

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOLDADURA POR ARCO Y SOLDADURA
POR RESISTENCIA PARA LA SUSTITUCIÓN DEL PROCESO DE
SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS DE ACERO A13C PARA
ESTRUCTURAS EXTERIORES DE COMPONENTES AGRÍCOLAS**

POR

ALEJANDRA GONZÁLEZ CANTÚ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAH. DICIEMBRE 2014

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOLDADURA POR ARCO Y SOLDADURA
POR RESISTENCIA PARA LA SUSTITUCIÓN DEL PROCESO DE
SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS DE ACERO A13C PARA
ESTRUCTURAS EXTERIORES DE COMPONENTES AGRÍCOLAS**

POR

ALEJANDRA GONZÁLEZ CANTÚ

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAH. DICIEMBRE 2014

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOLDADURA POR ARCO Y SOLDADURA POR RESISTENCIA PARA LA SUSTITUCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS DE ACERO A13C PARA ESTRUCTURAS EXTERIORES DE COMPONENTES AGRÍCOLAS”**, realizada por la alumna **ALEJANDRA GONZÁLEZ CANTÚ** con número de matrícula **13ES-155** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Victor Hugo López Cortez
Tutor Académico

Ing. José Antonio Ferniza
Tutor en Planta

Vo.Bo.
Dr. Felipe Arturo Reyes Valdes
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Especialización de la alumna **ALEJANDRA GONZÁLEZ CANTÚ** una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOLDADURA POR ARCO Y SOLDADURA POR RESISTENCIA PARA LA SUSTITUCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA EN PLACAS DELGADAS DE ACERO A13C PARA ESTRUCTURAS EXTERIORES DE COMPONENTES AGRÍCOLAS**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 8 días del mes de diciembre de 2014.

**Dr. Francisco Fernando
Curiel López**
Presidente

**Dra. Rocio Saldaña
Garcés**
Secretario

Dr. Víctor Hugo López Cortez
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Dios por darme la fuerza y bendiciones necesarias para lograr esta meta en mi carrera. A mi empresa John Deere por haberme dado la oportunidad de realizar esta especialidad y haber confiado en mí para su culminación, por ayudarme a desarrollarme como profesional, por retarme a sacar de mí siempre lo mejor, por ser mi segunda familia.

Sin duda hay muchas personas que me gustaría agradecerles que hayan sido parte de mi vida profesional, gracias por sus consejos, apoyo, amistad. Algunos siempre estarán a mi lado, otros solo permanecen en mi mente y corazón, pero quiero agradecerles a todos por haber sido parte de este reto y por lo que dieron a mi vida.

DEDICATORIAS

A Dios.

Por la fuerza, la paciencia, salud y todas las virtudes, capacidades y actitudes que me ha dado a lo largo de mi vida, que me han permitido lograr objetivos y metas. Por permitirme crecer como persona y por nunca soltarme de su mano aun en los momentos de más complicados.

A mi Madre.

Por estar siempre conmigo y nunca dejarme caer, por todos los momentos que me ha esperado, desvelos y apoyo incondicional que siempre he recibido de ella para salir adelante y empujarme a superarme como persona, estudiante y profesionista. Por ser mi motor y mí fuerza. Por tolerar mis ausencias por el trabajo y estudio.

A mis compañeros.

Por haberse convertido en mis amigos, confidentes y soporte para poder continuar y terminar esta etapa de mi carrera profesional.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Planteamiento del problema.....	6
1.5. Aportación industrial	7
1.6. Alcance y delimitaciones	7
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	8
2.1. Introducción.....	8
2.1.1. Soldadura por arco (GMAW).....	9
2.1.2. Soldadura por resistencia.	17
2.1.3. Aceros, clasificación y características.....	30

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	34
3.1 Acero de baja aleación y de alta resistencia	34
3.2 Parámetros de la soldadura	34
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO	39
4.1 Determinación de variables.....	40
4.2 Elaboración de las probetas de soldadura	41
4.3 Análisis de resultados	46
CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ÍNDICE DE TABLAS.....	66
ÍNDICE DE FIGURAS	67
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	72

SÍNTESIS

Ante la necesidad de buscar una alternativa diferente para la fabricación de productos agrícolas y buscando siempre desarrollar procesos nuevos, que nos lleven a la fabricación de productos de calidad, se inició este documento de investigación en el cual se busca comprobar la viabilidad de un cambio en el proceso de soldadura de productos utilizados en los tractores.

Se desarrolló una investigación relacionada con ambos procesos de soldadura evaluando sus características, ventajas y desventajas y se desarrollaron algunas pruebas físicas para comparar los procesos para una junta a traslape que simula la de una pieza actualmente fabricada en planta con soldadura por arco.

Los resultados nos demuestran que es factible poder hacer un cambio en el proceso utilizado actualmente. A continuación se encuentra la investigación realizada y los resultados de las pruebas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

John Deere, fundada en 1837, es una empresa pionera en la fabricación de productos agrícolas, a la cual la caracteriza el alto nivel de calidad y el afán de satisfacer las necesidades de sus clientes, brindándole productos que lo ayuden a realizar las tareas de una forma eficiente. Dentro de los productos que John Deere ofrece se encuentran tractores, cosechadoras, sembradoras, empacadoras, motores, equipo de construcción y forestal, así como equipo para el cuidado del césped, como se observa en la Figura 1.1.



Figura1.1: Divisiones por producto John Deere.

Los cuatro valores fundamentales de la compañía son Innovación, Calidad, Compromiso e Integridad. Esta investigación está sostenida en los valores de John Deere, ya que busca el innovar en la forma de hacer las cosas, específicamente, la forma en que se fabrican los ensambles soldados de la planta de Tractores, cumpliendo con la calidad requerida, teniendo el compromiso con el cliente de ofrecerle los mejores productos a precios competitivos, generando también un retorno de inversión para nuestros accionistas.

La planta de Tractores Saltillo, inició sus operaciones en el año de 1984 y se encuentra ubicada al centro de la ciudad. Cuenta con 12 hectáreas y 320,000m² de construcción y en ella se fabrican los tractores medianos de las series 5000, 6000 y 7000, como los que se muestran en la figura1.2. Laboran 310 técnicos y 63 administrativos. Realiza procesos de corte láser, doblado, soldadura, maquinado, pintura y ensamble de chasis, transmisiones y línea final. En la planta se fabrican el 95% de los ensambles soldados y partes simples de metal-mecánica que forman el tractor.



Figura1.2: Ejemplos de Tractores que se producen en John Deere en la planta de Tractores Saltillo.

El 100% de las piezas soldadas en la planta de Tractores se fabrican mediante soldadura por arco. La función de algunas piezas es únicamente de apariencia o protección. En el presente documento se comparan las características de la soldadura por arco y resistencia para validar que el proceso de soldadura por resistencia sea una opción viable para la sustitución del proceso de soldadura por arco que es con el que actualmente se cuenta.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la soldadura por resistencia como alternativa para la soldadura de componentes agrícolas, comparándola con la soldadura por arco actualmente usada en la fabricación de estas piezas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Mediante pruebas mecánicas de tensión, metalografías y análisis de dureza hacer una comparación entre ambos procesos para validar las capacidades y características.
- Definir si la soldadura por arco en una pieza se puede sustituir por la soldadura por resistencia, logrando las características deseables para dicha pieza.
- Identificar las piezas en las que, con base en sus características de tipo de unión, espesor y apariencia, se pueden sustituir la soldadura actual por arco por la soldadura por resistencia.

1.3. Justificación

En la planta de Tractores se identificó como área de oportunidad el desarrollar otro tipo de soldadura, que genere habilidades no desarrolladas hasta el momento.

Actualmente, en la planta se utiliza el proceso de soldadura por arco para la fabricación de piezas. Sin embargo, se desconoce si es el más económico, sencillo y con menos defectos, por lo que uno de los objetivos es conocer más profundamente el proceso de soldadura por arco, así como del proceso de soldadura por resistencia, el cual se está planteando como una alternativa viable para la fabricación de componentes soldados en placas delgadas.

Uno de los motivos para desarrollar ésta investigación es ofrecer al departamento de diseño un proceso de soldadura alternativo y que éste sea validado por medio de un análisis comparativo de ambas soldaduras que ayude a comprobar que la soldadura por resistencia ofrece características mecánicas similares a la de arco.

1.4. Planteamiento del problema

Evaluar la soldadura por resistencia como alternativa para la soldadura de componentes agrícolas, comparándola con la soldadura por arco actualmente usada en la fabricación de estas piezas. Comprobar mediante pruebas mecánicas, metalografías y pruebas de dureza si es posible cambiar el proceso.

En el área de soldadura de la planta de Tractores, se sueldan cerca de 350 ensambles, por medio de soldadura por arco, la cual en placas delgadas nos genera problemas de calidad como retrabajos, principalmente en las piezas que son visibles para el cliente. Por medio de esta investigación, se busca conocer el proceso de soldadura por resistencia y realizar una comparación entre ambos procesos en piezas específicas y demostrar si la soldadura por arco es la ideal o si es posible hacer un cambio en el proceso actual.

La soldadura por resistencia es un campo no conocido en las plantas de Industrias John Deere, por lo cual podría ser una solución o alternativa inédita que pueda replicarse en las plantas en donde las placas de espesores de 1.5 a 3 milímetros sean usadas y que de acuerdo al uso de las piezas y sus características, se pudieran fabricar mediante este proceso. Cabe mencionar que la soldadura por resistencia ha sido altamente usada para unir piezas pequeñas en la industria automotriz, aeroespacial, médica y electrónica (Wei, 2014).

Actualmente el diseño de las piezas de los tractores, se basa en la soldadura por arco y no se considera la soldadura por resistencia. Se desconocen cuáles pueden ser sus aplicaciones, ventajas y desventajas de su uso, así como la resistencia que se alcanzaría en piezas fabricadas mediante este proceso. Esta investigación podrá ser la fuente de generación de un nuevo concepto de piezas así como de la implementación de un nuevo proceso de soldadura en la planta de Tractores.

1.5. Aportación industrial

Al final de la investigación se busca comprobar si la soldadura por resistencia tiene iguales o mejores propiedades mecánicas comparadas con las de soldadura por resistencia. Encontrar la relación entre la cantidad de puntos de soldadura de resistencia y la cantidad de soldadura por arco que se requieren para obtener la misma resistencia en una pieza. Esto servirá como punto de partida para el diseño de piezas mediante este proceso.

1.6. Alcance y delimitaciones

Para poder soldar por medio de resistencia, el tipo de junta debe ser de traslape, por lo que se analizarán las piezas que actualmente tengan esta junta.

El espesor de la placa estará limitado a placas de 1.5 a 3 mm ya que a partir de este espesor se recomienda usar la soldadura por arco.

Las piezas que se sueldan en la plata de Tractores, son de acero A13C, por lo que sólo se evaluará este material en la investigación.

Las piezas soldadas por medio de resistencia dejan una marca al momento de hacer contacto los electrodos con el material, por lo que se analizarán piezas que sean de tipo B y C respecto a la apariencia. Estas piezas son las que no son visibles para el cliente.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción.

La soldadura es un proceso por medio del cual se generan uniones permanentes entre dos componentes con iguales o diferentes características mecánicas y metalúrgicas mediante la fusión por calor. (R.L., 2001) Existen diversos tipos de soldadura, dependiendo del material, el ambiente, el tipo de fuente de energía, el proceso, entre otros y se puede llevar a cabo con o sin la aplicación de presión y con o sin la aplicación de metal de aporte. La soldadura se puede facilitar con la ayuda de gases de protección. La energía requerida para llegar a cabo una soldadura, es proveída por un componente exterior. La historia de la soldadura data desde hace muchos años, desde el año 4000 d.C ya se cuentan con datos que muestran que se llevaban a cabo uniones de metales como el oro por medio de soldadura. (Vural, 2014). La soldadura es un proceso que está siendo usado aplicado a una gama cada vez más amplia en actividades de fabricación, bajo el agua, bajo tierra, en transportación,

manufactura, construcción, en donde la soldadura es esencial. Es importante considerar que la soldadura es un proceso complejo y que depende de las variables aplicadas los resultados que se obtendrán. A su vez, la soldadura presenta algunas propiedades físicas que son críticas para la integridad de las estructuras. Algunos problemas relacionados con la soldadura son: el estrés residual y la deformación de las piezas después de aplicada la soldadura, el cambio en las propiedades microestructurales. (Wahab, 2014). Usualmente el cálculo de las variables de soldadura se ha hecho de manera experimental, pero a través de los años se han desarrollado modelos matemáticos, simulaciones computacionales y herramientas numéricas para ver cómo se comportan las variables de los procesos. Para esta investigación se analizarán las soldaduras por arco y por resistencia.

2.1.1. Soldadura por arco (GMAW).

2.1.1.1 Introducción

El proceso de soldadura por Arco, (GMAW), es altamente usado en la industria automotriz para soldar una gran gama de soportes estructurales. Este método es aplicado de una manera sencilla ya sea automáticamente o de forma manual, de igual manera, es un proceso con alta productividad y a un costo relativamente bajo, además de que permite que los metales sean unidos por ellos mismos. Algunas de las desventajas de este proceso es que es sensible a la composición química del material, recubrimientos y el diseño de la junta, factores que si no son considerados al momento de diseñar la unión, pueden generar problemas de calidad como fracturas, porosidad, falta de fusión, entre otros. (Thomas, 1993).

2.1.1.2 Principio de operación.

El proceso de soldadura por arco se realiza mediante la generación de un arco eléctrico por medio de un electrodo y las piezas a ser soldadas, protegido por medio de un gas que es suministrado externamente. El arco se produce mediante una corriente eléctrica de bajo voltaje y alto amperaje que hace saltar un arco entre el electrodo y la junta que va a ser soldada. El calor del arco eléctrico se concentra en los extremos de las dos piezas a unir. Este calor genera que los extremos se fundan y mientras se están fundiendo, se adiciona el metal fundido proveniente del electrodo que funciona como material de aporte. Durante el proceso de soldadura, la pistola guía el material de aporte, conduce la corriente y a través de ella es depositado el gas que protege el material base del medio ambiente. El GMAW puede operar en todas las modalidades como lo son la mecanizada, semiautomática o automática. Todos los aceros que tienen un uso comercial activo, como el acero al carbono, los aceros de baja aleación y de alta resistencia mecánica, acero inoxidable, aluminio, cobre, titanio y las aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier posición, solo seleccionando el gas de protección, electrodo y variables de soldadura adecuados para la aplicación. (Society, Welding Handbook, 1996).

En la figura 2.1 se muestra un esquema general del proceso de soldadura por arco.

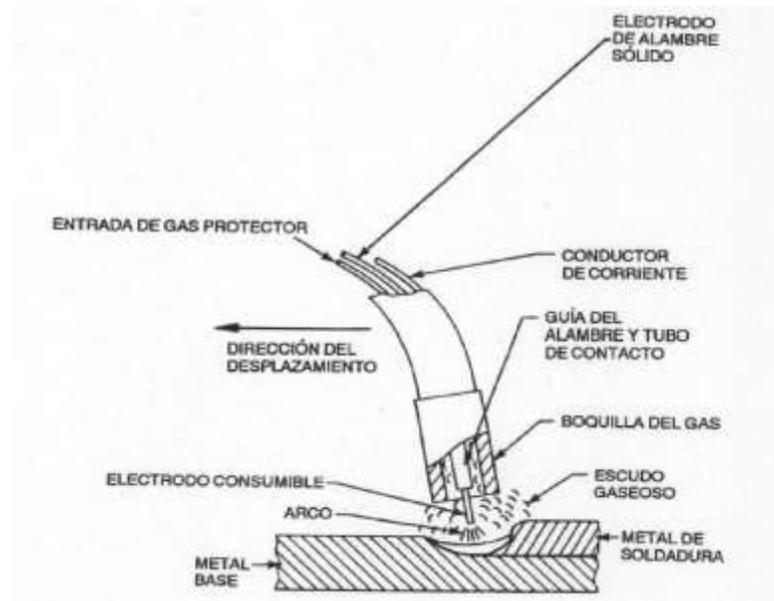


Figura 2.1. Esquema general del proceso de soldadura por arco. (Society, Welding Handbook, 1996).

2.1.1.3 Equipo

La siguiente figura muestra el equipo requerido para llevar a cabo la soldadura por arco, en ella se puede observar lo que se requiere para este proceso. El equipo necesario para soldar el arco con alambre protegido por gas es una fuente de alimentación de corriente continua y voltaje constante que puede ser un transformado rectificador, un generador o una máquina inversora, un alimentador de alambre y un sistema de control, alambre-electrodo, una pistola de soldar, un cable eléctrico y conjunto de manguera para el gas protector, un suministro de gas protector (Society, Welding Handbook, 1996).

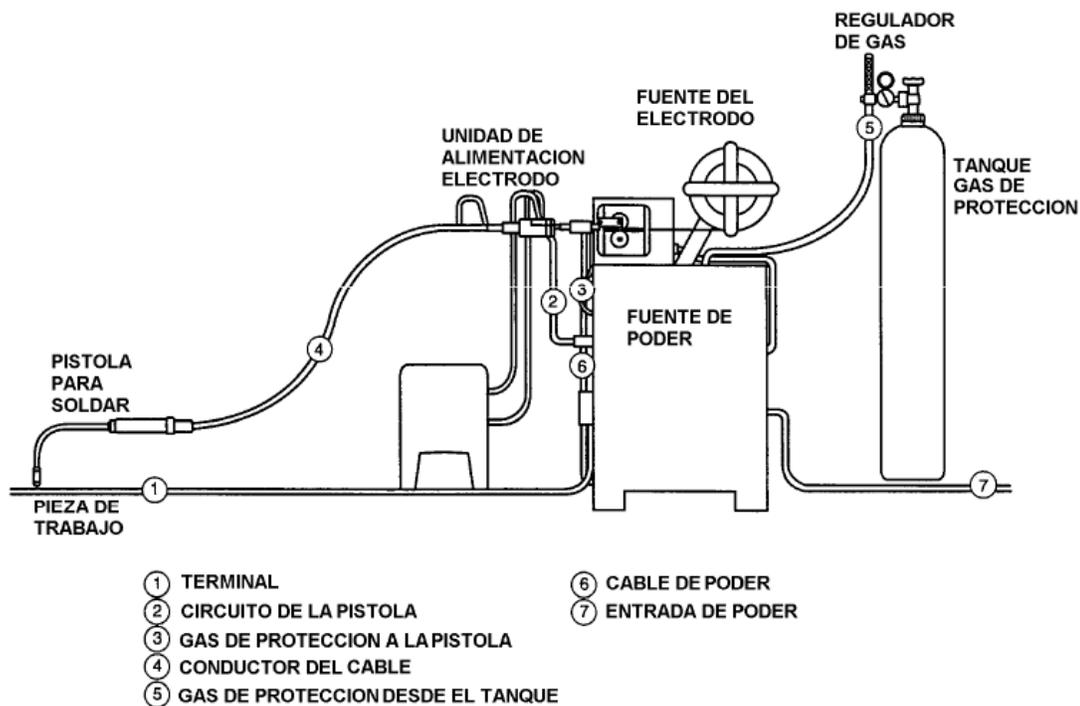


Figura 2.2. Esquema del equipo para soldadura GMAW (Society, Welding Handbook, 1996).

La forma en que se lleva a cabo el proceso es que a través de la pistola se guía el electrodo, se conduce la corriente y se inyecta el gas protector. Este ayuda a mantener el arco y a que el electrodo se funda y aporta a la unión la protección que se requiere en contra del ambiente. Durante el proceso se debe regular la alimentación del electrodo y la fuente de potencia y para poder mantener de una manera adecuada el arco de soldadura esta regulación se lleva a cabo mediante el uso de una fuente de potencia de voltaje constante y una unidad de alimentación de electrodo. (Nelly, 1992).

2.1.1.3 Variables

Existen muchas variables en el proceso, algunas de las cuales están relacionadas con la transferencia de metal. Existen cuatro métodos de transferencia de metal los cuales se citan a continuación:

a) Transferencia arco spray:

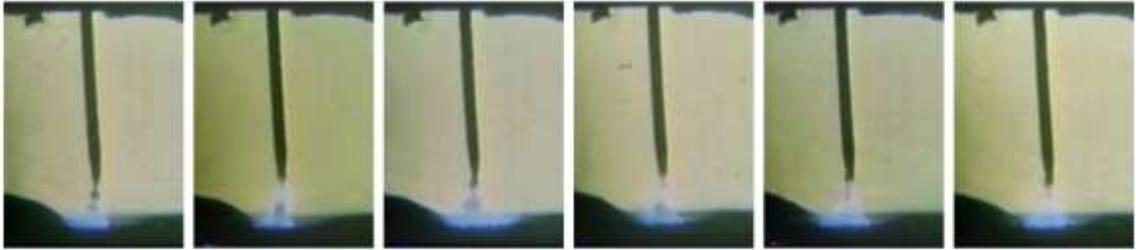


Figura 2.3 Esquema transferencia arco spray (Jesus, 2009).

b) Transferencia globular

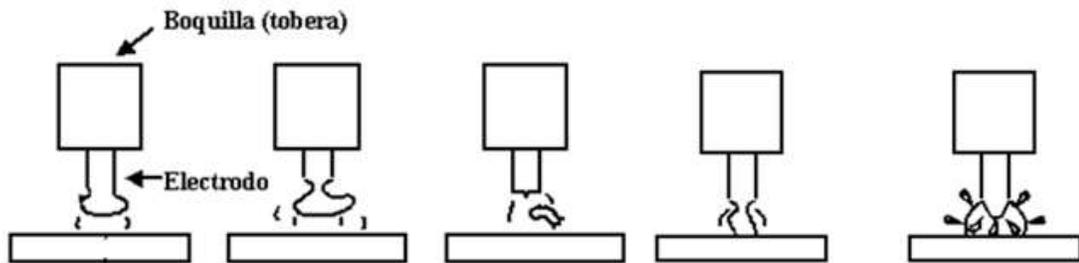


Figura 2.4 Esquema transferencia globular (Jesus, 2009).

c) Transferencia por corto circuito

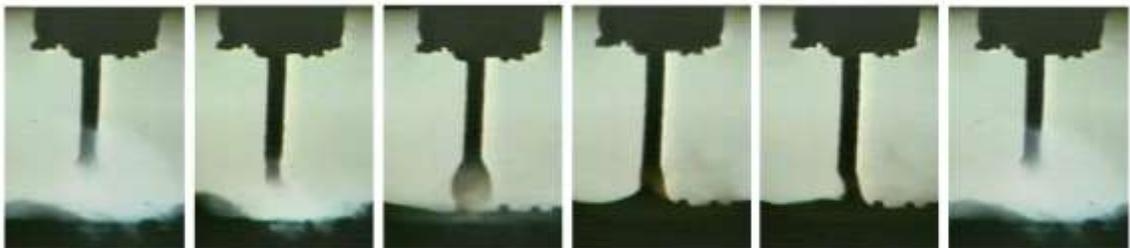


Figura 2.5 Esquema transferencia por corto circuito (Jesus, 2009).

d) Transferencia por arco pulsado

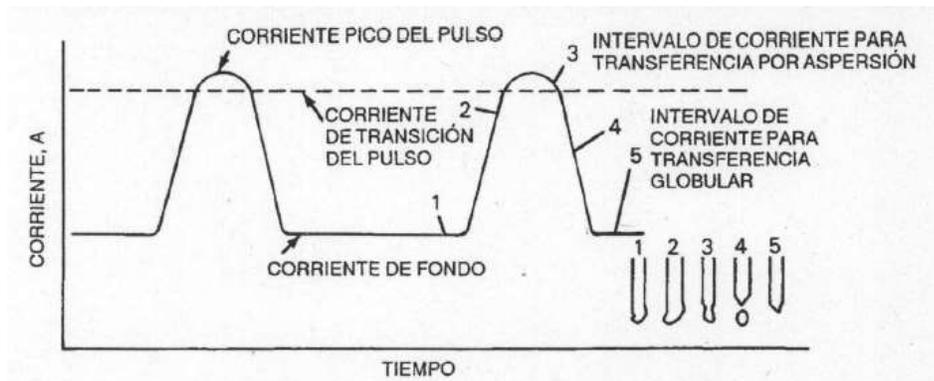


Figura 2.6. Esquema transferencia por arco pulsado (Society, Welding Handbook, 1996).

El tipo de transferencia depende de diferentes factores entre los que se pueden enlistar los siguientes:

- a) Magnitud y tipo de la corriente de soldadura.
- e) Diámetro del electrodo.
- f) Composición del electrodo.
- g) Extensión del electrodo.
- h) Gas protector.

Las diferencias entre los métodos ocasionarán que se obtenga una penetración diferente, mayor o menor velocidad y tasa de deposición, chisporroteo y distorsión.

Las variables definidas de acuerdo al tipo de material a soldar son la mezcla del gas protector, el espesor del material de aporte, la velocidad del alambre y la cantidad de corriente a usar. Por otro lado, el soldador juega un papel fundamental, ya que de él dependen la velocidad de desplazamiento, dirección y posicionamiento de la pistola para soldar. También se puede clasificar en variables primarias y secundarias. Dentro de las variables primarias se pueden encontrar la corriente, la cual tiene un gran efecto en el tamaño del depósito de soldadura, la forma, su tamaño, y penetración, mientras se aumente

la corriente de la soldadura aumentarán la profundidad y anchura de la penetración de la soldadura y el tamaño del cordón de la soldadura. Otra variable primaria es el voltaje, el cual es determinado por la distancia entre el electrodo y el material de trabajo, cuando el resto de las variables son constantes y el voltaje del arco se aumenta el cordón es ancho y plano, la penetración aumenta con un voltaje óptimo. Al bajar la longitud del arco produce un cordón con mayor convexidad, un voltaje de arco muy bajo puede producir porosidad y traslapes en las caras como muestra. La última variable primaria es la velocidad de avance, la cual es controlada por el soldador en un equipo semiautomático, o por la máquina cuando esta es automática. El cambio en la velocidad genera un cambio en la penetración de la soldadura. (Lincoln Arc Welding Foundation, 2000).

Dentro de las variables secundarias podemos encontrar la extensión del electrodo que es la distancia entre la punta del tubo de contacto y la punta del electrodo. Cuando esta distancia se incrementa, la resistencia eléctrica del electrodo aumenta e incrementa el calor del electrodo. Otra variable es el ángulo del electrodo, que es la posición del electrodo con respecto a la junta a soldar y esta afecta la forma de la capa de soldadura y la cantidad de penetración.

2.1.1.4 Calidad

Los principales defectos que se pueden encontrar en estas soldaduras son inclusiones, porosidad, socavados, fusión incompleta, excesiva salpicadura, golpes de arco y cráteres, los cuales puede causar grietas a lo largo de la soldadura. También se pueden encontrar dos tipos básicos de inclusiones, las de escoria o las de óxido, Las inclusiones se evitan en gran medida gracias al gas protector. Las inclusiones de escoria se presentan cuando se aplica más de una capa de soldadura para poder reducirlas, las inclusiones de óxido se presentan

cuando se sueldan materiales como el Manganese, aceros inoxidable o aluminio.

Las porosidades son otro defecto de calidad que se presenta cuando se quedan burbujas de gas atrapadas en el metal de la soldadura. Las porosidades se pueden ocasionar debido a un gas de protección inadecuado, bloqueo del flujo de gas por salpicaduras, contaminación del gas de protección, excesiva corriente, extensión del electrodo o velocidad de avance, grasa, aceite o mezclas de suciedades en el metal de aporte y metal base.

Otros defectos que se pueden presentar en el proceso GMAW son porosidades tipo túnel, socavaciones, fusión incompleta, traslapes, salpicaduras, grietas, penetración incompleta como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Penetración incompleta (Society, Welding Handbook, 1996).

2.1.1.5 Ventajas y desventajas

Las ventajas más importantes de este proceso son que no tiene restricción del tamaño del electrodo, se puede soldar en todas las posiciones, se logran altas tasas de depósito de soldadura, las velocidades de soldadura son altas debido a la alimentación continua del electrodo y a que hay una mayor tasa de deposición del material de aporte, es posible depositar soldaduras largas sin

parar. El GMAW es el único proceso que puede ser usado para soldar todos los metales y aleaciones comerciales y requiere muy poca limpieza después de haber sido aplicada la soldadura ya que no genera grandes cantidades de escoria. Dentro de las desventajas o limitaciones que se puede encontrar que el equipo es complejo, poco transportable y costoso, el aire afecta en gran medida este proceso ya que puede dispersar el gas protector, irradia mucho calor y la intensidad del arco eléctrico es alta, cuando se tienen juntas de difícil acceso es más complicado de usar debido al tamaño de la pistola.

2.1.2. Soldadura por resistencia.

2.1.2.1 Introducción

La soldadura por resistencia es el método más popular de uniones de soldadura de metales, esto está basado de acuerdo al número de soldaduras hechas al año por lo mayores usuarios de soldadura de resistencia. Por ejemplo la industria automotriz es por mucho el más grande usuario de metal y se estima que produce más de 90 billones de soldaduras por resistencia al año de acuerdo a su producción promedio de 3000 soldaduras por auto y una producción anual de 30 millones de vehículos en promedio en todo el mundo. (Karagoulis, 1991).

Algunas de las razones de que este proceso de soldadura tenga ese éxito son las siguientes (Karagoulis, 1991):

- a) Requiere relativamente alta energía y se lleva a cabo la soldadura de una manera rápida.
- b) No se requiere material de aporte ni gas de protección.
- c) Tiene bajo calor de entrada y baja distorsión.
- d) El equipo es sencillo y con facilidad de mantenimiento.
- e) Bajo costo del equipo y de operación.
- f) Fácil de automatizar y flexible.

2.1.2.2 Principio de operación

En este tipo de soldadura el calor en las piezas a soldar se genera mediante la resistencia que tienen estas piezas a pasar corriente eléctrica a través de ellas. En este proceso, la temperatura del metal se eleva por debajo de su punto de fusión y se completa la soldadura mediante la aplicación de presión.

La temperatura de los componentes a unir, se eleva mediante el paso de una fuerte corriente a bajo voltaje, que circula por los componentes. Cuando la corriente eléctrica circula a través de una resistencia, la energía eléctrica se convierte en energía calorífica, elevándose la temperatura de la resistencia. La resistencia en este proceso se produce entre las dos superficies sobre la sección transversal de los electrodos. Las partes a unir se sujetan entre los electrodos de cobre los cuales son enfriados por agua. La aplicación de la corriente, el tiempo de aplicación y la fuerza empleada deben estar coordinados para la correcta soldadura. La Figura 2.8 muestra un esquema general del proceso de soldadura por resistencia. (Jefferson, 2007).

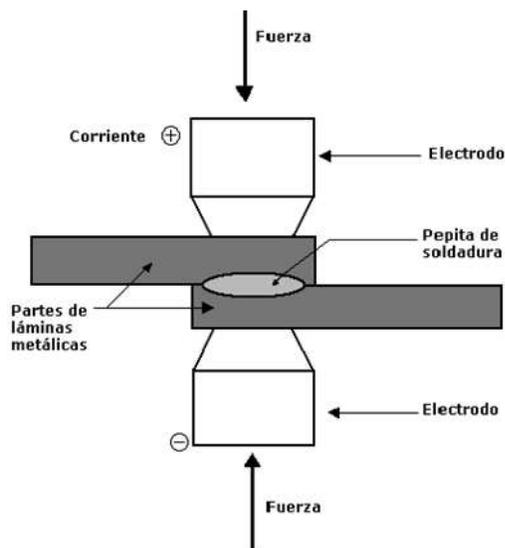


Figura 2.8 Esquema general del proceso de soldadura por resistencia.

A diferencia de otros métodos de soldadura, este proceso no requiere un material adicional para llevarse a cabo. Se utiliza la aplicación de fuerza mecánica la cual redefine la estructura del grano, produciendo propiedades físicas iguales o incluso mejores a la de los materiales soldados. La soldadura en realidad es un proceso metalúrgico.

2.1.2.3 Equipo

El equipo consta de 3 elementos básicos, un circuito eléctrico, equipo de control y un sistema mecánico. El circuito eléctrico comprende un transformador de soldadura, un contacto primario y un circuito secundario que incluye los electrodos los cuales conducen la corriente de soldadura. Los electrodos tienen la función de conducir la corriente de soldadura, transmitir una fuerza a la pieza de trabajo, disipan parte del calor a la zona de soldadura y mantienen la alineación. El equipo de control es el cual inicia e interrumpe el suministro de corriente al transformador de soldadura, controla la magnitud de la corriente y acciona y libera los mecanismos de fuerza de los electrodos. El sistema mecánico, controla la velocidad con la cual se acercan los electrodos a la pieza de trabajo.

2.1.2.4 Variables

La generación de calor que hace que la soldadura se lleve a cabo, depende de tres factores clave:

- a) Amperaje
- b) Resistencia del conductor
- c) Duración del paso de la corriente

La generación de calor se puede ver afectado por las diversas resistencias que se presentan entre las piezas y los electrodos que hacen que se distribuya la temperatura, estas resistencias son la del metal soldado y los electrodos, la del contacto entre las piezas de trabajo y los electrodos y la pérdida de calor hacia los electrodos y las piezas de trabajo.

Las variables más importantes durante el proceso son:

- Efecto de la corriente en la soldadura, un aumento en el área de la cara de los electrodos o del tamaño de las proyecciones reducirá la densidad de corriente y el calor de la soldadura. Si el tamaño del punto de soldadura y resistencia mecánica aumenta al incrementar la densidad de corriente, pero cuando se aplica corriente excesiva, se genere una menor resistencia mecánica.
- Efecto del tiempo de soldadura: El calor total generado es proporcional al tiempo de soldadura. Si se tiene un tiempo demasiado largo se puede generar una soldadura con baja resistencia además de que la ZAC se extenderá en el metal base.
- El efecto de la presión en la soldadura, esta se produce por la fuerza que los electrodos ejercen sobre la unión. Variándola, se puede reducir o incrementar la resistencia de contacto.
- Electrodo. Del tamaño de los electrodos depende la cantidad de corriente que pasa por el área de contacto. Si la deformación de los electrodos aumenta, el área se incrementa reduciendo la densidad de la corriente y la presión en la soldadura por lo que la calidad se ve deteriorada.
- Condición de la superficie. En caso de que se encuentre sucia la superficie, puede afectar la generación de calor debido a que las impurezas afectan la resistencia al contacto.
- Composición del material. Determina su calor específico, temperatura de fusión, calor latente de fusión, y conductividad térmica. Estas propiedades controlan la cantidad de calor requerida para fundir el metal y producir una soldadura.

2.1.2.5 Calidad

La calidad de la soldadura se define de acuerdo al aspecto de la superficie, Tamaño de la soldadura, Penetración, Resistencia mecánica y ductilidad. Discontinuidades internas y la separación de las láminas y expulsión de metal.

En gran medida las condiciones de la superficie de las piezas controlan la calidad de la soldadura que se va a obtener. Las superficies deben de estar libres de cualquier sustancia que pueda afectar la resistencia entre los materiales, estas sustancias pueden ser pintura, óxidos, aceites, grasas. De acuerdo al material que se va a soldar existen diferentes métodos de limpieza, para esta monografía se exponen los cuidados que se deben llevar a cabo para los aceros.

Los aceros por lo general están cubiertos con una película protectora contra la corrosión, esta película no es perjudicial sobre la soldadura siempre y cuando no esté contaminada con alguna otra sustancia.

Las siguientes son algunas recomendaciones que se deben tomar en cuenta para poder obtener puntos de soldadura con calidad:

- a) Para facilitar el paso de la corriente, tanto las placas como los electrodos deben estar limpios.
- b) Se deben usar brazos portaelectrodos cortos para poder evitar que haya una disminución en la presión de apriete.
- c) La punta de los electrodos debe estar limpia, lisa y del diámetro correcto. Ambos electrodos deben estar alineados.
- d) Es recomendable que los electrodos se refrigeren para evitar su sobrecalentamiento si trabajan de manera continua. Si los electrodos se sobrecalentaran, se deben dejar enfriar al aire y nunca enfriarse en agua ya que el cobre se recocería perdiendo algunas de sus propiedades mecánicas.

- e) Cuando se sueldan placas de diferente espesor, se debe calibrar el equipo de acuerdo al de menor espesor
- f) Las maquinas tienen un electrodo fijo y otro móvil, de tal manera que las placas a soldar se deben acercar al que se encuentra de manera estática y después el móvil se acerca a ella. Si se hace de manera contraria se puede perder la localización correcta del punto de soldadura
- g) La distancia entre los electrodos debe ser la menor posible para poder evitar esfuerzos dinámicos debido a la velocidad de cierre.

La siguiente imagen 2.9, muestra los defectos más comunes en soldadura por resistencia.



Figura 2.9 Defectos de soldadura comunes en soldadura por resistencia. (Peña, 2009).

2.1.2.6 Tipos de soldadura por resistencia

Existen variantes en el proceso de soldadura por resistencia, por lo que se reconocen diferentes tipos, que se describen a continuación:

Soldadura por puntos: no requiere material de aporte, el equipo puede ser móvil o fijo, la soldadura es realizada en cuestión de segundos y puede ser mecanizada. En una sola operación se pueden soldar más de dos placas. La figura 2.10 muestra un esquema general de la soldadura por puntos.

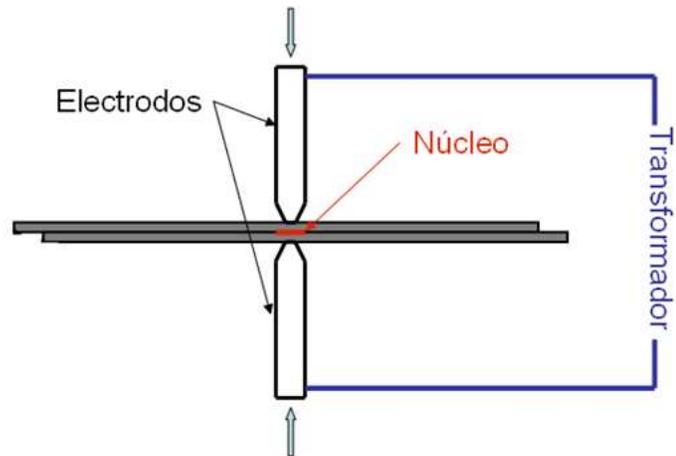


Figura 2.10. Esquema general de soldadura por puntos.

Soldadura por costura: la soldadura por resistencia se puede aplicar a costuras y juntas largas utilizando electrodos de rodillo. Las partes a unir se juntan entre electrodos circulares en giro. La corriente se aplica en pulsos, lo que se traduce en una serie de puntos de soldadura que se van superponiendo para formar una costura. Se usa en la manufactura de ductos, tanques para combustible, contenedores y tubería menor. La figura 2.11, muestra un ejemplo de soldadura por costura.

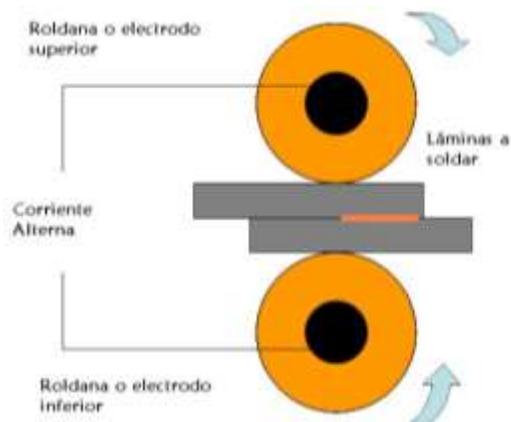


Figura 2.11 Esquema general de soldadura por costura.

Soldadura de proyección: formada por la proyección en una o dos de las piezas de trabajo. En esta soldadura el contacto con la superficie es controlado por el tamaño y forma de la proyección. Los propósitos de la soldadura por proyección son crear un balance del calor cuando los espesores de las piezas soldadas son diferentes y concentrar la soldadura en un área más pequeña de las piezas. La figura 2.12 muestra el proceso de soldadura por proyección.

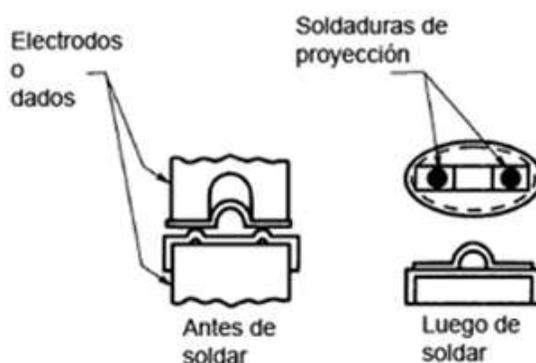


Figura 2.12 Proceso de soldadura por proyección.

2.1.2.7 Tipos de uniones

La carga en una estructura soldada es transferida de un miembro a otro a través de las soldaduras localizadas en las juntas o uniones y existen diferentes tipos de uniones. Las combinaciones de las soldaduras deben ser usadas para conectar una junta dependiendo del esfuerzo requerido y las condiciones de carga. Los tipos de uniones son las siguientes: unión a tope, de esquina, en "T", traslape y de canto o borde, como se muestra en la figura 2.13.

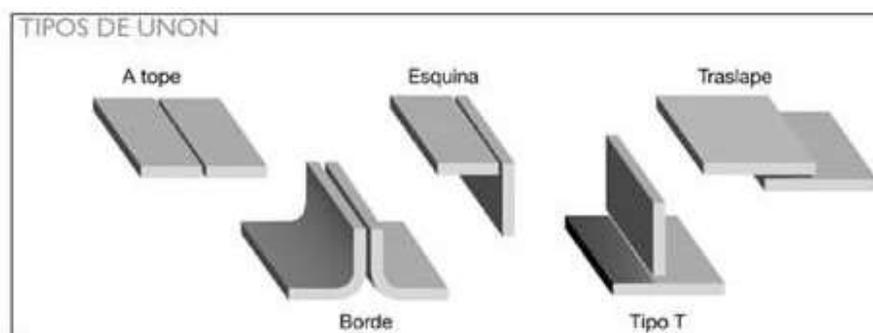


Figura 2.13: Tipos juntas de soldadura.

2.1.2.8 Diseño de la soldadura por puntos.

La junta diseñada para esta aplicación de soldadura consiste en un traslape. La máquina a usar, debe ser diseñada de tal forma que se tenga libre acceso a ella por medio de la máquina o pistola portable. Los factores que se deben tomar en cuenta para diseñar piezas a soldar por este proceso son el tamaño de la pestaña, el traslape de la junta, el espacio entre las soldaduras, la accesibilidad a la junta, las marcas dejadas en la superficie y la resistencia requerida de la soldadura.

Las siguientes son algunas recomendaciones que se deben considerar al momento de diseñar una junta de soldadura para la soldadura de resistencia:

- a) Espacio del electrodo: Lo primero a considerarse es que se tenga suficiente espacio para el electrodo. Las figuras 2.14A muestra la

condición ideal de un punto de soldadura en la figura 2.14B, se puede observar una soldadura en una pieza con un doblez. En estos casos, se debe considerar que el espesor del electrodo tenga suficiente espacio como se muestra en la figura 2.14C. En caso de que exista un contacto entre la pieza y el electrodo, habrá una pérdida de corriente así como una marca entre la pieza y el electrodo en donde se efectuó el contacto. Si el espacio es reducido se requerirá un desplazamiento en el electrodo para evitar el contacto. En algunas ocasiones debido a la geometría de la pieza se requerirá un diseño especial del electrodo como se muestra en la figura 2.14D. Los grados estándares que se pueden usar son 30° desde la vertical no se debe usar más de esa medida.

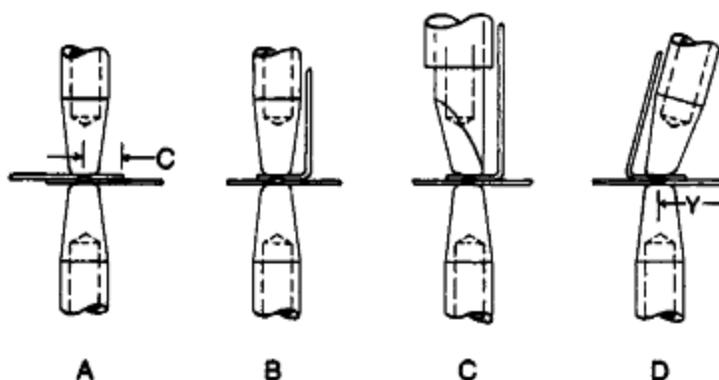


Figura 2.14: Típicas soldaduras por resistencia.

- b) Tamaño de la pestaña: esta distancia es la que se muestra en la figura 2.14A en la dimensión C. Esta distancia es la requerida entre el centro del electrodo y la orilla de la pieza. Si el punto de soldadura esta hecho muy a la orilla, será insuficiente el cuerpo que soporte la soldadura generando soldaduras débiles y defectuosas.
- c) Espacio disponible de la maquina (TD): también llamado profundidad de la garganta, se muestra en la figura 2.15. Es el espacio que se requiere para la máquina para poder colocar las piezas a soldar. Es importante considerar la mínima distancia requerida para reducir las pérdidas de corriente generadas por una garganta pronunciada.

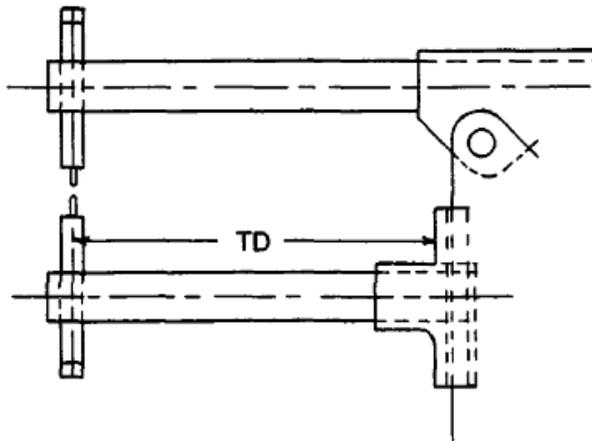


Figura 2.15: Profundidad de garganta de una máquina de soldadura por resistencia.

- d) Área de contacto: de acuerdo a lo anterior, la mínima área de contacto debe ser dos veces el mínimo del tamaño de la pestaña.
- e) Resistencia de la soldadura: existen normas para las pruebas a las que se deben someter las soldaduras para validar su resistencia de acuerdo al material, sin embargo la máxima junta de cualquier soldadura es de aproximadamente el 90% de la resistencia del metal base.
- f) Selección del equipo: de la mano con el diseñador del producto, se debe generar un buen concepto de del tipo de equipo que se debe diseñar para poder soldar las piezas. Primero se debe definir si será un equipo móvil o fijo, lo que define esto es el volumen del producto. si el volumen es alto es más sencillo mover el equipo a donde se encuentra el material. Si se realizan diferentes piezas es más sencillo colocar un equipo fijo de sujeción y la maquina se movería a este equipo. Las pistolas portátiles deben estar diseñadas para poder manejarlas de una manera sencilla aun y cuando deben seguir conectadas a la fuente de corriente, sin embargo con un correcto equipo de balanceo se puede diseñar algo sencillo de operar. (Society, Fundamentals of Resistance welding, 2003).

2.1.2.9 Ventajas y desventajas

Las principales ventajas son la rapidez y adaptabilidad para la automatización en producciones de alto volumen. Este tipo de soldadura resulta económica ya que es más rápida que la soldadura por arco y requiere menos capacitación. Sin embargo también presenta ciertas limitaciones como que las uniones de traslape añaden peso y costo de materiales al producto, el equipo es costoso, se requiere mucha potencia de corta duración y alta corriente y presenta baja resistencia mecánica a la tensión y a la fatiga.

Dentro de las ventajas más importantes se pueden citar las siguientes:

- a) Una serie de puntos de soldadura se pueden realizar de forma más rápida especialmente en metales pesados.
- b) Mantenimiento de electrodos es menor.
- c) Si se tiene un correcto mantenimiento de los electrodos no habrá proliferación de la corriente.
- d) Los puntos se pueden realizar en superficies en ángulo o con curva. Esto es una ventaja cuando dos o más puntos se deben realizar.
- e) Las proyecciones pueden estar más juntas que puntos de soldadura.
- f) En la mayoría de los casos, maquinas con equipos de múltiples proyecciones pueden ser usados e incluso a un costo menor.
- g) Cuando se usa menos metal en proyección, se requiere menos calor y por lo tanto menos corriente por soldadura.

2.1.2.10 Microestructura

La microestructura de un punto de soldadura de resistencia se asemeja a un vaciado de metal rápidamente enfriado. Una proyección de soldadura no se clasifica oficialmente como un proceso de soldadura por fusión de acuerdo con la Asociación de fabricantes de soldadura por resistencia (delVecchio, 1956). Esto debido al hecho de que la fusión de la superficie no se produce en la

soldadura de resistencia y a que metalográficamente se revela que la fusión se lleva a cabo en la “pepita” al interior del punto de soldadura. Como se muestra en la figura 2.16. El enfriamiento rápido del punto de soldadura entre las placas puede generar una microestructura martensítica. Alrededor de la pepita hay diferentes alteraciones de la microestructura. La región afectada alrededor de la pepita es la zona afectada por el calor. (Karagoulis, 1991).

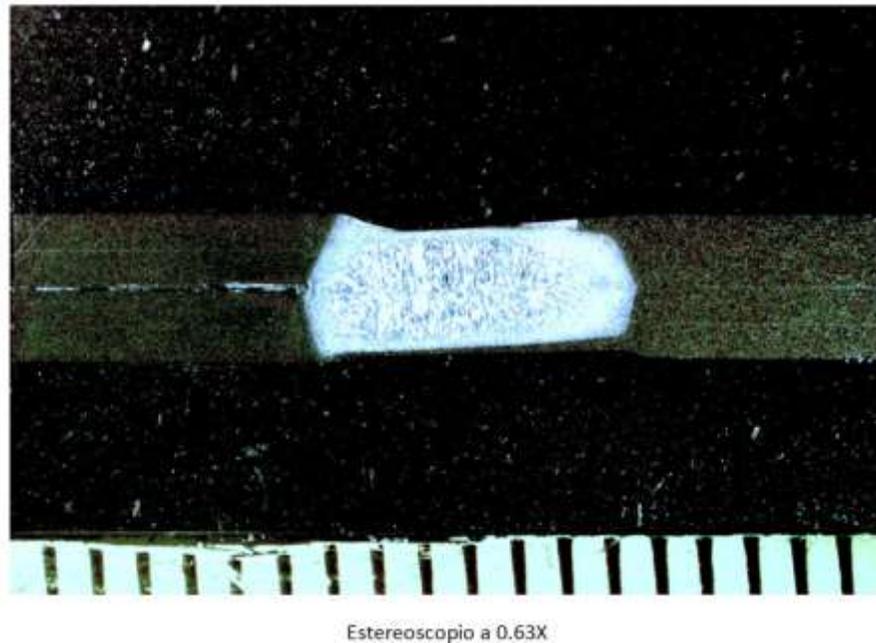


Figura 2.16: Punto de soldadura por resistencia muestra SM12 mm.

La solidificación que se lleva a cabo en la pepita es un crecimiento celular. Se produce una solidificación por el crecimiento epitaxial de los granos orientados hacia el límite sólido-líquido. Los granos que crecen a una velocidad mayor son los que están orientados con el crecimiento direccional paralelo del máximo gradiente térmico. (Easterling, 1983). Estos granos dominan rápidamente e interrumpen a los granos de crecimiento lento y mal orientado.

A pesar de que la solidificación se realiza de forma rápida, existe la posibilidad de que se generen segregaciones de los eutécticos de bajo punto de

fusión al centro de la soldadura ocasionando fisuras por calor o poros en la línea central.

Los defectos principales de las soldaduras por resistencia no generan problemas en la resistencia de la soldadura debido a lo siguiente: en primer lugar, las cargas estructurales son transmitidas a través de las hojas, se centralizan en la zona afectada por el calor (ZAC) de la soldadura y en segundo lugar, la dirección de enfriamiento se genera hacia el exterior de la pepita en compresión residual lo que tiende a inhibir la fatiga del núcleo ya que las grietas no se encuentran dentro de él.

2.1.3. Aceros, clasificación y características

2.1.3.1 Clasificación del material

Los aceros son aleaciones hierro-carbono que pueden contener concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Las propiedades mecánicas son sensibles al contenido de carbono, que normalmente es menor que el 1.00% en peso. Los aceros más comunes se clasifican con la concentración de carbono, contenido bajo, medio y alto. Dentro de cada grupo también existen subclases, de acuerdo a la concentración de otros elementos aleantes. La tabla 2.1 muestra una clasificación de los aceros de acuerdo a la cantidad de carbono contenida en el material.

Se pueden realizar diferentes clasificaciones de los aceros no solo con la composición química, sino también con características como el método de fabricación, si se realiza algún tratamiento térmico, la microestructura, la resistencia del material.

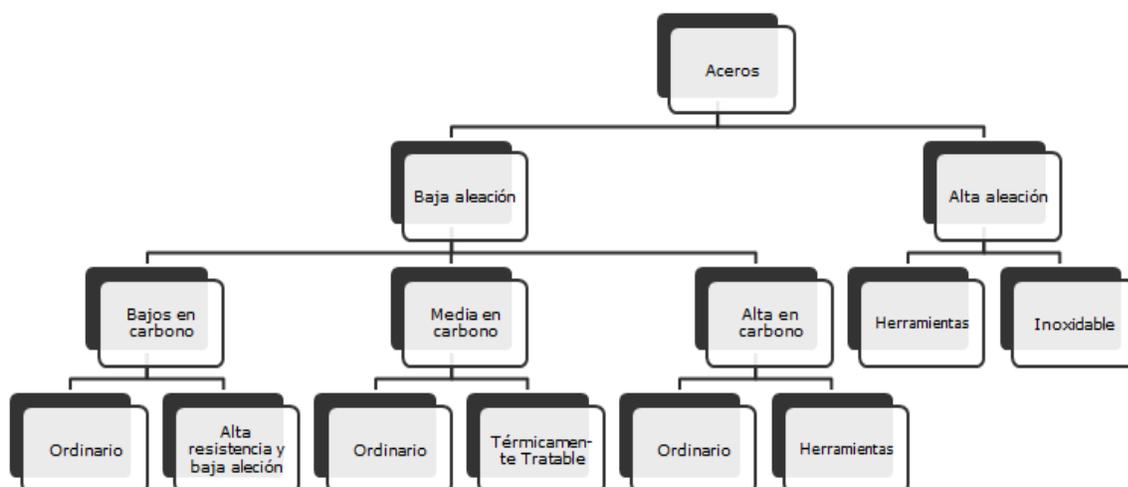


Tabla 2.1: Clasificación de aceros.

2.1.3.2 Composición Química

El acero A13C, para placas delgadas también conocido como acero A572, tiene alta dureza y es un acero al bajo carbono, es parte de los aceros HSLA. El acero A572 tiene bajo contenido de Carbono, y es empleado por la planta de Tractores, el A572 Grado 50 tiene en su composición química Carbono (Máx. 0.23%). Los elementos formadores son Manganeso (Máx. 1.35%), Potasio y Azufre (Máx. 0.04%), Cobre y Niquel (Máx. 0.20%), Cromo (Máx. 0.15%), Molibdeno (Máx. 0.06%) Vanadio, Cadmio y Titanio (Máx. 0.005%). Estos aceros presentan buenas propiedades de formado y de soldabilidad y es rodada en caliente. La composición química es mostrada en la siguiente tabla.

TABLE 2 Chemical Composition^a
For Hot Rolled Steel Sheet and Strip Designations SS, HSLAS, HSLAS-F, and UHSS

Designation	% Heat Analysis, Element Maximum unless otherwise shown													
	C	Mn	P	S	Al	Si	Cu ^b	Ni	Cr	Mo	V	Cb	Ti	N
SS: ^c														
Grade 30 [205]	0.25	0.90	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 33 [230]	0.25	0.90	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 36 [250] Type 1	0.25	0.90	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 36 [250] Type 2 ^d	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 40 [275]	0.25	0.90	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 45 [310] Type 1 ^d	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 45 [310] Type 2	0.02–0.08	0.30–1.00	0.030–0.070	0.025	0.02	0.60	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008	0.010–0.030
Grade 50 [340] ^d	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 55 [380] ^d	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 60 [410]	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 70 [480]	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
Grade 80 [550]	0.25	1.35	0.035	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.025	...
HSLAS: ^e														
Grade 45 [310] Class 1 ^d	0.22	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 45 [310] Class 2	0.15	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 50 [340] Class 1 ^d	0.23	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 50 [340] Class 2	0.15	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 55 [380] Class 1 ^d	0.25	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 55 [380] Class 2	0.15	1.35	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 60 [410] Class 1	0.26	1.50	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 60 [410] Class 2	0.15	1.50	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	...
Grade 65 [450] Class 1	0.26	1.50	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	^f
Grade 65 [450] Class 2	0.15	1.50	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	^f
Grade 70 [480] Class 1	0.26	1.65	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.16	0.005	0.005	0.005	^f
Grade 70 [480] Class 2	0.15	1.65	0.04	0.04	...	...	0.20	0.20	0.15	0.16	0.005	0.005	0.005	^f
HSLAS-F: ^e														
Grade 50 [340] and 60 [410]	0.15	1.65	0.020	0.025	...	...	0.20	0.20	0.15	0.06	0.005	0.005	0.005	^f
Grade 70 [480] and 80 [550]	0.15	1.65	0.020	0.025	...	...	0.20	0.20	0.15	0.16	0.005	0.005	0.005	^f
UHSS: ^e														
Grade 90 [620] and 100 [690] Type 1	0.15	2.00	0.020	0.025	...	...	0.20	0.20	0.15	0.40	0.005	0.005	0.005	^f
Grade 90 [620] and 100 [690] Type 2	0.15	2.00	0.020	0.025	...	...	0.60	0.50	0.30	0.40	0.005	0.005	0.005	^f

Tabla 2.2: Composición química aceros ASTM1011.

2.1.3.3 Propiedades mecánicas

Los aceros HSLA proveen mejores propiedades mecánicas o mejor resistencia a la corrosión que los aceros. Una de las diferencias es que estos aceros no son creados con la finalidad de obtener una composición química específica sino con la finalidad de cumplir con propiedades mecánicas específicas. Los elementos como cobre, titanio, vanadio y niobio son agregados para incrementar la resistencia. (Callister, 209) El objetivo es el de alterar la microestructura de tal forma que se creen carburos con una matriz de pura ferrita lo cual incrementa la tenacidad, afina el grano incrementando la tensión a la

fluencia. Elementos como el cobre, silicio, níquel, cromo y fósforo son agregados que incrementan la resistencia a la corrosión.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

3.1 Acero de baja aleación y de alta resistencia

Como se puede analizar en la literatura el metal base de los productos agrícolas a evaluar son de baja aleación y de alta resistencia. Estos materiales tienen las características necesarias que se requieren para ser tratados con ambos procesos.

La selección de un proceso de soldadura u otro no se ve afectado debido al material base a usar. La soldabilidad de este entre ambos procesos no se ve afectada.

3.2 Parámetros de la soldadura.

Para poder definir los parámetros de operación de soldadura por resistencia y por arco se debe realizar una comparación del proceso actual

contra la propuesta de la soldadura por resistencia. Dentro de las ventajas generales del proceso de soldadura por resistencia se menciona que es más económica que el de soldadura por arco. Es necesario comprar ambos procesos en cuanto a su resistencia a la tensión y propiedades mecánicas para poder definir el mejor método.

De acuerdo a la bibliografía antes mostrada, se deduce que ambos procesos pueden darnos las características necesarias para las aplicaciones que se requieren en la planta. Debido a esto se hace un caso de estudio en donde los resultados a las pruebas nos darán la pauta de la efectividad de ambos procesos.

Para poder hacer el análisis de los procesos de soldadura se debe tomar en consideración las especificaciones solicitadas por los estándares de soldadura internos de John Deere los cuales son el JDV 20.1 Especificaciones para la soldadura por arco y el JDV 20.2 Valor especificado para la soldadura por resistencia, los cuales serán referenciados, para el análisis de las pruebas.

3.2.1 JDV 20.1 Especificaciones para la soldadura por Arco

Esta normativa interna de John Deere, establece las normas de mano de obra y de calidad de la soldadura básica para los productos soldados por arco fabricados por y para John Deere. Esta especificación se aplica a los diseños de productos anteriores con referencia en DTW 1395. En JDV 20.1, se incluyen los requisitos generales para el producto soldado y está pensado para los diseños nuevos.

3.2.2 JDV 20.2 Valor especificado para la soldadura por resistencia

Estable las normas de mano de obra y de calidad de la soldadura básica para los productos soldados por resistencia fabricados por y para John Deere. En JDV 20.2 se incluyen los requisitos para las soldaduras producidas durante los procesos de soldadura por puntos, por cordones y por proyección. En JDV

20.2 también se incluyen los requisitos generales para los productos de soldadura por resistencia, y para los diseños nuevos y revisados.

Este estándar indica que el material no debe tener sarro, óxido, pintura, grasa ni aceite. Los líquidos que previenen el óxido, el estampado o el trefilado se permiten únicamente si se verificó que no perjudican la calidad de la soldadura. En las instalaciones de John Deere no se deben realizar soldaduras a 120 mm de pintura o revestimientos gruesos sin tomar las precauciones para proteger la salud del operador. Algunos ejemplos de precauciones incluyen: retiro de revestimientos, uso de protectores de vías respiratorias o ventilación de escape localizado.

Para garantizar una correcta aplicación de una soldadura por resistencia, se deben considerar las siguientes pruebas de calificación.

- a) Para la configuración de una máquina de soldadura por puntos nueva, se recomienda realizar pruebas de destrucción completas al conjunto si todas las soldaduras son aceptables.
- b) Para los diseños de productos nuevos que se construirán en las celdas existentes, se recomienda las pruebas de destrucción completa si todas las soldaduras son aceptables.
- c) Para pruebas periódicas, se debe realizar la inspección de la primera parte a la última parte o cualquier cambio del parámetro, probar una parte soldada haciendo palanca (cincel) por grupo, salvo que no lo permita la geometría de la pieza, el acceso a la junta, o por razones cosméticas. Para estas situaciones, utilizar una prueba de despegado o una prueba de tracción de un cupón. Se puede utilizar una prueba de destrucción en vez de estas pruebas.
 - a. Prueba de cincel y martillo no destructiva: consiste en forzar una barra ahusada o un cincel en las solapas a cada lado de la soldadura que se prueba hasta que el material se deforma sin separación de la junta. La Figura 3.1 ilustra la prueba de palanca.

Se deben restaurar las deformaciones que se producen durante la prueba.

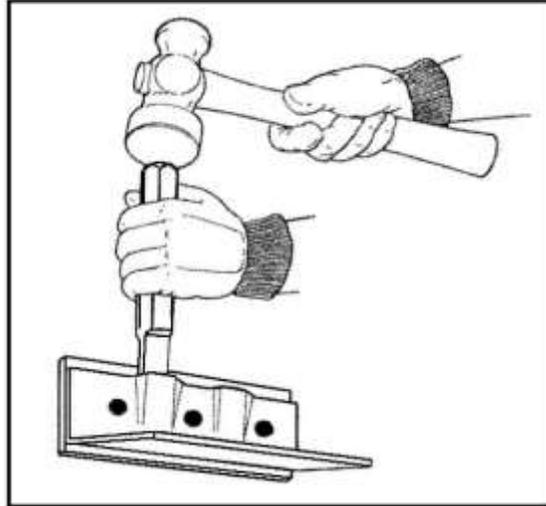


Figura 3.1: Prueba de palanca no destructiva (cincel)

b. Prueba de desprendimiento: La Figura 3.2 muestra la técnica correcta para realizar una prueba de desprendimiento.

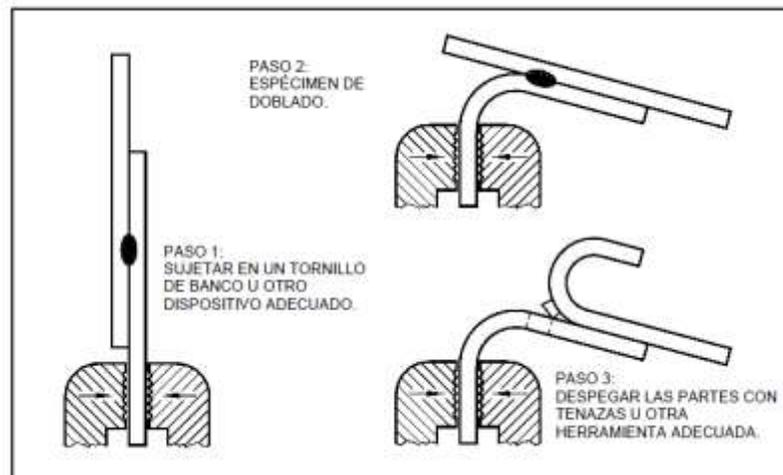


Figura 3.2: Procedimiento de la prueba de desprendimiento

c. Prueba de tensión a esfuerzo cortante: en la especificación AWS C1.4M para ver el procedimiento recomendado y el tamaño del

cupón para la prueba de tensión a esfuerzo cortante de los cupones de soldadura por puntos. El cual especifica que la mínima resistencia a la tensión que debe soportar un material como el usado en esta monografía (345 Mpa) de resistencia a la tensión, debe soportar 13.4 KN o su equivalente de 1366.42 KgF.

Table 4^{A, B}
Tension-Shear Strength Requirements for Resistance Spot Welds of Carbon and Low-Alloy Steels

Minimum Tension-Shear Strength^a

Material Thickness (t)		Low-Carbon Steel 207 MPa [30 ksi] Yield Strength		Low-Carbon Steel 483 MPa [70 ksi] Yield Strength		Low-Alloy High-Strength Steel ^b 345 MPa [50 ksi] Yield Strength		Low-Alloy High-Strength Steel ^b 552 MPa [80 ksi] Yield Strength	
		kN	lb-force	kN	lb-force	kN	lb-force	kN	lb-force
0.40	0.016	1.1	250	2.6	582	1.0	416	3.0	666
0.50	0.020	1.6	349	3.6	814	2.6	581	4.1	930
0.60	0.024	2.0	450	4.8	1070	3.4	764	5.4	1223
0.70	0.028	2.6	578	6.0	1348	4.3	963	6.9	1541
0.80	0.031	3.1	700	7.3	1648	5.2	1177	8.4	1883
0.90	0.035	3.8	843	8.8	1966	6.3	1404	10.0	2247
1.00	0.039	4.4	987	10.2	2302	7.3	1645	11.7	2631
1.10	0.043	5.1	1138	11.8	2656	8.4	1897	13.5	3036
1.30	0.051	6.5	1463	15.2	3413	10.8	2438	17.4	3900
1.50	0.059	8.1	1813	18.8	4230	13.4	3021	21.5	4834
1.70	0.067	9.7	2187	22.7	5104	16.2	3645	26.0	5833
2.00	0.079	12.4	2791	29.0	6512	20.7	4652	33.1	7443
2.50	0.098	17.4	3901	40.3	9101	28.9	6501	46.3	10402
3.00	0.118	22.8	5127	53.2	11964	38.0	8546	60.8	13673
3.20	0.126	25.1	5649	58.6	13180	41.9	9414	67.0	15063
3.50	0.138	28.7	6461	67.1	15076	47.9	10769	76.7	17230
4.00	0.157	35.1	7894	81.9	18420	58.5	13157	93.6	21051
4.50	0.177	41.9	9420	97.8	21979	69.8	15700	111.7	25119
5.00	0.197	49.1	11033	114.3	25743	81.8	18388	130.9	29420
5.50	0.217	56.6	12728	132.1	29699	94.4	21214	151.0	33942
6.00	0.236	64.5	14503	150.5	33839	107.5	24171	172.0	38074

^a Basic formula for estimating tensile strength:
tensile strength = 1.5 × yield strength

^b These values are based on tests performed on uncoated steels.

^c Basic formula for calculating the approximate tensile-shear strength up to 414 MPa [60 ksi]:
tensile-shear strength = R × 1 × t × tensile strength
where
R = 3.141596

Tabla 3.1: Requerimientos de prueba de tensión.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

Para la realización de esta monografía, se utilizó un acero de especificación A13C, con un mínimo de 345 MPa de esfuerzo de tensión con un espesor de 1.56 mm utilizado actualmente para la fabricación de los cofres de los tractores Merit. A continuación se muestra una imagen del ensamble soldado.

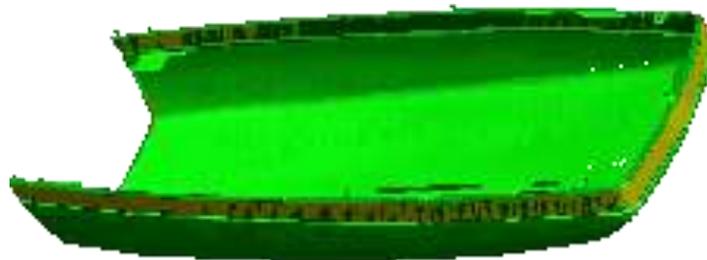


Figura 4.1: Modelo del cofre de los tractores Merit.

La siguiente imagen muestra como es usado en cofre. Para este tipo de tractor el cofre es fijo, no se abre, por lo que se cuenta con las rejillas laterales para reparaciones. Este tractor es compatible con aspiración turbo.



Figura 4.2: Tractor Merit.

4.1 Determinación de variables

De acuerdo con el análisis del estado del arte para la comparación de los dos procesos se decidió hacer una réplica de la unión de soldadura que se realiza en el cofre y someterla a los dos procesos teniendo como variables lo siguiente:

- a) Tipo de proceso de soldadura
 - a. Soldadura por resistencia
 - i. Presión constante 20,394 KgF/m²
 - ii. Corriente Constante 17 kA
 - iii. Tiempo constante: 5 ciclos de soldadura
 - b. Soldadura por Arco
 - i. Corriente constante 556 A

- ii. Voltaje constante 28.7 V
- b) Variación en traslape de placas
 - a. 12 mm (Réplica de cofre).
 - b. 25.4 mm (Estándar).

4.2 Elaboración de las probetas de soldadura

Para la elaboración de las probetas de soldadura se tomó como práctica recomendada el replicar la junta de soldadura en cuanto al traslape, así como seguir los estándares de soldadura internos de John Deere, por lo que se desarrollaron las siguientes probetas:

- a) Probeta para hacer prueba de desprendimiento:
 - a. SD: Ancho de 15 mm soldada por resistencia.



Figura 4.3: Prueba de desprendimiento.

- b) Probetas para pruebas de tensión:
 - a. A1, A2 y A3: Soldadura por arco, 12 mm de traslape, cordón 10mm.

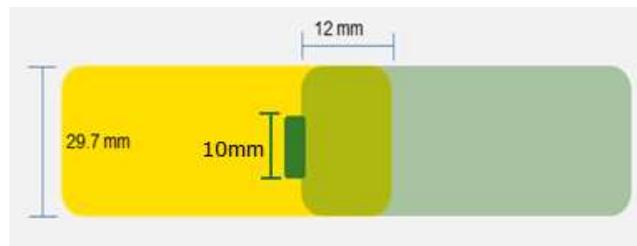


Figura 4.4: Probeta A1, A2, A3.

- b. A4, A5 y A6: Soldadura por arco, 25.4 mm de traslape.

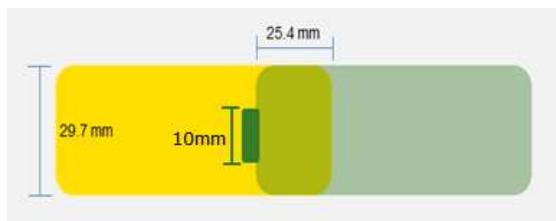


Figura 4.5: Probeta A4, A5, A6

- c. S1, S2 y S3: Soldadura por resistencia, 12 mm de traslape

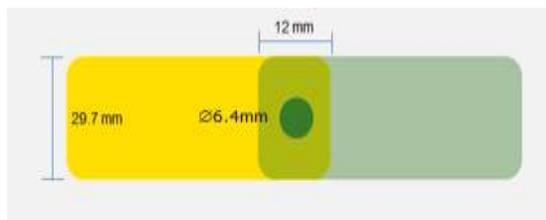


Figura 4.6: Probeta S1, S2, S3

- d. S4, S5 y S6: Soldadura por resistencia, 25.4mm de traslape

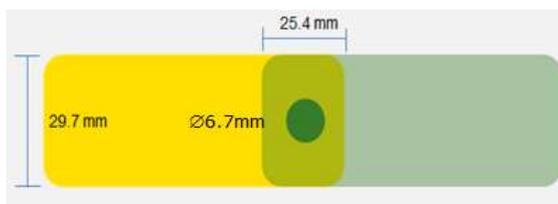


Figura 4.7: Probeta S4, S5, S6

- c) Probetas para metalografías y microdureza:

- a. AM: Soldadura por Arco.

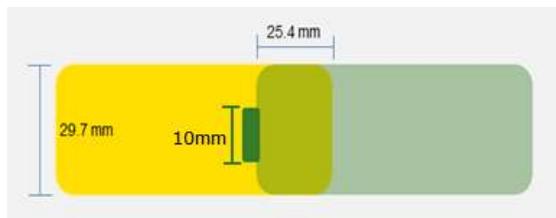


Figura 4.8: Probeta AM

b. SM: Soldadura por resistencia.

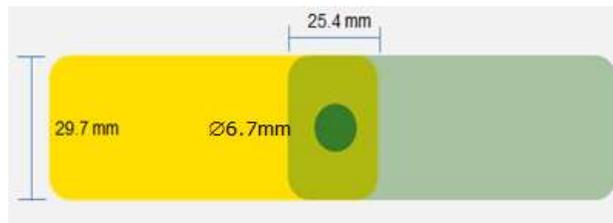


Figura 4.9: Probeta SM

Para la elaboración de las probetas de soldadura se utilizó el siguiente equipo:

a) Máquina de soldar Lincoln Electric Power Wave 455M



Figura 4.10: Máquina de soldar Lincoln Electric

b) Máquina de soldar por proyección ARO



Figura 4.11: Máquina de soldadura por proyección ARO

Las pruebas realizadas a las probetas de soldadura fueron:

- a) Desprendimiento: SD
- b) Tensión a esfuerzo cortante: A1, A2, A3, A4, A5, A6, S1, S2, S3, S4, S5, S6
- c) Metalografía y microdureza: AM y SM

4.2.1 Prueba de desprendimiento

Para la elaboración de esta prueba se coloca la muestra unida por un punto de soldadura en un banco y mediante el uso de pinzas o con el uso de un cincel se intenta despegar o desprender el punto de soldadura que las une, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 4.12: Prueba de despegado realizada

El objetivo de la prueba de desprendimiento es evidenciar la fusión en las láminas soldadas, se analiza revisando visualmente y evidenciando la fusión del punto de soldadura remanente en la lámina, además de medir el diámetro promedio del punto de soldadura. (Lopez, 2008) Ver figura 4.13

4.2.2 Prueba de tensión a esfuerzo cortante

Para la elaboración de esta prueba se coloca las muestras unidas por el punto de soldadura a una prueba de tensión, en una máquina de pruebas mecánicas y se registra cual es la carga máxima soportada por la unión hasta el desprendimiento de punto de soldadura o fractura en metal base.

4.2.3 Análisis metalográfico

Este ensayo consiste en cortar por el centro del punto de soldadura una sección de ambas probetas, la realizada con soldadura por arco y soldadura por resistencia 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 4.13

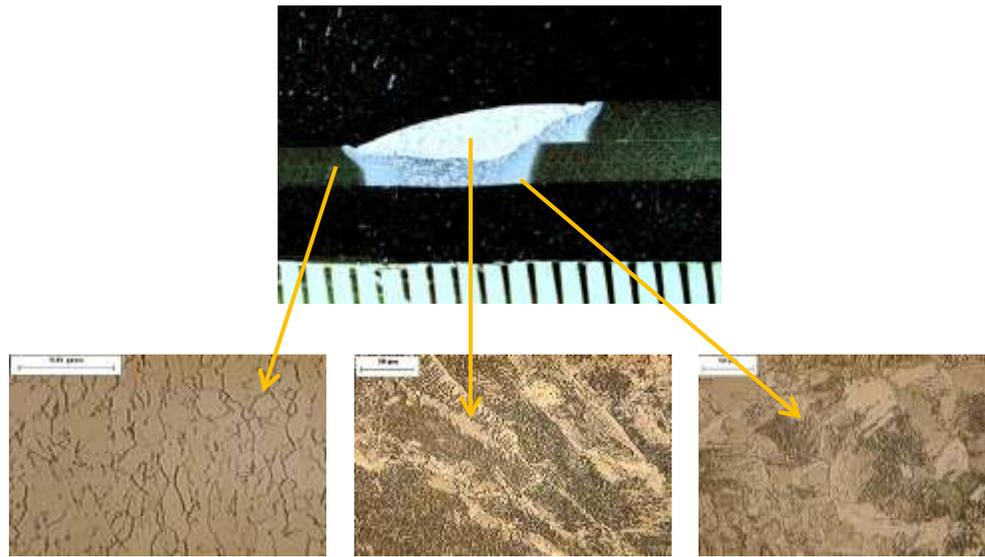


Figura 4.13: Prueba metalográfica. Estetoscopio, Metal base, ZF, ZAC 200X

4.2.4 Análisis de dureza

Este ensayo consiste en analizar la dureza de la muestra en diferentes puntos a lo largo del cordón de soldadura. El objetivo es medir la dureza en las diferentes áreas encontradas en los cupones, como la zona afectada por el calor, el metal base y la zona de fusión y hacer una comparación de estos resultados con la microestructura encontrada en la muestra

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Prueba de desprendimiento para soldadura de puntos

Como resultado a esta prueba, se pudo apreciar la completa fusión en el punto de soldadura y fue imposible desprender este punto, cediendo primero el metal base antes que la soldadura de puntos.



Figura 4.14: Prueba de despegado realizada

4.3.2 Prueba de tensión a esfuerzo cortante

En la prueba de tensión a esfuerzo cortante las láminas unidas por el punto de soldadura y por el cordón de soldadura fueron sometidas a una prueba de tensión en una maquina universal de pruebas mecánicas y los valores obtenidos de carga máxima y esfuerzo cortante se muestran Tabla 4.1

Probeta No.	Diámetro / long. Cordon mm	Espesor mm	Ancho mm	Carga Max	Registro COMIMSA	Ruptura
A1	8.43	1.56	29.7	910	14PM0573	ZAC
A2	8.3			824		ZF
A3	7.18			762		ZF
A4	8.69			818		ZAC
A5	8.68			862		ZF
A6	8.68			575		ZF
S1	6.22	1.56	29.7	1150	14PM0573	MB
S2	6.96			1150		MB
S3	7.07			1000		MB
S4	6.56			1280		MB
S5	6.64			1160		MB
S6	7.36			1170		MB

Tabla 4.1: Resultados prueba de tensión a esfuerzo cortante

Los valores obtenidos de carga máxima se grafican en las figuras 4.15 para la soldadura por arco y en la figura 4.16 para la soldadura por resistencia.

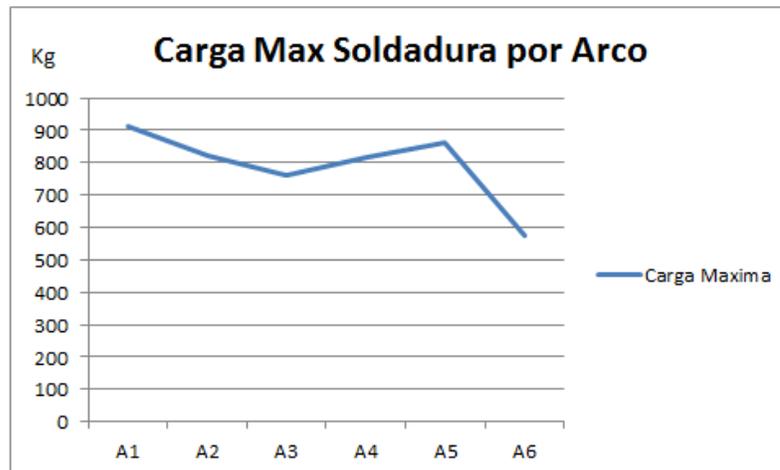


Figura 4.15: Gráfica Carga Máxima soldadura por Arco

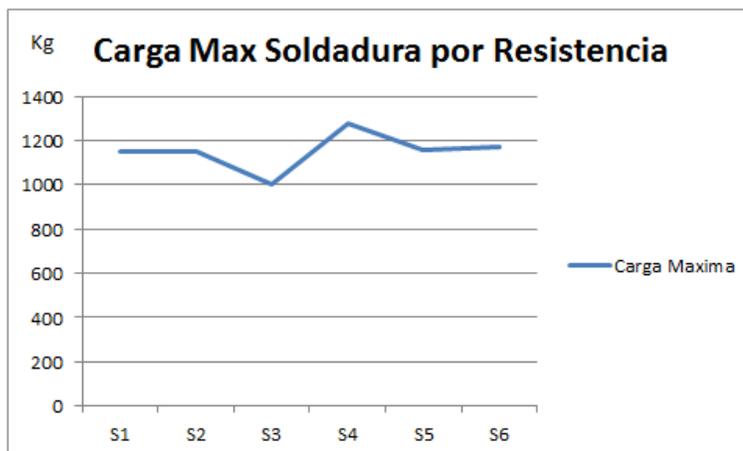


Figura 4.16: Gráfica Carga Máxima soldadura por Resistencia

Uniendo ambas graficas en una sola para poder hacer una comparación de los resultados obtenidos, podemos ver que bajo las mismas condiciones las probetas de la soldadura por resistencia soportaron una mayor carga máxima

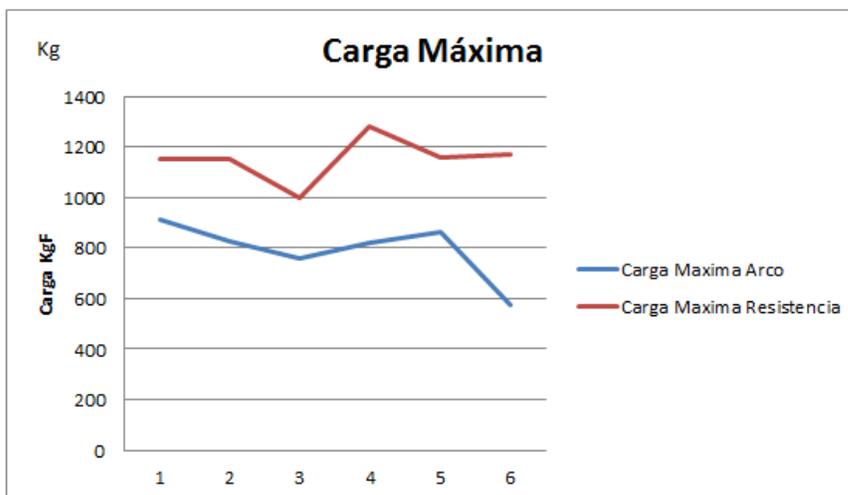


Figura 4.17: Gráfica comparativa Carga Máxima

En los resultados de esta prueba se puede observar que la soldadura por resistencia soportó mayor carga y analizando los puntos de fractura de las pruebas, en todos los casos, en la soldadura por resistencia fracturó en el metal

base y por otro lado la soldadura por arco fracturó en ZAC, y en la zona de fusión.

Las siguientes figuras muestran las probetas después del ensayo de tensión. En la figura 4.18 están las pruebas de soldadura por arco y en la 4.19 las pruebas de soldadura por resistencia.



Figura 4.18: Probetas de soldadura por arco después de prueba de tensión a esfuerzo cortante



Figura 4.19: Probetas de soldadura por resistencia después de prueba de tensión a esfuerzo cortante

Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos y mediante un ANOVA de dos factores, se probó la significancia del factor sobre la respuesta teniendo el siguiente resultado. El R-Cuad que se obtuvo fue de 83.35% y este es el porcentaje de los datos que puede explicar el modelo entre mayor sea este valor, la explicación de los datos a evaluar será mejor. El R-Cuad ajustado fue de 77.11% y este nos indica que tanto se pueden explicar los datos pero mediante los errores. De igual manera a mayor valor, mayor confiabilidad de la explicación de los datos.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Proceso	1	388440	388440	37.58	0
Distancia	1	397	397	0.04	0.85
Interacción	1	25300	25300	2.45	0.156
Error	8	82699	10337		
Total	11	496836			

Tabla 4.2: Resultado ANOVA de dos factores. Distancia y proceso

De la tabla anterior podemos deducir que la distancia y la iteración tienen menor grado de significancia en el efecto de esta sobre las muestras, sin embargo, el proceso representa la mayor variación en los resultados obtenidos.

La siguiente figura muestra las gráficas de residuos del análisis estadístico, los cuales nos muestran que los datos pareciera que no son normales, por lo que se tuvo que realizar un análisis de normalidad.

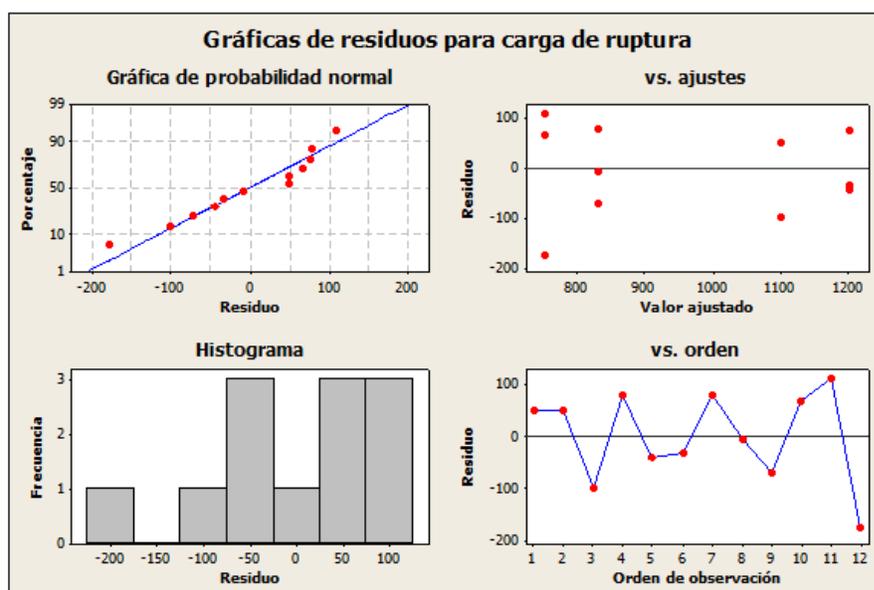


Figura 4.20: Gráfica de residuos del ANOVA

Se realizó un análisis de normalidad de Anderson- Darling a los residuos para comprobar la normalidad de los datos, obteniendo un p-value de 0.362, lo cual nos indica que los datos Si son normales. Los resultados se muestran en la siguiente figura:

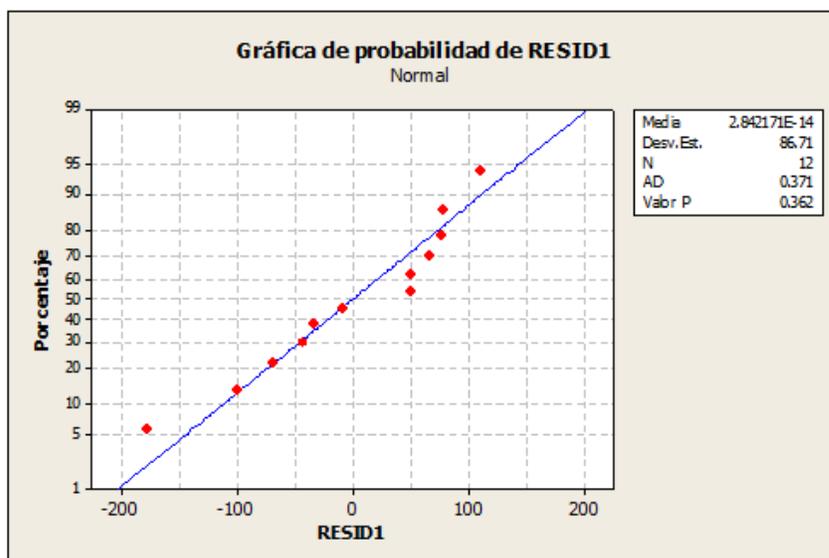


Figura 4.21: Gráfica de normalidad de los residuos

Se realizó una gráfica de efectos principales, la cual nos muestra que el proceso tiene un enorme efecto sobre la tensión de las probetas, sin embargo la distancia no es un factor importante, tiene un efecto muy bajo sobre la tensión, así que se podrían generar diseños de soldadura a partir de la distancia mínima requerida para la unión de acuerdo al tamaño del electrodo. Los resultados se muestran en la siguiente figura

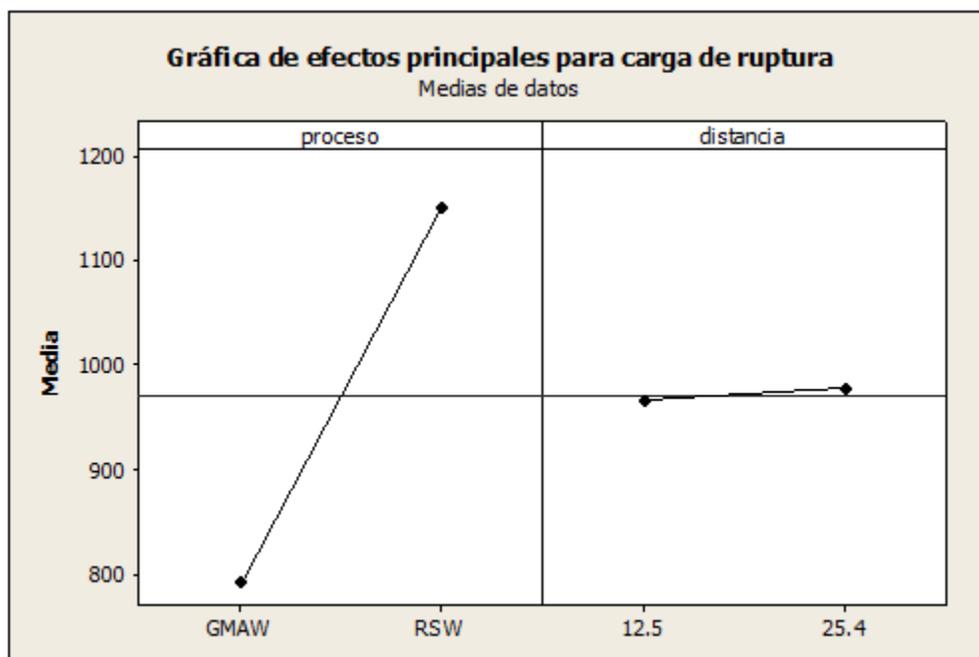


Figura 4.22: Gráfica de efectos principales de carga de ruptura

En la siguiente grafica se puede observar la mediana de los datos y los cuartiles 1 y 3, entre los cuales se centra el 50% de los datos, también vemos líneas que unen 2 cajas, estas unen las medias de los factores, como parece ser que aquí tenemos una diferencia significativa entre las distancia por lo cual se realizó un ANOVA unidireccional para comprobar la veracidad de esto. Los resultados de la mediana de los datos se pueden ver en la siguiente figura:

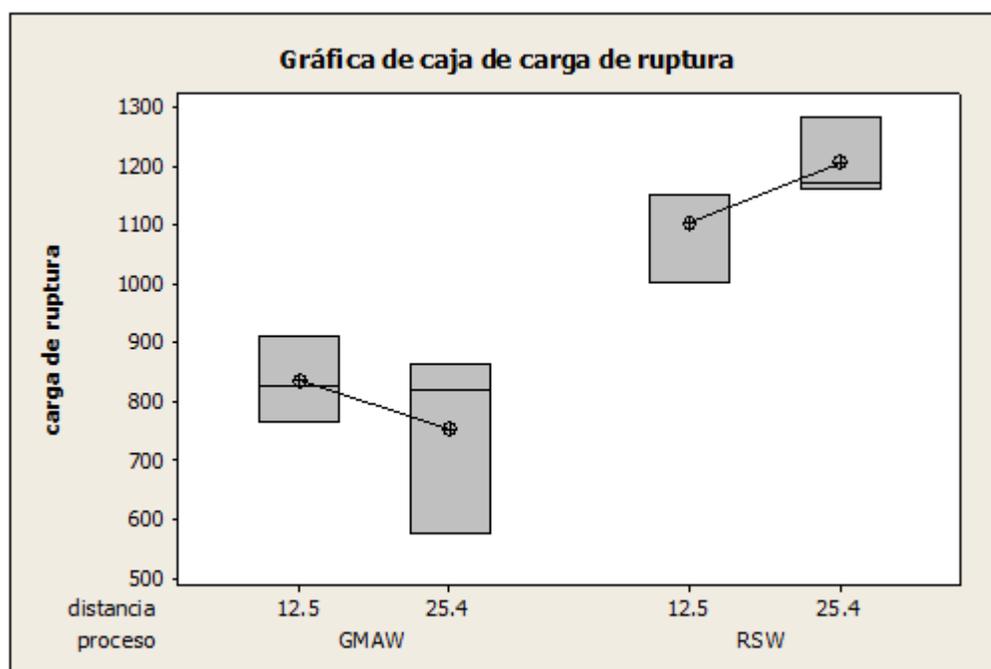


Figura 4.23: Gráfica de cajas

El ANOVA unidireccional realizado muestra que la distancia no tiene un efecto significativo en las muestras, esto se deduce debido a que tenemos un p-value mayor de 0.05.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
C12	1	16017	16017	2.68	0.177
Error	4	23867	5967		
Total	5	39883			

Figura 4.24: Resultado ANOVA unidireccional de la distancia

El siguiente análisis de la varianza nos comprueba el resultado del p-value ya que como se puede observar en la siguiente imagen, las varianzas están traslapadas lo cual indica que el valor absoluto de la diferencia entre las varianzas será cero lo cual significa que no hay una diferencia significativa en el uso de cualquier distancia.

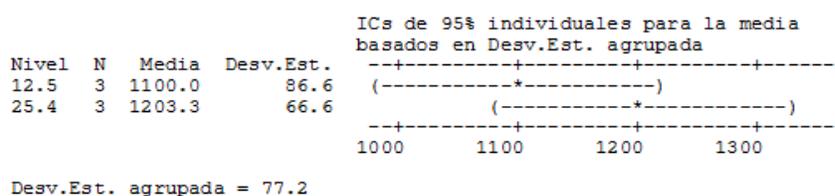


Figura 4.25: Intervalo de confianza de las varianzas del ANOVA unidireccional

4.3.3 Análisis metalográfico

Para evaluar el efecto de ambas soldaduras en la microestructura, se realizaron las metalografías correspondientes a cada una de ellas. 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 Zona de fusión (ZF) se presentan en la Tabla 4.2 para la prueba de soldadura por arco y en la 4.3 para la soldadura por resistencia

Se puede observar en el metal base que se tiene una base ferrítica con algunas trazas de perlita. Se pueden ver que los granos son alargados debido al proceso de laminación en frío al cual es sometida la lámina.

En la zona de fusión se tiene una recristalización de grano ferrítico, en donde podemos ver un grano más fino más alejado de la zona afectada por el calor y conforme se acerca a la ZAC el grano va creciendo de tamaño debido al crecimiento hasta la zona epitaxial.

Se tiene presencia ferrita Widmanstatteny también se cuenta con ferrita idiomórfica y acicular, esto debido a que su crecimiento no parte de límite del grano.



Tabla 4.2: Metalografía Soldadura por Arco

En la metalografía de la soldadura por resistencia se puede observar un grano más fino en la zona afectada por el calor y en la zona de fusión se observa una ferrita aliotromórfica o intergranular que es ferrita con mayor dureza



Tabla 4.3: Metalografía Soldadura por Resistencia

4.3.4 Análisis de dureza

La siguiente imagen se puede ver las dos muestras de soldadura, por resistencia y por arco respectivamente, montadas en baquelita para realizar tanto las metalografías como las pruebas de dureza.

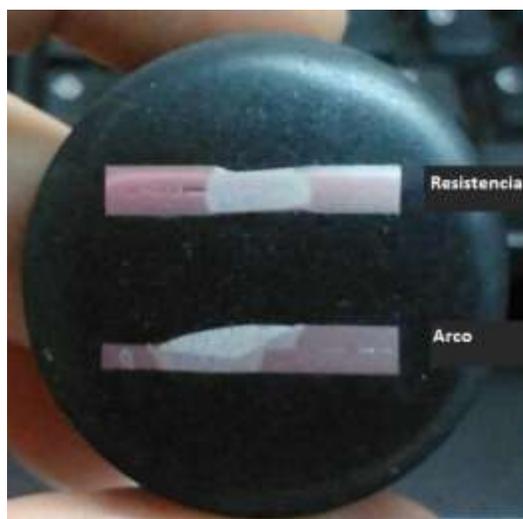


Figura 4.26 Cupones montados en baquelita.

Las indentaciones de la soldadura por resistencia se realizaron de la siguiente manera, se hicieron tres indentaciones en tres perfiles marcados sobre la muestra en cada una de las zonas de la soldadura, en la siguiente imagen se muestra la localización de las indentaciones.

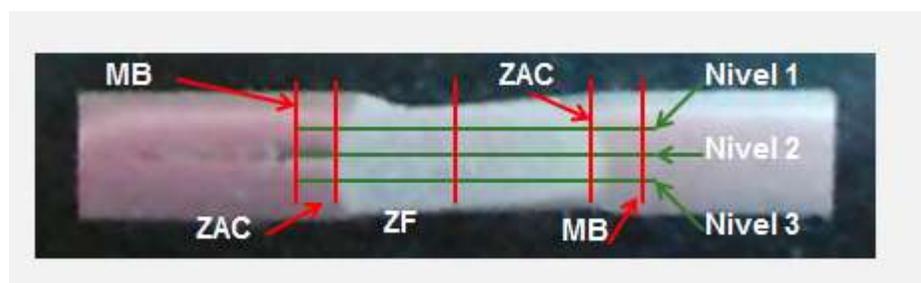


Figura 4.27 Localización de indentaciones soldadura por resistencia.

Los resultados de las microdurezas se muestran en la siguiente tabla:

Nivel	Identación	MB	ZAC	ZF	ZAC	MB
1	1	124	174	260	295	119
	2	122	208	269	227	122
	3	136		272		116
2	1	116	197	277	186	131
	2	119	214	305	232	121
	3	128		285		117
3	1	114	190	292	254	133
	2	116	213	317	257	121
	3	129		278		112

Tabla 4.4 Resultados de microdureza soldadura por resistencia

Como se puede observar la zona de fusión tiene un incremento en la dureza, esto es debido a que en esta zona se tiene presencia de ferrita aliotromorfica o intergranular la cual tiene una dureza más alta, haciendo que la pieza sea también más resistente, lo cual se ve reflejado en los resultados obtenidos en la prueba de tensión.

En la siguiente grafica se ven los resultados de las durezas obtenidas:

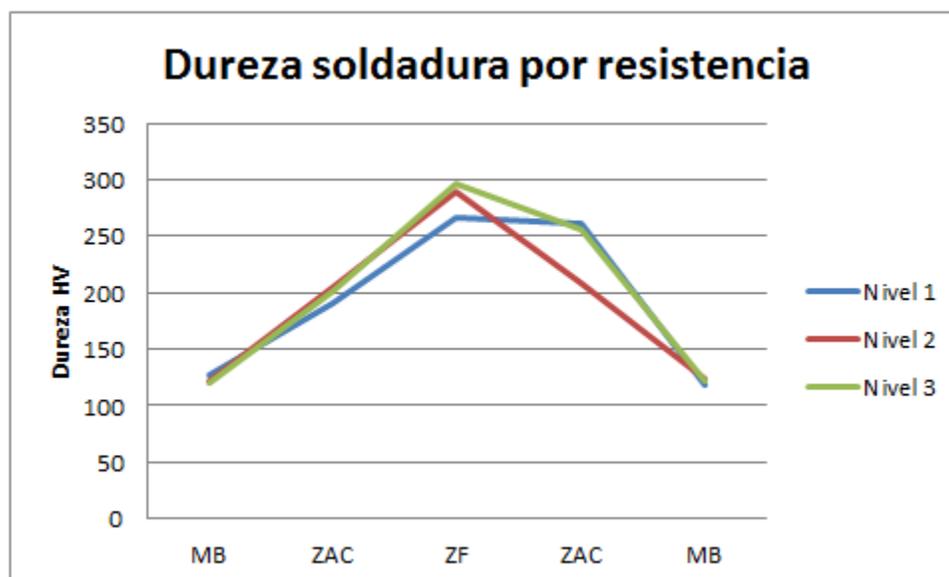


Figura 4.28 Gráfica de durezas obtenidas en soldadura por resistencia

En la soldadura por arco se hicieron las siguientes indentaciones:

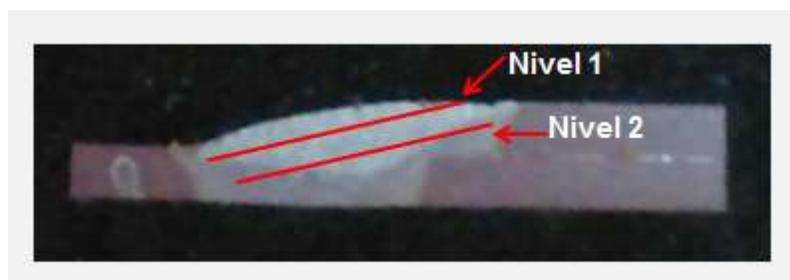


Figura 4.29 Localización de indentaciones soldadura por arco.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

	Indentación	MB	ZAC	ZF	ZAC	MB
Perfil 1	1	117	153	279	176	126
	2	126	160	332	162	122
	3	138		320		121
Perfil 2	1	118	150	293	179	133
	2	124	167	262	164	126

Tabla 4.5 Resultados de microdureza soldadura por arco

Como se puede observar la dureza en la zona de fusión es mayor debido a que también se tiene presencia de ferrita idiomórfica la cual endurece el grano.

En la siguiente grafica se puede observar como la dureza de la muestra incrementa de manera importante en la zona de fusión:

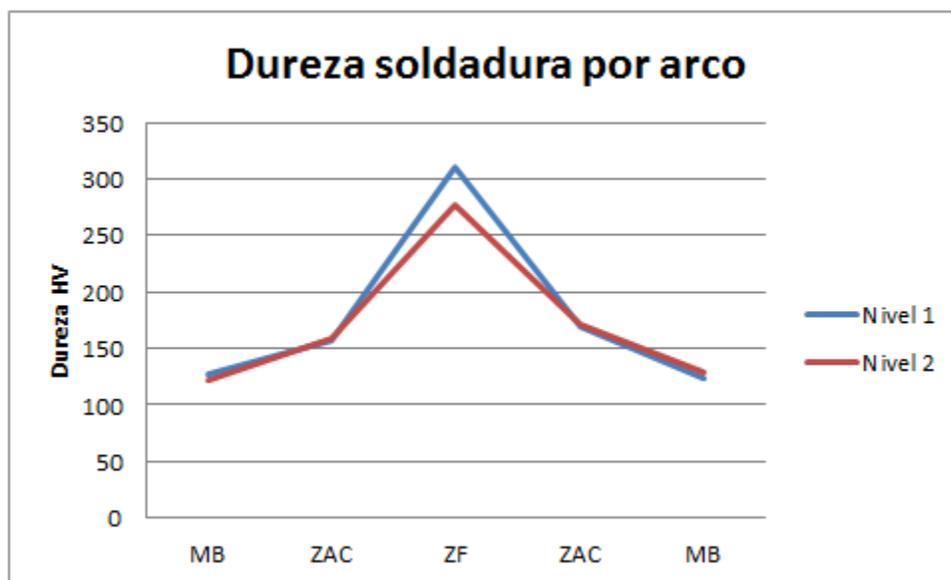


Figura 4.30 Gráfica de durezas obtenidas en soldadura por arco

CONCLUSIONES

El objetivo de esta monografía era el evaluar la soldadura por resistencia para conocer si esta podía ser una alternativa viable para cambio de proceso el cual actualmente es soldadura por arco. Para poder realizar esta evaluación, se realizó una investigación de ambos procesos, comparando sus ventajas y desventajas así como las características propias del proceso.

Después de evaluar ambos procesos se concluye que de acuerdo a las características que presenta la soldadura por resistencia en comparación con la soldadura por arco, no existe una restricción en el cambio, tomando en cuenta la geometría de las piezas que cumplan con las especificaciones del proceso de soldadura por arco. El proceso de soldadura por resistencia cumple con los requisitos de calidad y resistencia que requiere la pieza evaluada

Con los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas de tensión, metalografías y durezas, se puede concluir que para esa junta en específico del al menos 12 mm de traslape, la soldadura por resistencia muestra mayor resistencia a la tensión en esfuerzo cortante en comparación con la soldadura por arco. Los resultados de la metalografía concluyen que con una menor cantidad de calor de entrada en la soldadura por resistencia, la zona afectada por el calor es menor, lo que también se refleja en una red cristalina de granos

más pequeños y con mayor resistencia y dureza la cual se puede validar con los resultados de dureza obtenidos. Con los resultados de las pruebas mecánicas se cumple el objetivo de validar las capacidades y características de la soldadura por resistencia que al menos sean iguales o mejores que la soldadura por arco, las cuales en tensión fueron mejores que las de arco.

Por último, se identificó el cofre como una pieza viable ante el cambio de proceso de soldadura por arco a soldadura por resistencia.

Con lo realizado en este documento de investigación, se cumple con los objetivos especificados en ella.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/AWS/SAE D8.9-97. (1997). *Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials.*
- Callister, W. (2009). *Ciencia e Ingenieria de los Materiales* . Limusa Wiley.
- delVecchio, E. (1956). *Resistance Welding Manual*. En E. delVecchio. Philadelphia, Pa: Resistance Welder Manufacturer's.
- Easterling, K. (1983). *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. Seven Oaks Kent, UK,: Butterworths and Company Limited.
- Jefferson, T. (2007). *Metals and how to weld them*. Michigan : Lincoln Arc Welding Foundation .
- Jesus, M. (2009). *Curso de soldadura*. En J. Menchaca, *Curso de soldadura*.
- Karagoulis, M. J. (1991). *Control of materials processing variables in production resistance spot welding*. Michigan .
- Lincoln Arc Welding Foundation. (2000). *The procedure Handbook of Arc Welding*.
- Lopez, V. (2008). *Soldabilidad de aceros avanzados de alta resistencia AHSS tipo martensiticos mediante soldadura de puntos por resistencia RSW en componentes automotrices*. Saltillo, Mexic.

- Nelly, J. (1992). *Materiales y procesos de manufactura*. Mexico: Grupo impresa.
- Peña, F. A. (2009). *Soldadura por puntos de resistencia*.
- R.L., T. (2001). *Tecnología de la fabricación. Soldadura, fundición y Metal Mecánica*. New York: Longman Inc.
- Society, A. W. (1996). Welding Handbook. En A. W. Society, *Welding Handbook* (pág. 110).
- Society, A. W. (2003). Fundamentals of Resistance welding. En A. W. Society, *Processes*.
- Society, American Welding. (2003). Fundamentals of Resistance welding. En A. W. Society, *Processes*.
- Thomas, D. (1993). Material Requirements for Service Conditions. En *ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering* (págs. 373 - 375).
- Vural, M. (2014). *Welding Processes and Technologies, In Comprehensive Materials Processing*. Recuperado el 2014, de <http://www.sciencedirect.com>:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080965321006038>
- Wahab, M. (2014). - *Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding, In Comprehensive Materials Processing*. Recuperado el 2014, de [sciencedirect](http://www.sciencedirect.com).
- Wei, P. (2014). Workpiece property effects on nugget microstructure determined by heat transfer and solidification rate during resistance spot welding. *International Journal of Thermal Sciences*, 9.

ÍNDICE DE TABLAS

No.	TITULO	Pág.
2.1	Clasificación de aceros	31
2.2	Composición química aceros ASTM A1011	32
3.1	Requerimientos de prueba de tensión.	38
4.1	Resultados prueba de tensión a esfuerzo cortante	47
4.2	Resultado ANOVA de dos factores. Distancia y proceso	50
4.2	Metalografía Soldadura por Arco	56
4.3	Metalografía Soldadura por Resistencia	57
4.4	Resultados de microdureza soldadura por resistencia	59
4.5	Resultados de microdureza soldadura por arco	60

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	TITULO	Pág.
1.1	Divisiones por producto John Deere	3
1.2	Ejemplos de Tractores que se producen en John Deere en la planta de Tractores Saltillo.	4
2.1	Esquema general del proceso de soldadura por arco.	11
2.2	Esquema del equipo para soldadura GMAW	12
2.3	Esquema transferencia arco spray	13
2.4	Esquema transferencia globular	13
2.5	Esquema transferencia por corto circuito	13

2.6	Esquema transferencia por arco pulsado	14
2.7	Penetración incompleta	16
2.8	Esquema general del proceso de soldadura por resistencia	18
2.9	Defectos de soldadura comunes en soldadura por resistencia.	22
2.10	Esquema general de soldadura por puntos.	23
2.11	Esquema general de soldadura por costura	24
2.12	Proceso de soldadura por proyección.	24
2.13	Tipos juntas de soldadura.	25
2.14	Típicas soldaduras por resistencia	26
2.15	Profundidad de garganta de una máquina de soldadura por resistencia	27
2.16	Punto de soldadura por resistencia muestra SM12 mm	29
3.1	Prueba de palanca no destructiva (cincel)	37
3.2	Procedimiento de la prueba de desprendimiento	37

4.1	Modelo del cofre de los tractores Merit.	39
4.2	Tractor Merit.	40
4.3	Prueba de desprendimiento	41
4.4	Probeta A1, A2, A3.	41
4.5	Probeta A4, A5, A6	42
4.6	Probeta S1, S2, S3	42
4.7	Probeta S4, S5, S6	42
4.8	Probeta AM	42
4.9	Probeta SM	43
4.10	Máquina de soldar Lincoln Electric	43
4.11	Máquina de soldadura por proyección ARO	43
4.12	Prueba de despegado realizada	44
4.13	Prueba metalográfica. Estetoscopio, Metal base, ZF, ZAC 200X	45
4.14	Prueba de despegado realizada	46

4.15	Gráfica Carga Máxima soldadura por Arco	47
4.16	Gráfica Carga Máxima soldadura por Resistencia	48
4.17	Gráfica comparativa Carga Máxima	48
4.18	Probetas de soldadura por arco después de prueba de tensión a esfuerzo cortante	49
4.19	Probetas de soldadura por resistencia después de prueba de tensión a esfuerzo cortante	20
4.20	Gráfica de residuos del ANOVA	51
4.21	Gráfica de normalidad de los residuos	51
4.22	Gráfica de efectos principales de carga de ruptura	53
4.23	Gráfica de cajas	54
4.24	Resultado ANOVA unidireccional de la distancia	54
4.25	Intervalo de confianza de las varianzas del ANOVA unidireccional	55
4.26	Cupones montados en baquelita	58

4.27	Localización de indentaciones soldadura por resistencia	58
4.28	Gráfica de durezas obtenidas en soldadura por resistencia	59
4.29	Localización de indentaciones soldadura por arco.	60
4.30	Gráfica de durezas obtenidas en soldadura por arco	61

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre: Alejandra González Cantú.

Lugar y fecha de nacimiento: Saltillo, Coahuila. Marzo 9 de 1987.

Madre: Maria Teresa Cantú López

Nivel de especialidad de estudios terminados: Ingeniería en Mecatrónica.

Institución: Tecnológico de Monterrey, Campus Saltillo.

Año de terminación: 2009.

Promedio de calificaciones: 89.3

Preparatoria: Instituto de Valle Arizpe

Año de terminación: 2004.

Promedio de calificaciones: 98

Grado al que aspira: Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial

Centro de trabajo: Industrias John Deere, Planta Tractores Saltillo.

Puesto que ocupa: Ingeniero de Manufactura Sr.

Experiencia profesional: 1.5 años en la industria automotriz y 5 años en John Deere

Título: Análisis comparativo de soldadura por arco y soldadura por resistencia para la sustitución del proceso de soldadura en placas delgadas de acero A13C para estructuras exteriores de componentes agrícolas.

Campo o rama profesional: Industria metal mecánica, fabricación de tractores.

Institución proponente: Industrias John Deere, Planta Tractores Saltillo.

Tutor de Académico: Dr. Víctor Hugo López Cortez.

Tutor en Planta: Ing. Antonio Ferniza.

Fuente de financiamiento: John Deere, planta Tractores Saltillo.