetro.

2.- Penetración: El segundo parámetro más importante en la determinación de la calidad del punto de soldadura es el grado de penetración. El espesor del punto puede predecirse comparando las características de atenuación de las piezas de prueba contra los especimenes de referencia. Las diferencias en atenuación pueden ser vistas examinando el índice de disminución en la altura de los ecos. Ver Fig. 6.7

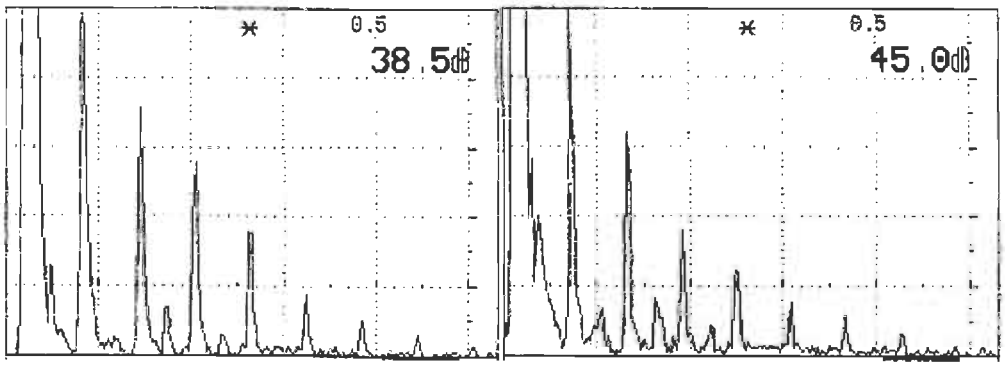


Figura 6.7. Señal producida con diferentes espesores de punto de soldadura. (Atenuación)

3.- Discontinuidades Internas: El método de prueba no destructivo mas popular para la determinación de discontinuidades internas tales como vacíos, porosidad, grietas internas e inclusiones es la examinacion radiográfica, si embargo la técnica de ultrasonido también da resultados satisfactorios en la determinación de discontinuidades internas excepto en caso de grietas.

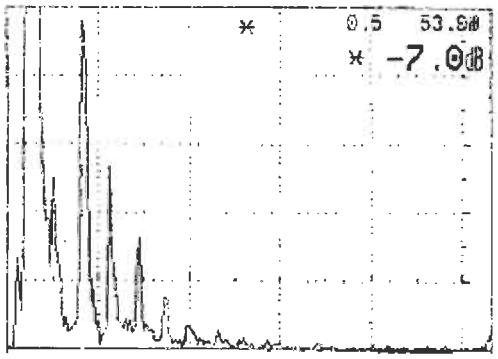


Figura 6.8. Señal producida por un punto de soldadura con porosidad.

4.- Expulsión: Este es otro tipo de defecto que puede ser detectado mediante la técnica de ultrasonido, la detección es similar al proceso utilizado para determinar discontinuidades externas, sin embargo debido a la gran cantidad de chisporroteos durante el proceso de unión una gran cantidad de metal salpica fuera del charco de soldadura ocasionando que el tamaño de los huecos sea mayor y la superficie interna de los mismos es bastante irregular. La diferencia de tamaño y la irregularidad son una ayuda para el operador al momento de diferenciar una expulsión de material de una discontinuidad interna. Si un punto de soldadura que presenta expulsión es examinado es fácil de interpretar ya que solo serán uno o dos los ecos que se observaran en la pantalla.

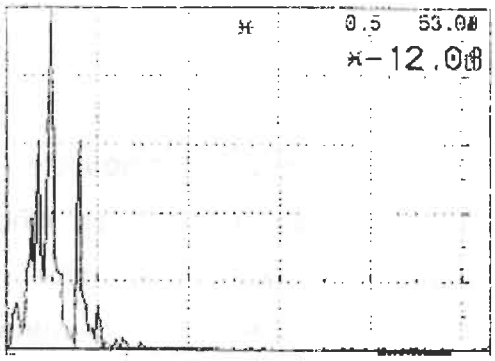


Figura 6.9. Señal producida punto de soldadura con chisporroteo.

Ventajas Y Desventajas.

Las principales ventajas de la inspección basada en la técnica de ultrasonido comparada contra otros métodos de inspección no destructiva de partes metálicas son:

- Mayor poder de penetración, lo que permite la detección de fallas y defectos en las partes mas profundas de las piezas a inspeccionar.
- Alta sensibilidad, lo que permite la detección de defectos extremadamente pequeños.
- Mayor nivel de confiabilidad sobre los otros métodos de inspección al momento de determinar la posición interna de los defectos, estimar su tamaño y caracterizar su orientación, forma y naturaleza.
- Solo se necesita una superficie del material para realizar la prueba.
- La operación es electrónica, lo que nos permite la rápida obtención de información acerca del material inspeccionado, esto hace posible su automatización mediante un rápido escaneo en la línea de producción, ayudando a controlar el proceso al mantener un historial de los resultados obtenidos, resultados que pueden servir como referencia en un futuro.
- El equipo es fácil de trasladar y practico.
- Existe software que funciona como una interfase entre el equipo de ultrasonido y la computadora, facilitando la interpretación de resultados y la determinación de las propiedades mecánicas del material.

Las desventajas de la técnica de ultrasonido son:

- Es necesario conocimiento especializado para desarrollar los procedimientos de inspección.
- Si la operación es manual se necesita supervisión profesional de técnicos con experiencia en la interpretación de los ecos y las características de atenuación que nos da como resultado la prueba.

- Las formas caprichosas o irregulares, la rugosidad y las partes no homogéneas de las piezas, representan una dificultad para esta técnica de inspección.
- Se necesita un acoplante para proveer una efectiva transferencia de la onda de ultrasonido entre los transductores y las partes a inspeccionar.
- Se necesitan documentos de referencia tanto para calibrar los equipos como para caracterizar las fallas encontradas.[ASM Handbook Volume 17, 2005]

Para que se lleve a cabo una inspección exitosa mediante la técnica de ultrasonido es necesario que el operador del equipo posea el suficiente entrenamiento y experiencia, si alguno de los anteriores requisitos no es cumplido, existe una alta posibilidad de cometer errores en la interpretación de resultados.

PRINCIPALES DEFECTOS

En ocasiones, la soldadura puede no haber alcanzado las propiedades finales deseadas, dando dar lugar a uniones deficientes e incorrectas. La siguiente tabla muestra los principales defectos existentes en la soldadura por puntos.

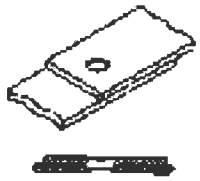
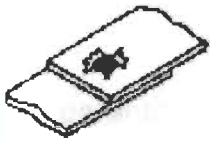
DEFECTOS DE SOLDADURA POR PUNTOS DE RESISTENCIA			
DEFECTO	**ASPECTO**	**CAUSA**	**SOLUCIÓN**
Penetración excesiva del electrodo		• Intensidad de soldadura alta.	• Disminuir la intensidad de soldadura.
Proyección de material fundido		• Intensidad de soldadura alta. • Tiempo de soldadura alto. • Presión de apriete de los electrodos baja. • Diámetro insuficiente de los electrodos. • Mal contacto entre las chapas. • Suciedad de las chapas.	• Ajustar la intensidad y tiempo de soldadura. • Dimensionar correctamente los electrodos. • Ajustar la presión de apriete de los electrodos. • Asegurar un buen contacto entre las chapas y una correcta limpieza.
Salpicaduras por expulsión del núcleo		• Presión de apriete de los electrodos excesiva.	• Disminuir la presión de apriete de los electrodos.
Penetración escasa del electrodo		• Intensidad de soldadura baja. • Tiempo de soldadura bajo. • Presión de apriete de los electrodos baja.	• Aumentar la intensidad y el tiempo de soldadura y la presión de apriete de los electrodos.

Figura 6.10. Defectos de Soldadura por Resistencia.

Los principales defectos que puede presentar la soldadura por puntos de resistencia son:

- Escasas propiedades mecánicas.
- Proyección de material fundido.
- Penetración del electrodo excesiva o escasa.
- Puntos quemados, con cráteres o fisuras.
- Pegado de las piezas a los electrodos.
- Sobrecalentamiento innecesario.

Estos defectos suelen deberse a dos causas fundamentales:

- Regulación incorrecta del equipo (intensidad, tiempo y presión).
- Preparación inadecuada de las chapas a soldar.

CHISPORROTEO.

En un esfuerzo por garantizar la calidad de las soldaduras, los parámetros de soldadura se encuentran muy cerca de las condiciones en las que se presenta el chisporroteo, esto se hace para evitar que algún cambio en las variables del proceso provoque la aparición de soldaduras de menor diámetro que el esperado, pero esto también nos ocasiona la expulsión del metal fundido del punto de soldadura. [TWI]

Los Siguientes factores pueden causar la expulsión del material:

- Una pequeña área de contacto debido a una mala alineación de las puntas de los electrodos, un diámetro de electrodo insuficiente, o los electrodos no están bien fijos en las placas a soldar.

  Recomendación: Controlar el diámetro de los electrodos y revisar periódicamente el equipo para identificar los problemas que están causando el desalineamiento, de otra manera siempre existirá el riesgo de obtener mala calidad en las soldaduras.

- Problemas con los Componentes: Tales como falta de planicidad o un mal anclaje, requieren mayor presión para cerrar el gap entre las placas.

  Recomendación: Siempre que se trata de eliminar los problemas relacionados con la presión de trabajo. Se pueden presentar otros problemas causados al solucionar este, sin embargo tiempos más largos de soldadura o soldadura pulsada puede ayudar a soldar materiales más resistentes o más gruesos.

- Problemas con la fuerza de los electrodos: el chisporroteo es mas probable cuando se aplican bajos índices de fuerza por los electrodos o cuando se aplica la corriente de energía antes de que los electrodos alcancen su fuerza máxima debido a que el tiempo de alineación es muy corto.

  Recomendación: Revisar que la fuerza y el tiempo de alineación sean los adecuados.

FRACTURAS

La aparición de grietas o fracturas en soldadura por resistencia eléctrica por puntos en aceros avanzados se debe principalmente a las grandiosas propiedades mecánicas que poseen este tipo de aceros, las cuales son conseguidas gracias a las microestructuras que los forman como lo son martensita, bainita, austenita retenida y ferrita, estas microestructuras al ser sometidas a procesos como la soldadura por resistencia eléctrica de puntos, sufren transformaciones importantes en su microestructura y en propiedades mecánicas debido al incremento de la cantidad de martensita en la matriz ferritica que se presenta al someter a este tipo de aceros a incrementos bruscos de temperatura y enfriamientos muy severos.

Cuando se aplica soldadura, la calidad de las placas unidas debe ser inspeccionada, lo mejor seria que se despegara una de las placas y así poder medir el diámetro del punto de soldadura para asegurar de que cumple con el

mínimo, establecido como $5\sqrt{t}$ (donde t es el espesor de la placa en Mm.) El mínimo aceptable es un tamaño que este entre el 70 y 80% de este valor, o dependiendo de la aplicación y del cliente. [TWI][Xin Sun, 2006]

La aparición de una fractura en la interfase entre las dos placas nos indica un posible problema de calidad en la soldadura.

Este tipo de fracturas pueden ser ocasionadas por las siguientes razones:

- Diámetro pequeño del punto de soldadura.
- Falta de fusión en el punto de soldadura.
- Baja ductilidad en el punto de soldadura.

Las fallas en la interfase pueden ser producidas por grietas internas o porosidad en el punto de soldadura, principalmente con placas gruesas si la fuerza es insuficiente o un excesivo chisporroteo se presenta.

Un tiempo de soldadura más largo, o soldadura pulsada pueden ayudar a reducir al mínimo esta condición.

Dado que existe una gran variedad de aceros avanzados en la industria automotriz, los manufactureros deben de reconocer que también existen nuevas formas de falla en la soldadura por resistencia eléctrica de puntos, anteriormente con la aplicación de aceros al carbón si el botón de soldadura se desprendía del metal base se consideraba un punto correcto, con la implementación de AHSS se deben considerar otros mecanismos de falla como las fracturas frágiles en la interfase entre las placas a soldar como consecuencia de las durezas de estos aceros.

A continuación se presentan los 8 tipos de modo de falla mas comunes que se pueden presentar en una prueba destructiva realizada a puntos de soldadura en un acero avanzado

Modo 1 Modo 2 Modo 3

Modo 4 Modo 5 Modo 6

Modo 7 Modo 8

Figura 6.10. Modos de Falla no tradicionales en aceros avanzados.

Modo 1. Muestra una separación ocurrida en la placa opuesta alrededor del metal base, observándose un total desprendimiento del botón de soldadura falla convencionalmente aceptada para aceros dulces.

Modo 2. Conocido como fractura parcial de espesor y desprendimiento parcial de botón, muestra que al menos un 20% del área de la placa es removida durante la separación.

Modo 3. Conocido como fractura parcial de espesor muestra que al menos un 20% del área de la placa es removida durante la separación sin producirse desprendimiento de botón, la falla se produce en la zona afectada por el calor que rodea el punto.

Modo 4. Conocido como fractura parcial de espesor, desprendimiento parcial del botón y fractura parcial interfacial donde el punto de soldadura de separa parcialmente.

Modo 5. Conocido como fractura parcial interfacial, desprendimiento parcial del botón y separación parcial del punto de soldadura.

Modo 6. Es una combinación entre fractura interfacial y fractura parcial de espesor, se caracteriza por la separación del 20 % de la superficie del punto de soldadura.

Modo 7. Completa fractura interfacial, es una fractura completa del punto a lo largo de la superficie plana de fallo.

Modo 8. En este modo de falla existe falta de fusión de las placas a soldar. Esto evidencia que no existe formación de un punto de soldadura durante el tiempo de soldadura.

La primera generación de aceros avanzados (DP 600) son actualmente utilizados en varios modelos con diferentes grados de dificultad. La principal preocupación ha sido los nuevos modos de falla que se presentan durante la soldadura por resistencia durante una prueba destructiva. Para aceros convencionales (Aceros dulces) la prueba destructiva de pelado típicamente da

como resultado el desprendimiento del botón, sin embargo durante las pruebas destructivas aplicadas a los aceros avanzados (AHSS) los puntos de soldadura también fallan en varios modos no tradicionales.

Durante la prueba destructiva tres son los factores que generalmente conducen a estos nuevos modos de fallo:

1. Concentración de esfuerzos en el punto de soldadura
2. Estructuras duras en la soldadura y en la zona afectada por el calor
3. presencia de poros, grietas o zonas frágiles en la solidificación

La concentración de esfuerzos esta dada por la resistencia de los materiales que fueron unidos así como el tamaño del punto, las altas resistencias de estos materiales y los diámetros pequeños de botón provocan tensión y aumentan la susceptibilidad a fallar de maneras diferentes al desprendimiento del botón del material base.

En los aceros avanzados la alta dureza que se produce después de la soldadura reduce la tenacidad del punto, si se reduce la tenacidad se incrementa la susceptibilidad a fallas diferentes a la normal, además algunos de estos aceros contienen fósforo elemento que puede provocar porosidad en la unión lo que ocasiona modos de falla no tradicionales.

La industria del automóvil tiene un gran interés por entender los modos de falla de estos nuevos aceros durante las pruebas destructivas. Dada la amplia gama de aceros avanzados que serán introducidos en las carrocerías de los automóviles en la próxima década, es necesario caracterizar completamente los modos de fallo para poder introducir estos aceros con confianza.

Para entender completamente los nuevos modos de falla se deben de caracterizar los que podrán ocurrir, La American Welding Society (AWS) D8.1 ha estado tratando de documentar los diferentes modos de falla que pueden presentarse durante las pruebas destructivas en un acero avanzado soldado por el proceso RSW.

Caracterizar los modos de falla permitirá que sean clasificados de acuerdo a su severidad y proveerá una herramienta para analizar el funcionamiento mecánico en función de la severidad del modo de falla. Una vez que se tenga una correlación entre estos modos de falla, las propiedades mecánicas de la unión y las variables de proceso utilizadas durante la soldadura, se podrán determinar los parámetros de soldadura adecuados, para asegurar la integridad mecánica de las uniones y obtener los resultados esperados.[Jerry E. Gould, 2005]

7.

CONCLUSIONES

En este estudio además de proporcionar un conocimiento básico del proceso de soldadura por resistencia eléctrica de puntos (RSW) y de la metalurgia de los aceros avanzados de doble fase ferrítico martensíticos (AHSS) se provee de una pauta básica que relaciona el principal ensayo no destructivo aplicable a este tipo de proceso el ultrasonido con los principales modos de falla que se presentan en este proceso cuando se unen aceros avanzados.

Los criterios de calidad mas importantes en este proceso como son el diámetro de la soldadura, espesor de la soldadura, indentación en el metal base y huecos provocados por el chisporroteo; son los que tienen un mayor impacto en las propiedades mecánicas de la unión y son afectados directamente por la implementación de aceros avanzados en el proceso, debido al rápido calentamiento y un rápido enfriamiento subsiguiente durante el ciclo de soldadura, la microestructura de la unión es considerablemente diferente a la microestructura preexistente, en aceros de doble fase ferrítico martensíticos el endurecimiento ocurre como consecuencia del extraordinario incremento en el por ciento de la fase martensítica, en este tipo de aceros dicho endurecimiento es la causa de la aparición de defectos como grietas y zonas con altos esfuerzos, por esta razón la interacción entre las variables de proceso y los aspectos metalúrgicos del punto de soldadura se vuelven importantes.

La corriente y el tiempo de soldadura son las variables de proceso que mayormente afectan el tamaño y calidad de la soldadura desde que estas dos son directamente proporcionales al calor aportado a la unión (Heat = I^2 * Rt). El efecto de la resistencia del material y de la densidad de corriente en la formación y tamaño del punto de soldadura es indirectamente controlado por la aplicación de fuerza del electrodo, a mayor fuerza el área de contacto aumenta ya que aplasta los picos y valles naturales de la superficie del material disminuyendo la densidad de corriente lo que disminuye también el tamaño del botón y sus propiedades mecánicas.

Es posible predecir las propiedades mecánicas de las uniones con solo observar las características de atenuación, la altura y forma de los ecos que se muestran en la pantalla mediante el ensayo de ultrasonido. Sin embargo para obtener resultados correctos se debe de obtener una correlación confiable entre la carga aplicada, las características del punto de soldadura y los resultados obtenidos del ensayo no destructivo.

Obteniendo esta información se podrán obtener los parámetros óptimos para una soldadura de calidad, así como clasificar los nuevos modos de falla que se presentaran con la implementación de este tipo de aceros en la industria automotriz.

8.

BIBLIOGRAFIA

[1] ASM Handbook Volume 6, "Welding, Brazing, and Soldering", Resistance Spot Welding, 2005.

[2] ANSI/AWS/SAE/D8.9, "Recommended Practices for Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steels Materials", 2002.

[3] ANSI/AWS/D8.7, "Recommended Practices for Automotive Weld Quality – Resistance Spot Welding", 2005.

[4] M. Marya and X. Q. Gayden, "Development of Requirements for Resistance Spot Welding Dual-Phase (DP600) Steels Part 2: Statistical Analyses and Process Maps".2005.

[5] Jay Baron Y Jody Shaw, "Formado de Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS)", 2006.

[6] International Iron & Steel Institute, Committee on Automotive Applications, "Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines", 2006.

[7] J. E. Gould, S. P. Khurana, and T. Li, "Predictions of Microstructures when Welding Automotive Advanced High-Strength Steels", 2006

[8] A.J. Trowsdale & S.B. Pritchard Corus Construction & Industrial, UK "Dual Phase Steel – High Strength Fasteners without Heat Treatment"

[9] Björn Carlsson, Joachim Larsson, Tony Nilsson, "Dual Phase Steels for Auto Body Design, Forming, and Welding Aspects" ,1986.

[10]ASM International Publication, Nondestructive Evaluation, "Advanced Materials & Processes", 2007.

[11]J. Norberto Pires, Altino Loureiro y Gunnar Bolmsjö, "Welding Robots, Technology, Systems and Issues Applications", 2007.

[12]Murali D. Tumuluru, "Welding Journal. Volume 85, Number 8,. Resistance Spot Welding of Coated High Strength Dual Phase Steels", 2006.

[13]Wey Tong, Hong Tao, Xiquan Jiang, Nian Zhang, Manuel P.Marya, Louis G. Hector, and Xiaohong Gayden, "Deformation and Fracture of Miniature Tensile Bars with Resistance Spot Weld Microstructures", 2005.

[14]Murali D. Tumuluru, "Welding Journal, Resistance Spot Welding of Coated High Strength Dual Phase Steels", 2005.

[15] M. S. Rashid, "Dual Phase Steels",1981.

[16] Xin Long, Sanjeev K. Khanna, "Fatigue Properties and Faiulre Characterization of Spot Welded High Strength Sheet", 2006.

[17]Jerry E. Gould and Warren Peterson, "Advanced Materials Require Advanced Knowledge. Understanding Resistance Spot Weld Performance on AHSS",2005.

[18]X.Q. Zhang, G.L.Chen, Y.S.Zhang, "Characteristics of Electrode Wear in Resistance Spot Welding Dual Phase Steels", 2006.

[19]The Welding Institute, Materials Joining Technology, Frequently Asked Questions.

[20] Z. Han, J. E. Indacochea, "Microestructural Characterization of Weld Nuggets with Processing Parameters in Resistance Spot Welding of HSLA Steel", 1990.

[21] Xin Sun, Elizabeth V. Stephens and Mohammad A. Khaleel, "Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High Strength Steel Spot Welds under Lap Shear Conditions",2006.

[22] ASM Handbook Volume 17, "Non destructive Evaluation and Quality Control, Ultrasonic Inspection", 2005.

9.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Procesos de Soldadura.

Figura 4.1. Ciclo Completo de Soldadura.

Figura 4.2. Vista transversal de un punto de soldadura.

Figura 4.3. Secuencia de operaciones en la soldadura de resistencia eléctrica de puntos.

Figura 4.4. Conforme se incrementa la resistencia se disminuye la corriente.

Figura 4.5. Relación entre el Diámetro del Punto y la Corriente de Soldadura en un Tiempo Constante.

Figura 4.6. Superficie del Material Sometida a Diferentes Presiones.

Figura 4.7. Relación entre el Diámetro del Punto y el Tiempo de Soldadura.

Figura 4.8. Diferentes Geometría de los Electrodos.

Figura 5.1. Propiedades de los aceros doble fase vs. Otros tipos de aceros.

Figura 5.2. Microestructura típica de un acero TRIP.

Figura 5.3. Microestructura típica de un acero Martensitico.

Figura 5.4. Temperaturas criticas a las que obtenemos las diferentes estructuras.

Figura 5.5. Esquema de la microestructura de un acero doble fase. La micro estructura consiste en un fina matriz ferritica con una distribución uniforme de aproximadamente el 20% de martensita, austenita retenida y bainita.

Figura 5.6. Por ciento de Martensita vs. Esfuerzo Mpa.

Figura 5.7. Comparación de las curvas esfuerzo deformación de un acero HSLA vs. DP.

Figura 5.8. Diagrama aceros Doble Fase.

Figura 6.1. Prueba de Cincel Destructiva.

Figura 6.2. Prueba de Pelado Destructiva

Figura 6.3. Prueba de Cincel no Destructiva.

Figura 6.4. Ultrasonido aplicado en soldadura por resistencia eléctrica de puntos.

Figura 6.5. Proceso para una Inspección Ultrasónica.

Figura 6.6. Señal producida por un punto de menor diámetro contra uno de mayor diámetro.

Figura 6.7. Señal producida con diferentes espesores de punto de soldadura. (Atenuación)

Figura 6.8. Señal producida por un punto de soldadura con porosidad.

Figura 6.9. Señal producida punto de soldadura con chisporroteo.

Figura 6.10 Defectos de Soldadura por Resistencia.

Figura 6.11. Modos de Falla no tradicionales en aceros avanzados.