



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO MECÁNICA**

**METALURGIA DE LA SOLDADURA EN PLANCHAS DE ACEROS
EMPLEADAS EN LA CARROCERÍA DEL AUTOMÓVIL**

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Libán Pérez Cuba

Tutor: Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.

Moa – 2017



Declaración de autoridad:

Yo: Libán Pérez Cuba

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Libán Pérez Cuba

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



Agradecimientos

A Dios por darme las fuerzas necesarias para lograr que todo este trabajo cumpliera su fin.

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Dr. C. Tomás Fernández Columbié

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la Revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos Muchas gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

***A mi madre y padre: Mery Cuba Borges y Generoso
Liván Pérez Góngora por su amor eterno.***

A mis abuelos: Elva Borges y Pablo Cuba.

A mi novia: Dayana Otero Calzadilla

***A mis compañeros de estudios que estuvieron a mi
lado durante los 6 años de mi carrera.***

***A nuestra Revolución, por las posibilidades que me
ofrece.***



Resumen

El trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento metalúrgico de planchas de aceros empleadas en la carrocería del automóvil como son el acero AISI 1006 y del acero galvanizado, el primero unido por soldadura por resistencia y el segundo por oxiacetilénica. La unión del acero AISI 1006 se realizó solapada o traslape y la del acero galvanizado a tope. Se establecieron los parámetros para el ciclo térmico de los dos procesos, el primero se fundamenta en el calor y la presión y el segundo en la aplicación de calor solamente. Las zonas metalúrgicas obtenidas en el acero AISI 1006 favorecen la formación de estructuras favorables, mientras que en el acero galvanizado, aunque se obtienen estructuras con granos de menor tamaño no se recomienda su uso en la carrocería del automóvil ya que existe un incremento de la dureza en la zona fundida de 245 HV con una dureza de 225 HV en la zona fundida del acero AISI 1006. Se realiza la valoración económica y el impacto medio ambiental relacionado con el sector automovilístico y del proceso de soldadura.



Abstract

In the work has as objective to establish the behaviour metallurgist of irons of steels used in the chassis of the automobile like they are the steel AISI 1006 and of the galvanized steel, the first one united by welding by resistance and the second for oxiacetylene. The union of the steel AISI 1006 were carried out overlapped or shovel and that of the steel galvanized to end. The parameters settled down for the thermal cycle of the two processes, the first one is only based in the heat and the pressure and the second in the application of heat. The areas metallurgical obtained in the steel AISI 1006 favour the formation of favourable structures, while in the galvanized steel, although structures of smaller size are obtained their use it is not recommended since in the chassis of the automobile an increment of the hardness it exists in the fused area of 245 HV with a hardness of 225 HV in the fused area of the steel AISI 1006. He is carried out the economic valuation and the half environmental impact related with the automobile sector and of the welding process.



TABLA DE CONTENIDOS

	Pág
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	
1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	4
1.2. Partes y elementos de la carrocería	4
1.2.1. Función de la carrocería en el automóvil	6
1.3. Materiales estructurales de los vehículos	7
1.4. Generalidades del proceso de soldadura oxiacetilénica	10
1.4.1. Características del proceso	12
1.5. Transformaciones estructurales en la soldadura de los aceros	14
1.6. Soldadura por resistencia	14
1.6.1. Gradiente de temperatura en la soldadura por resistencia	16
1.6.2. Solidificación del material en la soldadura por resistencia	18
1.7. Acero galvanizado	20
1.7.1. Soldabilidad del acero galvanizado	22
1.8. Conclusiones del capítulo 1	23
2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	24
2.2. Composición química de las aleaciones	24
2.3. Microestructura de las aleaciones	25
2.4. Plan experimental	26
2.4.1. Parámetros de soldadura	26
2.5. Materiales y equipos empleados en la experimentación	27
2.5.1. Pulidora metalográfica Montasupal	28
2.5.2. Microscopio óptico	28
2.6. Preparación metalográfica de la probeta	28
2.6.1. Corte de las muestras	29
2.6.2. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050	30
2.6.3. Desbaste y pulido	30
2.6.4. Lijado grueso y fino	31



2.6.5. Ataque de las muestras para su examen microscópico	31
2.6.6. Determinación de la dureza	31
2.7. Ciclo de soldadura en la soldadura por resistencia	32
2.8. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura	34
2.8.1. Generación de calor en la soldadura oxiacetilénica	34
2.8.2. Fuente de energía en la soldadura por resistencia	36
2.8.3. Determinación del porcentaje de penetración	37
2.8.4. Prueba para determinar el porcentaje de penetración	38
2.9. Conclusiones del capítulo 2	39
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1. Introducción	40
3.2. Análisis de la composición química	40
3.3. Análisis del ciclo térmico para la soldadura oxiacetilénica	41
3.3.1. Análisis del ciclo térmico para la soldadura por resistencia	42
3.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura por resistencia	43
3.4.1. Análisis microestructural de la zona fundida	44
3.4.2. Análisis de la microestructura en la zona afectada térmicamente	45
3.4.3. Análisis de la microestructura en la interfase	46
3.4.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura oxiacetilénica	48
3.4.5. Análisis microestructural de la zona afectada térmicamente	48
3.4.6. Análisis microestructural de la zona de interfase	50
3.5. Análisis de la microdureza	51
3.6. Análisis del porcentaje de penetración	52
3.7. Análisis económico	53
3.8. Impacto ambiental	53
3.9. Conclusiones del capítulo 3	55
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍAS	



INTRODUCCIÓN

La soldadura de mantenimiento y reparación, a pesar de ser una de las aplicaciones que mayor cantidad de soldadores emplea, cuenta en sentido general con una reputación mal ganada, debido a que el soldador es a veces quien tiene la responsabilidad de intentar reparar el equipo o pieza y no cuenta con la información adecuada para poder realizar dicho trabajo (Griňak, 1984). Este es uno de los métodos más comúnmente empleados en la recuperación de piezas, se debe las posibilidades que brinda para la aplicación de capas de material en zonas desgastadas y la capacidad de reparación de piezas partidas.

La responsabilidad de la función de la soldadura de mantenimiento y reparación es devolver al servicio con suficiente eficiencia y bajo costo, cualquier pieza partida o desgastada en sustitución de una nueva. En este tipo de soldadura, lo desconocido y las restricciones son los aspectos más frecuentes a encontrarse. El metal base puede no tenerse definido, la presencia de contaminantes pueden afectar los resultados, los esfuerzos residuales propios de la soldadura también tienen influencia en el resultado final. Otro de los aspectos difíciles de contrarrestar en ocasiones es el de la accesibilidad, ya que hay que trabajar con una pieza que ya está conformada y no es el caso de una producción nueva que puede contemplar un ensamblaje por partes.

Hasta hoy, al menos el 56 % de la masa de un vehículo automóvil está fabricado con acero y esto se da en el 99 % de los vehículos fabricados en el mundo, pero dependiendo de su composición y posteriores tratamientos, podemos encontrar al menos nueve tipos de aceros; aplicados según sus propiedades. Si bien en las últimas décadas se ha dado una disminución de la fracción en peso del acero en el conjunto del vehículo, parece que se han agotado las posibilidades en cuanto a la rentabilidad de utilizar otros materiales estructurales, tales como el aluminio y el magnesio (AUTOMOTIVE, 2009; Cooman *et al.*, 2011).

Aunque se dio un retroceso en el uso del acero, la rápida evolución actual ha llevado a que vaya recuperando importancia en el cómputo total en peso de un vehículo. Por otra parte, durante los últimos años se está insistiendo fuertemente por medidas más respetuosas con el medio ambiente. Las políticas nacionales e internacionales están realizando esfuerzos económicos tanto a nivel de investigación como apoyo a empresas para que se consigan avances tecnológicos más respetuosos con el entorno.



Situación problemática

Cuba es un país que posee escasos recursos materiales, el parque automovilístico con que cuenta data desde la década del 50, las piezas de repuestos no se suministran a través de ningún mercado por la obsolescencia de estos vehículos, esta situación obliga a sus propietarios a buscar alternativas viables que permitan mantener este tipo de transporte en condiciones de confort. La unión de sus componentes, dígame chasis o carrocería se realiza por proceso de soldadura por resistencia, sin embargo cuando el efecto de la corrosión actúa sobre partes o elementos de la misma se acude al método más común, la soldadura oxiacetilénica, sin embargo transcurrido un tiempo aparecen nuevamente los síntomas de deterioro. Todo lo anterior repercute que en la mayoría de los casos, estos rechazos afecten el medio ambiente y la economía del país.

El **problema** lo constituye: aún son insuficientes los estudios realizados acerca del comportamiento microestructural en planchas de aceros y galvanizadas empleadas en carrocerías y chasis de automóvil soldadas por soldadura por resistencia y oxiacetilénica.

Como posible solución al problema se formula la siguiente **hipótesis**:

En el proceso de soldadura de puntos por resistencia donde se considere una intensidad de 12 000 A, electrodos de bronce de 6,5 milímetros de diámetro y en un acero galvanizado donde se proporcione $0,5 \text{ mm}^3$ de acetileno con una eficiencia de 0,25 % y una concentración del 75 % del calor de la llama, se puede con el primero unir un acero AISI 1006 de 1,02 mm de espesor y con el segundo un acero galvanizado, determinar su comportamiento microestructural y definir el proceso más idóneo para ser empleado en el sector automovilístico.

El presente trabajo se establece como **objetivo general**

Establecer las variaciones metalúrgicas en la soldadura de planchas de aceros AISI 1006 y de acero galvanizado empleados en carrocería de automóvil al ser soldadas por proceso de soldadura por resistencia y oxiacetilénica.

Como **objeto de estudio** es unión de soldadura a tope y a solape de planchas de aceros y galvanizadas empleadas en carrocería de automóvil.



El **campo de acción** es la microestructura y la dureza en correspondencia con la generación de calor en la zona fundida y la zona de influencia térmica de los materiales objeto de estudio sometidos a soldadura por ambos procesos.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el procedimiento de unión por soldadura por resistencia y oxiacetilénica en la unión de planchas de aceros y galvanizadas empleadas en la carrocería de automóvil.
2. Establecer a partir de los procedimientos metodológicos, el proceso de soldadura de planchas de aceros soldada por resistencia y del acero galvanizado soldado por oxiacetileno, empleados en la carrocería de automóvil.
3. Explicar a partir de las microestructuras y la dureza obtenidas, las variaciones metalúrgicas que se originan en la zona fundida y la zona de influencia térmica del acero AISI 1006 y del acero galvanizado soldado por ambos procesos.

Para dar cumplimiento a este objetivo han sido trazadas las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Establecimiento del procedimiento metodológico de la unión de las planchas de aceros AISI 1006 y del acero galvanizado, mediante los procesos de soldadura por resistencia y oxiacetilénica, empleados en los carrocería y chasis de automóvil.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del proceso metalúrgico de la unión mediante soldadura por resistencia y oxiacetilénica de planchas de acero.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura.

Capítulo 1
Marco teórico. Antecedentes investigativos

1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Introducción

La rápida evolución de los materiales y procedimientos de fabricación, impulsada por una competencia globalizada y nuevas regulaciones de seguridad y medio ambiente ha tenido un fuerte impacto en la fabricación de estructuras de automóviles. Lo anterior ha llevado a buscar nuevas opciones en materiales, por una parte el uso de materiales reciclados, en lugar de materiales primarios, significa una gran reducción del uso de energía y costos. Materiales con bajas o disminuidas propiedades mecánicas significan un aumento en peso.

En el presente capítulo se establece como objetivo la búsqueda bibliográfica relacionada con la unión de planchas de aceros empleadas en carrocerías y chasis de automóvil mediante soldadura por resistencia y oxiacetilénica.

1.2. Partes y elementos de la carrocería

La historia del automóvil se inició en 1769 gracias al francés Nicolás-Joseph Cugnot (1725 - 1804), mecánico, ingeniero militar, escritor e inventor, que instaló y adaptó un motor de vapor y dos cilindros en posición vertical a un carromato (Font, 2004).

Desde entonces y hasta nuestros días, la evolución que han sufrido los automóviles ha sido constante. Esta evolución se ha puesto de manifiesto claramente en el desarrollo de la mecánica y en consecuencia, de las prestaciones obtenidas a partir de esta. No menos importante ha sido la transformación llevada a cabo en las carrocerías, que han sufrido grandes e importantes cambios para dar respuesta a las necesidades del momento, como son mayor rapidez, seguridad y confortabilidad y menor sonoridad (Font, 2004).

Inicialmente las carrocerías eran sobre todo de madera y su construcción y manipulación estaba encomendada a los carpinteros. Con el transcurso del tiempo la madera fue relegada a un segundo plano por el acero, siendo este el material principalmente utilizado en la fabricación de carrocerías. Consecuentemente, fueron los chapistas los encargados de fabricar y reparar las carrocerías.

Fue en 1895 cuando aparecieron las primeras carrocerías que contenían algunas características de los vehículos movidos por tracción animal. En principio todas las carrocerías de los automóviles eran abiertas, ya que, al no tener motores muy potentes, no se podían sobrecargar con el peso de una carrocería adicional (Font, 2004). En 1900

fue comercializada la primera carrocería cerrada. La principal novedad de este vehículo era que protegía al conductor y al copiloto de los agentes atmosféricos. Entre 1900 y 1914 apareció el aluminio como nuevo elemento constituyente de las carrocerías, sustituyendo a la madera en aquellos componentes en donde esta era difícil de trabajar como, por ejemplo, las zonas de gran curvatura.

En 1927 se lanzó la primera carrocería construida completamente con estructura de acero y a partir de los años 30 las grandes compañías de automóviles utilizaron la chapa de acero para la construcción de los vehículos, emprendiendo su producción de forma masiva en las cadenas de montaje.

La carrocería (figura 1.2) es una invención anterior al automóvil, primero se creó la carrocería y posteriormente se inventó el motor. En el siglo XVIII los italianos comienzan a trabajar con gran arte en las carrozas. El concepto de carro para el transporte de personas comienza a partir de este momento a despegarse de la idea del carro cubierto dotado de simples asientos, para entrar dentro de un período de decidida búsqueda de la comodidad de los pasajeros, el trabajo es complementado con la ayuda de los carroceros franceses (Christensen, 2011).



Figura 1.2. Diferentes carrocerías en el automóvil.

A través de los años y con la creación de motores cada vez más potentes y rápidos de giro, las carrocerías han evolucionado con grandes cambios. Al principio las carrocerías

eran de madera, su construcción y manipulación estaba encomendada a los carpinteros especializados, a partir de finales de los años 20 del siglo anterior se comienza a emplear lámina de acero, ahora son los enderezadores los encargados de los trabajos de reparación y ajuste de las carrocerías (Christensen, 2012).

Según Dubois (2004), la carrocería está constituida por todas las partes reforzadas de lámina de acero. Existen tres volúmenes fundamentales compuestos, por la parte delantera, por el cofre donde se ubica el motor con los órganos de transmisión y la suspensión delantera. En el centro está el habitáculo para pasajeros. Por último, hay un tercer volumen posterior destinado para el equipaje.

1.2.1. Función de la carrocería en el automóvil

La función de la carrocería (Belsare, 2012) es la de albergar la carga y a los ocupantes del vehículo, así como transportarlos, como seguridad, proteger a los ocupantes del vehículo. La carrocería debe ser elástica, para absorber la inercia del vehículo y rígida para proteger a los ocupantes de la misma. La importancia de la rigidez y la elasticidad es la siguiente:

- ✚ Si una carrocería fuera muy rígida al tener un choque a bajas velocidades debido a que la inercia liberada no es la suficiente para que la carrocería la comience a absorber y actuar como si fuera un muelle al comprimirse, la deceleración sería absorbida casi toda por los ocupantes de manera a un golpe seco.
- ✚ Si la carrocería fuera muy elástica, a altas velocidades el problema es de saturación, como la carrocería es blanda, tiende a absorber poca inercia.

Plantean Lin y Nian (2006) que para intentar que la rigidez y la elasticidad de la carrocería sean aún más compatibles, se estudian métodos para tal efecto. Unos de los métodos es utilizar las carrocerías deformables y las barras laterales. Tanto la carrocería deformable como las barras laterales consisten en debilitar unos puntos con el fin de que, al producirse un choque, la carrocería o las barras laterales se deformen sobre sí mismas por dichos puntos. De esta forma, la una carrocería es rígida y elástica, a la vez, por los puntos debilitados.

Actualmente, casi todos los automóviles se construyen con la técnica monocasco, realizándose las uniones entre las distintas piezas mediante soldadura de puntos. En los

vehículos modernos, hasta los cristales forman parte de la estructura del vehículo, colaborando en darle resistencia y rigidez (Crolla, 2009).

1.3. Materiales estructurales de los vehículos

Los factores que se toman en cuenta durante el diseño, la fabricación y el uso futuro de la estructura que permite construir un automóvil, son los que marcan la pauta en la decisión sobre el tipo de acero que se va a utilizar y debido a las tendencias del uso del acero en la industria automotriz, no cabe duda que los aceros de alta resistencia y los avanzados han ganado su lugar dentro de la misma, por sus propiedades mecánicas, las cuales se ven reflejadas en el desempeño de los automóviles.

Una de estas propiedades es la absorción de energía, por ejemplo, en algún accidente automovilístico, los aceros de alta resistencia absorberán un impacto y se deformarán más que un acero convencional, lo que dará como resultado que la energía sobrante del impacto sea menor y por consecuencia los daños que pudieran sufrir el o los pasajeros de un vehículo serían menores y menos fatales.

La estructura del automóvil se conoce con el acrónimo de BIW (Body in White), que es equivalente al chasis en español (figura 1.1). Está fabricado con múltiples piezas, conformadas principalmente por aceros avanzados de alta resistencia (Huang y Xie 2010).



Figura 1.1. Estructura del automóvil.

Uno de los tipos de estructuras modernas más utilizadas es la integral o unitaria, soldada por puntos. Este tipo de estructuras es muy adecuado para los métodos de producción en masa. El cuerpo se soporta por sí sólo y con esto se omite el chasis por separado, obteniendo una estructura más ligera. La primera producción en masa de automóviles

con este tipo de estructura se presentó en los años de 1930. Un ejemplo notable fue el Citroën 11 CV, que estuvo en producción de 1934 a 1956.

En las últimas décadas, el análisis del ciclo de vida de los automóviles ha sido una herramienta básica en la toma de decisiones. Una iniciativa alrededor de esta idea ha sido desarrollada por “World Auto Steel” (agrupación de 20 de los mayores fabricantes), que ha creado institutos sectoriales y desarrollado programas para la innovación. Uno de estos organismos, concretamente el “Steel Market Development Institute” (SMDI) ha desarrollado el proyecto denominado: Future Steel Vehicle (FSV) (Kim *et al.*, 2008).

Plantea Davies (2012) que para conseguir la reducción de espesores de los diferentes componentes metálicos encontrados en un automóvil, tales como montantes, taloneras, refuerzos laterales (y con un aumento de la resistencia al impacto), se están empezando a utilizar los llamados aceros avanzados de alta resistencia (Advanced High Strength Steel AHSS). Los aceros para partes de chasis con elevada responsabilidad, se definen como de alta resistencia HSS (High-Strength-Steels) con límites elásticos comprendidos entre 210 y 550 MPa y con una tensión de rotura de entre 270 y 700 MPa.

Actualmente los fabricantes de vehículos emplean en sus montajes las carrocerías del tipo monocasco o autoportante, fabricadas con acero estampado en forma de chapa, sin embargo el desarrollo tecnológico ha logrado ya reemplazar tal material por el aluminio, que es mucho más ligero, más fácil de conformar y tiene excelente resistencia y el plástico reforzado con fibra de vidrio (Cárcel *et al.*, 2004).

Criterios de Kalpakjian y Schmid (2008), plantean que los aceros ferríticos de última generación para chapa de automóvil están diseñados para optimizar las propiedades de embutición, reduciendo a la vez el espesor de chapa. Para ello, se les aplica una ruta de procesamiento larga y compleja que comprende la laminación en caliente, bobinado, laminado en frío y recocido a una temperatura relativamente baja (alrededor de 600 °C). Durante esta última etapa tiene lugar una regeneración de la microestructura (recristalización) acompañada de una evolución de la textura, que provoca que el acero recupere parte de la ductilidad perdida durante la laminación en frío.

Campestrini y Mock (2011) manifiestan que la correcta selección del valor de los parámetros en cada etapa del procesamiento permite controlar esta textura, con el fin de optimizar la anisotropía en las chapas y obtener una textura final apropiada para la



embutición. En este sentido, la temperatura de bobinado y la etapa de laminación en frío son de vital importancia para la evolución de la textura y la microestructura en etapas posteriores.

Varios estudios en los que se encuentran los de Okamoto (1981) y Engl (1984) indican que los elementos intersticiales carbono y nitrógeno constituyen el factor principal que afecta a las propiedades de anisotropía del material, ya que ambos elementos tienen un efecto perjudicial sobre el desarrollo de una textura apropiada para la embutición cuando se encuentran en solución sólida (Kubotera *et al.*, 1977 y Valencia, 2008).

La materia prima básica en el enderezado de láminas según Boher *et al.* (2012), para construcción de carrocerías es el acero con 0,5 y 1,5 mm de espesor aproximadamente, es un material metálico elaborado a partir del hierro y otros elementos que se mezclan según diferentes proporciones (Fe, C - 1,5 %, Mn - 0,5 %, Si - 0,2 %, P y S < 0,1 %). El acero utilizado para la fabricación de láminas de carrocerías es el bajo carbono, por presentar un menor contenido de este elemento que los normales, permite ser soldado con facilidad, tienen bastante resistencia y pueden doblarse sin agrietarse ni romperse.

Según Cooman *et al.* (2011) y Davies (2012), el mayor inconveniente del acero bajo carbono es su tendencia a la oxidación, para evitar esto se debe preparar las láminas con una serie de recubrimientos. Aunque en los últimos años la industria del automóvil ha tenido una muy fuerte evolución hacia aceros de alta resistencia con el objeto de reducir el peso de los vehículos y con ello mejorar sus prestaciones y reducir los consumos. Se ha pasado de aceros en general “blandos” a algunos aceros de media-alta resistencia tipo HSS (High-Strength-Steels) y más recientemente a aceros de muy alta resistencia denominados AHSS (Advanced-High-Strength-Steels).

La introducción de nuevos y diferentes materiales en la fabricación de carrocerías dificulta a veces las labores de reparación. Los fabricantes de equipos adaptan sus máquinas y herramientas para facilitar las labores en el taller. La sustitución de las piezas pasa por retirar las mismas de la carrocería y montar unas nuevas uniéndolas por soldadura. Cuando se presenta esta situación, los equipamientos del taller han de adaptarse a las propiedades de estos aceros para ofrecer unos resultados satisfactorios. Los equipos de soldadura antiguos no disponen de las últimas técnicas de soldadura



(inverter, digitalización, synergia) ni de la capacidad suficiente para unir los nuevos aceros y grosores de paneles superiores a tres milímetros (Witik *et al.*, 2011).

En los últimos años el diseño para el ahorro en peso ha ganado una gran importancia en la industria automotriz. La tendencia hacia una mayor comodidad y un alto factor de seguridad al mismo tiempo que el ahorro en combustible y la exhaustiva reducción de la emisión de contaminantes ha encaminado a la obligación de realizar automóviles más ligeros (Bode *et al.*, 2004).

Se ha realizado un esfuerzo considerable para expandir la tecnología del acero y sus procesos de manufactura para construir vehículos con menor masa e incrementar la seguridad con el uso de acero (Krupitzer, 2004).

Cuba por ser un país subdesarrollado que cuenta con un parque automotor que revela alto grado de envejecimiento, donde aproximadamente el 60 % del total de equipos se encuentra entre 50 y 60 años de explotación, afectado por un período especial con crítica situación económica financiera, deterioro pronunciado de los viales y fuerzas de trabajo calificada, aún no cuenta con estos equipos y medios sofisticados, situación que conlleva a la reparación del equipamiento automotor con el empleo de técnicas obsoletas como la soldadura oxiacetilénica, soldadura por resistencia y por arco eléctrico.

1.4. Generalidades del proceso de soldadura oxiacetilénica

La importancia de la soldadura oxiacetilénica (Oxyacetylene Welding, OAW), en la unión de las láminas es el método más importante y el que da a las carrocerías la rigidez necesaria. La soldadura puede ser autógena, si las piezas a unir son del mismo material y no se utiliza ningún otro material de unión o mediante metal de aportación, si para la unión se utiliza un material metálico diferente al que forma las piezas (Ignoto, 2001).

Cuando se usa metal de aporte, normalmente está en forma de varillas de 90 cm de longitud con diámetros que van desde 1,6 hasta 9,5 mm. La composición del aporte debe ser similar a la de los metales base. Con frecuencia se recubre el aporte con un fundente, lo cual ayuda a limpiar las superficies, evita la oxidación y se produce una mejor unión soldada.

El acetileno (C_2H_2) es el combustible más popular entre el grupo de OFW porque soporta temperaturas más altas que cualquiera de los otros, hasta de 3 480 °C. La flama

en la soldadura oxiacetilénica se produce mediante la reacción química del acetileno y el oxígeno en dos etapas.

El proceso con la llama oxiacetilénica (figura 1.2), presenta además, otras ventajas como: la suficiente flexibilidad y fácilmente regulable, ya sea con exceso de oxígeno o de acetileno, en función de los metales a unir. La composición de los productos de la llama corresponde a unas propiedades típicamente reductoras. No es un producto derivado del petróleo y por tanto, no está sujeto a oscilaciones de producción y precios.



Figura 1.2. Proceso de soldadura oxiacetilénica en el automóvil.

El calor total liberado durante las dos etapas de la combustión es de $55 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ de acetileno. Sin embargo, debido a la distribución de la temperatura en la flama, la forma en la que ésta se extiende sobre la superficie de trabajo y se pierde en el aire, así como las densidades de energía y las eficiencias de transferencia de calor en la soldadura con oxiacetilénico son relativamente bajas: $\eta = 0,10$ a $0,30$.

La soldadura con oxiacetilénico usa equipo relativamente barato y portátil. Por tanto, es un proceso económico y versátil, conveniente para producción en bajas cantidades y trabajos de reparación. Rara vez se usa para soldar materia prima de láminas y placas más gruesas de 6,4 mm debido a las ventajas de la soldadura con arco eléctrico en tales aplicaciones. Aunque la OAW puede mecanizarse, con frecuencia se ejecuta en forma manual y por esta causa, depende de la habilidad del soldador producir una unión soldada de alta calidad.

De forma general estos materiales tienen puntos de fusión bajos, como ocurre con el plomo y el estaño, basta con una lámpara de butano para conseguir la suficiente energía calorífica. Pero cuando se trata del hierro y del acero, la cantidad de energía necesaria es

mucho mayor. Se precisan métodos más complejos, con las herramientas apropiadas para ese fin. La soldadura oxiacetilénica se basa en la fusión del material base y/o el material de aportación por el calor producido por la oxidación del acetileno durante su combustión.

1.4.1. Características del proceso

El proceso se realiza mediante el empleo de un soplete (1) que mezcla el oxígeno proveniente de un botellón (2), modificada su presión por el regulador (3), a través de la manguera (4) y el acetileno proveniente de un botellón (5), modificada su presión por el regulador (6), a través de la manguera (7). En la figura 1.3 se muestran los elementos antes relacionados.

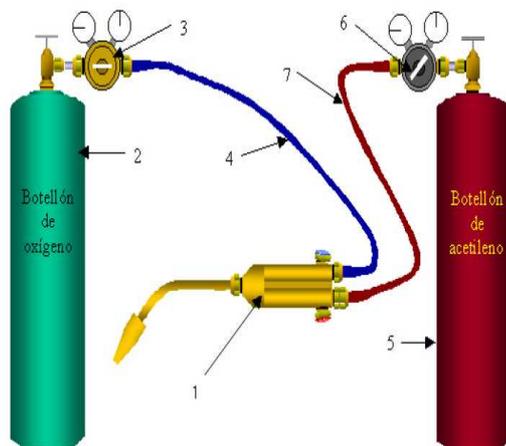


Figura 1.3. Esquema general de la instalación para la soldadura oxiacetilénica.

Se emplea para la soldadura de aceros, cobre y sus aleaciones, entre otros metales. El equipo completo forma un conjunto que se coloca en una carretilla especialmente diseñada al efecto, que incluye una cadena o soga en buen estado para atar los botellones a la misma.

En los procesos de oxigas la fuente de energía calorífica para lograr la soldadura por fusión de los materiales, la constituye una llama que se obtiene como resultado de la reacción química durante la combinación o mezcla de un gas combustible (acetileno) y un gas carburante (oxígeno). Esta reacción es fuertemente exotérmica y la llama a que da lugar, que se dirige, mediante un soplete, a los bordes de la pieza a unir, provoca su fusión y soldadura.

La llama oxiacetilénica, en dependencia de la proporción de oxígeno y acetileno que la conforma puede ser de tres tipos: neutra o normal, cuando el contenido de oxígeno y acetileno es aproximadamente el mismo; oxidante, cuando la proporción de oxígeno es mayor en 1,3 veces la de acetileno y carburante, cuando ocurre lo contrario.

En la figura 1.4 se muestran los diferentes tipos de llamas, se diferencian entre sí por su forma, tamaño, colores y sonidos, resultando relativamente fácil su identificación.



Figura 1.4. Tipos de llama oxiacetilénica.

Como se observa en la figura 1.4, la llama normal o neutra posee un dardo definido, con un contorno nítido y en ella se observan las tres zonas que la componen: el dardo, la zona intermedia y el penacho. La llama oxidante se caracteriza por un dardo muy corto y en forma de cono, por un color más azulado - blanquecino, por un tamaño menor y un sonido peculiar que produce el exceso de oxígeno al salir de la punta del soplete. Por su parte la llama carburante, posee un dardo largo amarillento, presentando la llama una gran longitud, sin diferenciación perceptible entre la zona intermedia y el penacho, con una coloración rojiza generalizada y una aureola de hollín en el borde del penacho, propia de una combustión incompleta.

Este proceso de soldadura, al ser por fusión, permite obtener una unión metalúrgica excelente con relativa facilidad y una homogeneidad de propiedades satisfactorias, pero al mismo tiempo y como consecuencia de la aportación de calor requerida, puede provocar: pérdida del estado metalúrgico del material, segregaciones durante el enfriamiento, distorsiones mecánicas, tensiones internas.

El proceso OAW (Soldadura oxiacetilénica), es el más importante y el más utilizado en la práctica industrial, brinda entre sus propiedades la llama más caliente y más concentrada de todos los gases industriales, pues puede alcanzar una temperatura promedio de hasta 3 200 °C, facilitando por esta razón, el proceso de soldadura por fusión, fundamentalmente cuando aumentan los espesores de las chapas a soldar.

1.5. Transformaciones estructurales en la soldadura de los aceros

Durante el proceso de reparación por soldadura de la carrocería del automóvil, se emplean en gran medida los aceros de bajo carbono y baja aleación. Estas aleaciones son la principal aplicación de la soldadura oxiacetilénica. Sueldan bien con soldadura oxiacetilénica y llama neutra, normalmente no necesitan ni fundentes ni precalentamiento, ni postcalentamiento. Las tensiones residuales que pueden aparecer, se deberán fundamentalmente al ciclo térmico y a distorsiones mecánicas, dadas las bajas velocidades de enfriamiento que se obtienen con estos procesos.

Lo anterior es asumido por efecto del calor suministrado y absorbido por la aleación en la zona adyacente al depósito de soldadura; por los procesos de transferencia térmica y cambios de fase respectivos, fenómenos de recristalización presentes y esfuerzos residuales remanentes (Bloem *et al.*, 2007; Pfeifer y Gawrysiuk, 2006; Zander y Sandström, 2009; Torres, 2002; Rossini *et al.*, 2012), esto es, tomando en cuenta que las uniones soldadas son afectadas por las cargas y esfuerzos transmitidos a las juntas, así como por las condiciones de trabajo, geometría y complejidad del producto y/o construcción soldada, generando concentradores de esfuerzos, fatiga, agrietamientos y fracturas (Pfeifer y Gawrysiuk, 2006; Skillingberg y Green, 2007).

El aporte térmico está asociado a parámetros de soldadura como tensión, intensidad de corriente, velocidad de avance, tipo y flujo de gases de protección, transferencia y altura del arco, posición de soldadura. De manera que el aporte térmico afecta las propiedades físicas y químicas, dado que se generan cambios microestructurales según sea la sensibilidad al calor del material soldado.

Estos cambios microestructurales están asociados a la formación de dislocaciones en materiales deformados, a fenómenos de recristalización y tamaño de grano, a la calidad y nivel de precipitados presentes tanto en el interior de los granos como en los límites de grano, a la capacidad de dilución de algunos elementos presentes en las aleaciones, definiendo las transformaciones de fase respectivas y los esfuerzos residuales remanentes en la unión (Kuk *et al.*, 2004; Fu *et al.*, 2006).

1.6. Soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia, SR (en inglés resistance welding, RW), es un grupo de procesos de soldadura por fusión que utiliza una combinación de calor y presión para

obtener una coalescencia, el calor se genera mediante una resistencia eléctrica dirigida hacia el flujo de corriente en la unión que se va a soldar. Los principales componentes en la soldadura por resistencia se muestran en la figura 1.5, para una operación de soldadura de puntos por resistencia, proceso de uso más difundido en el grupo.

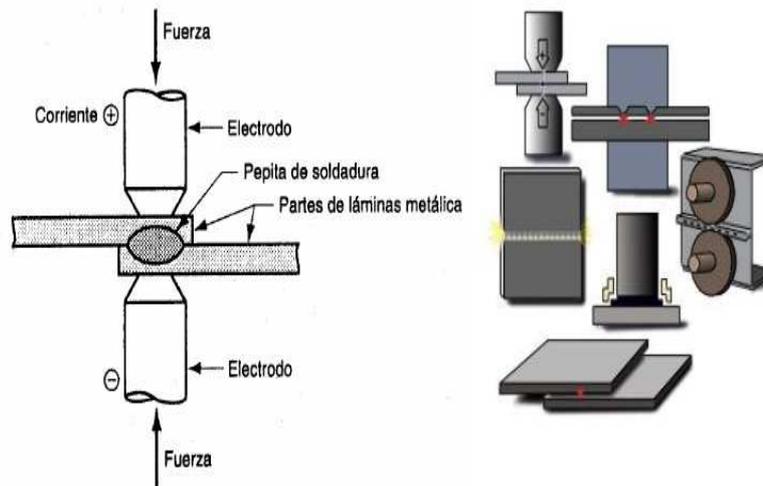


Figura 1.5. Soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia eléctrica, es un proceso en el cual superficies en contacto son unidas con uno o varios puntos mediante la generación de calor debido a la resistencia al paso de una corriente eléctrica que circula a través de unos electrodos que sujetan y aplican presión a las piezas que se desean unir. Las superficies en contacto en la región de concentración de la corriente son calentadas por un pulso de corto tiempo de bajo voltaje, un alto amperaje de corriente para formar la unión soldada. Cuando el flujo de corriente cesa, la fuerza del electrodo es mantenida mientras que el metal soldado se enfría rápidamente (Chao, 2003).

En la industria automotriz se utiliza el proceso de soldadura por resistencia eléctrica por puntos, el cual permite efectuar el ensamble de las distintas piezas que forman la estructura o carrocería. Se considera como el proceso más significativo de unión debido a su alta velocidad y fácil automatización (Takahashi, 2003).

Ferrasse y Verrier (1998) coinciden en plantear que la operación produce una zona de fusión entre las dos partes, denominada una pepita de soldadura en la soldadura de puntos. En comparación con la soldadura con arco eléctrico, la soldadura por resistencia no usa gases protectores, fundentes o metal de aporte y los electrodos que conducen la corriente eléctrica para el proceso son no consumibles, la RW se clasifica como un

proceso de soldadura por fusión porque el calor aplicado provoca la fusión de las superficies que se empalman. Sin embargo, hay excepciones. Algunas operaciones de soldadura basadas en el calentamiento de una resistencia usan temperaturas por debajo del punto de fusión de los metales base, por lo que no ocurre esta fusión.

La corriente usada en las operaciones de soldadura por resistencia es muy alta (por lo común de 5 000 a 20 000 A), aunque el voltaje es relativamente bajo (normalmente menos de 10). La duración de la corriente es breve en la mayoría de los procesos, tal vez de 0,1 a 0,4 segundos en una operación de soldadura de puntos normal.

Según Manokruang (2009) las razones por las que la corriente es tan alta es la soldadura por resistencia son: 1) el término al cuadrado amplifica el efecto de la corriente y 2) la resistencia es muy baja (alrededor de 0,0001 W). La resistencia en el circuito de soldadura es la suma de: 1) La resistencia de los electrodos, 2) la resistencia de las partes de trabajo, 3) las resistencias de contacto entre los electrodos y las partes de trabajo y 4) la resistencia de contacto de las superficies unidas sean la resistencia más grande en la suma, dado que ésta es la posición deseada para la soldadura.

La resistencia de los electrodos se minimiza usando metales con resistividades muy bajas, tales como el cobre. La resistencia de las partes de trabajo es una función de las resistividades de los metales base implícitos y los espesores de las partes. La resistencia de contacto entre los electrodos y las partes se determina mediante las áreas de contacto (tamaño y forma del electrodo) y la condición de las superficies (por ejemplo, la limpieza de las superficies de trabajo y el óxido en el electrodo). Por último, la resistencia en las superficies a unir depende del acabado de la superficie, la limpieza, el área de contacto y la presión. No debe existir pintura, grasa, suciedad u otros contaminantes que separen las superficies que hacen contacto.

1.6.1. Gradiente de temperatura en la soldadura por resistencia

La figura 1.6 muestra el gradiente de temperatura de un punto de soldadura debido a las resistencias totales de los elementos involucrados en el proceso. Los materiales utilizados en los electrodos son por lo general aleaciones base Cu y pueden ser reforzadas o endurecidas mediante la adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación. Las aleaciones de Cu usadas en la soldadura por resistencia eléctrica han sido

clasificadas por la Resistance Welding Manufacturéis Association (RWMA) (Kaiser, 1982).

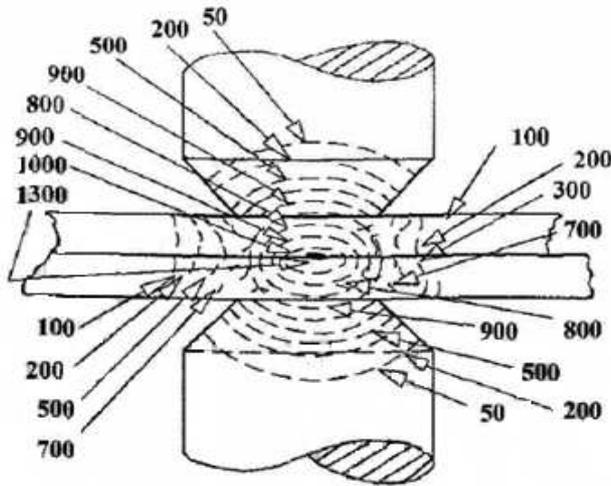


Figura 1.6. Temperaturas (en °C) que se generan en las piezas de trabajo

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

El calor generado en 2 y 6 se disipa rápidamente en los contactos con los electrodos 1 y 7, mientras que el calor en 4 es parcialmente atrapado y la disipación es más lenta. Conforme el tiempo de soldadura progresa, la razón para que el punto 4 se eleve será más rápido que para 2 y 6. La temperatura de soldadura está indicada con una línea punteada (Chuko y Gould, 2002).

Esta soldadura tiene la característica de no producir una aplicación de calor continua sobre la pieza a soldar, de forma que la zona modificada en sus propiedades por efecto de la temperatura, se reduce al punto de soldadura, manteniéndose así las propiedades físicas y mecánicas de los materiales unidos y consiguiéndose uniones muy resistentes en el caso de la soldadura por pinzas.

Otra de las características más importantes de este tipo de unión es que se pueden restaurar, mediante imprimaciones electrosoldables, las protecciones anticorrosivas de las partes interiores de las chapas a unir. Por el contrario, tiene el inconveniente en el caso de la soldadura por pinzas, de la necesidad de poseer acceso por ambos lados de la unión (Guerra, 1993).

Sin embargo, la resistencia de un punto de soldadura es competitiva en naturaleza entre la capacidad de resistir la carga del núcleo y en la zona afectada por el calor (HAZ). Para alcanzar una resistencia máxima, un punto de soldadura debe tener un tamaño de núcleo suficiente para proporcionar mayor resistencia a la fractura comparada con la de la zona afectada por el calor. Existen posibilidades de formar martensita revenida en la región externa del HAZ, ésta martensita puede debilitar la región. El incremento en la energía de entrada engruesa la ferrita acicular que puede formarse en la soldadura y de esta forma debilita la región (Baik *et al.*, 2011).

1.6.2. Solidificación del material en la soldadura por resistencia

Durante la soldadura, la solidificación del punto de soldadura es similar a la solidificación de un metal en el proceso de fundición, el cual consiste en dos etapas: la nucleación de la fase sólida y el subsecuente crecimiento de los cristales (Aguirre, 2007).

De acuerdo con Renault (2007) el proceso de cristalización es controlado por la disipación de calor, ya sea por los electrodos o por el metal base. La dirección de enfriamiento, la tasa de enfriamiento y la composición del metal base afectan el tipo, tamaño y orientación de los cristales formados. Durante la solidificación del punto de soldadura se presenta un cambio en la composición del metal base, justo en donde empiezan a precipitar los cristales.

Plantea Meza (2004) y Bermejo *et al.* (2008), que cuando existe un rápido enfriamiento en la zona de soldadura, se presenta el fenómeno de la microsegregación, es decir la tasa de difusión en los cristales precipitados no es lo suficientemente amplia, como para lograr una composición homogénea por lo cual se forman capas de diferente composición química y el cristal que núcleo primero será rico en unos componentes y pobre en otros, mientras que en las capas externas sucederá lo contrario.

Entre los cristales que se forman están las dendritas, los cristales globulares y celulares que se forman por la composición del material base y la transferencia de calor a través de la interfase líquido sólido, bajo condiciones adecuadas de soldadura el enfriamiento por agua de los electrodos actúan como un sumidero de calor absorbiendo la mayor cantidad de calor y el resto se disipa por el material base. En la figura 1.7 se puede observar este comportamiento.

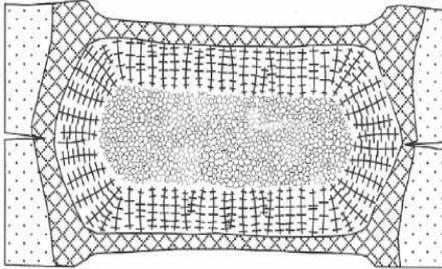


Figura 1.7. Estructura esquemática de un punto de soldadura ideal.

Fuente: Aguirre (2007).

La figura 1.7 muestra un punto de soldadura ideal, el cual es realizado con parámetros de soldadura adecuados y un correcto sistema de enfriamiento.

Cuando el enfriamiento no es el recomendable según (Blackman *et al.*, 2009) en el proceso de soldadura por resistencia de puntos, es decir los parámetros de soldadura son erróneos o existen barreras térmicas indeseables pueden generarse defectos en la soldadura como poros o fisuras, especialmente cuando el volumen que se contrae durante la soldadura es muy grande (chapas metálicas de espesores grandes). La figura 1.8 muestra este efecto en donde se aprecia un crecimiento de grano columnar en la dirección de los electrodos causado por el enfriamiento rápido en la dirección los electrodos.

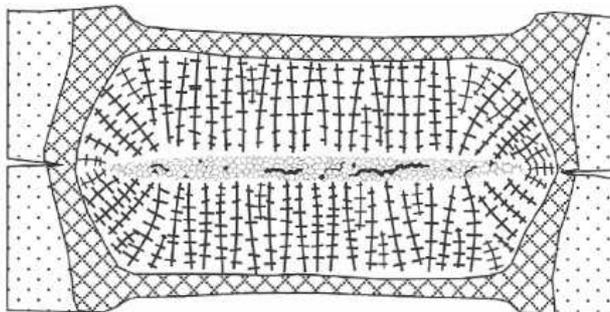


Figura 1.8. Estructura esquemática de un punto de soldadura, con enfriamiento más rápido en los electrodos que en el metal base. Fuente: Aguirre (2007).

No obstante considera Blackman *et al.* (2012) que existe otro efecto y se presenta cuando el enfriamiento de los electrodos no es el adecuado y las causas principales pueden ser: los electrodos no disponen de sistema de enfriamiento, la velocidad de circulación del agua es muy baja, los electrodos están en mal estado o el área de contacto entre el electrodo y el metal base es muy pequeña, por lo tanto gran parte del calor será disipado por el material base y la última porción de líquido solidificara en el centro del punto de soldadura,

1.7. Acero galvanizado

El término de galvanizado se utiliza casi exclusivamente para describir la formación de un recubrimiento de zinc sobre piezas de acero o hierro fundido, sumergiéndolas en un baño de zinc fundido (figura 1.9). El galvanizado ha alcanzado, en el campo de la protección del acero contra la corrosión, una importancia especial al garantizar una protección a largo plazo, con necesidades muy reducidas de mantenimiento. Sin embargo, en función de las características que deba presentar la protección anticorrosiva, se aplican diferentes técnicas de protección a base de zinc (Pyttel *et al.*, 2012).

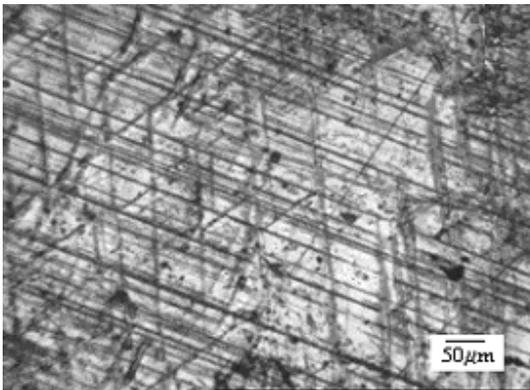


Figura 1.9. Microestructura del galvanizado.

El zinc se perfila como un posible candidato, no sólo por su bajo costo, sino por su efecto barrera respecto del acero (Rojas, 2007). El estudio de la permeación de hidrógeno en láminas galvanizadas en caliente y por electrodeposición permitiría analizar no sólo el efecto del metal en sí, sino el de los compuestos intermetálicos hierro-cinc en la difusión del hidrógeno (Pakandam *et al.*, 2010). Un recubrimiento actúa como una barrera cuando el coeficiente de difusión de hidrógeno en éste es mucho menor al del sustrato.



En este caso según criterios de Pástor (2002), deberá transcurrir un lapso de tiempo apreciable, incluso en películas delgadas, antes que la concentración de hidrógeno en la interfase metal recubrimiento alcance un valor considerable que impulse la difusión (Martínez-Conesa *et al.*, 2012). Para que un recubrimiento sea una efectiva barrera contra la permeación de hidrógeno debe ser continuo, relativamente grueso, impermeable y estable en el ambiente al que estará expuesto.

La generación de recubrimientos de Zn y aleaciones de Zn sobre el acero es uno de los procesos más utilizados para proteger componentes de acero expuestos a ambientes corrosivos (Burgos, 1995). La capacidad de las líneas de galvanizado ha evolucionado significativamente desde 1980. Esto ha sido en respuesta a la demanda de los clientes de la industria automotriz en producir vehículos más ligeros utilizando aceros de menor espesor y con mejores propiedades mecánicas de alta resistencia combinada con la formabilidad y uniformidad del recubrimiento (Zuñiga, 2005), además de la preservación de la integridad de la estructura y el mantenimiento de la apariencia de los automóviles en ambientes corrosivos, factores que han encaminado al uso de aceros recubiertos de Zn para aplicaciones automotrices (Rojas, 2007).

Los recubrimientos de Zn son usados para mejorar la corrosión acuosa del acero mediante dos métodos, una barrera protectora o protección galvánica. En la barrera protectora, la capa de Zn, que separa el acero del ambiente corrosivo, se corroerá antes que dicho ambiente alcance al acero. En la protección galvánica, debido a que el Zn es menos noble o anódico que el Fe a condiciones ambientales, se convertirá en un ánodo de sacrificio para proteger el sustrato de acero, aún cuando éste pueda presentar cortes en las orillas o ralladuras en el recubrimiento (Hong *et al.*, 2002).

Los métodos típicos de procesamiento usados para producir recubrimientos de Zn incluyen el galvanizado por inmersión en caliente (continuo o por lote), rociado térmico y por electrodepositado (Fuchs y Riedel, 1995).

Dependiendo del tipo de recubrimiento, la microestructura y composición de los constituyentes del sustrato y el mismo recubrimiento se controlarán las propiedades deseadas. El sustrato debe de cumplir los requerimientos de diseño del componente, de esta manera se selecciona en base a propiedades mecánicas como la resistencia, ductilidad, formabilidad. Las propiedades importantes que tienen que ver con el uso de

recubrimientos de Zn son principalmente la corrosión y la formabilidad y otras propiedades involucran la soldabilidad y el pintado.

1.7.1. Soldabilidad del acero galvanizado

La soldabilidad de los recubrimientos de Zn es una propiedad importante del recubrimiento, ya que la mayoría del producto es unido mediante este proceso. Con la soldadura por puntos los recubrimientos de Zn reducen la vida útil de los electrodos debido a la aleación que se forma entre el Cu y el Zn. Cuando se trata de un acero galvanizado, la vida del electrodo puede ser tan pequeña como de 1 500 a 2 000 puntos de soldadura comparado con los 10 000 puntos para un acero sin recubrimiento.

Según Bode *et al.* (2004) este efecto conlleva a que se presente una alta resistencia, calor localizado y un incremento de picaduras y erosión en la punta del electrodo. Como resultado, los costos de manufactura se incrementan porque la baja duración de la punta del electrodo reduce la productividad debido a los tiempos muertos en las operaciones de soldadura para rectificar las puntas.

El mecanismo de degradación de la soldadura por puntos se debe al hecho de que la temperatura en la interfase entre el electrodo y el recubrimiento (800 °C) es más alta que el punto de fusión del Zn (419 °C). El Zn se alea con el Cu del electrodo y forma latón, el cual tiene propiedades mecánicas menores que la aleación del electrodo produciendo de esta forma un efecto llamado de hongo (mushrooming) en la cara activa del mismo, el cual se puede describir como si la cara del electrodo se fuera achatando conforme se efectúan los puntos de soldadura (Hesling *et al.*, 2001).

Conforme la cara se incrementa, la densidad de corriente disminuye bajando el tamaño de la soldadura. La soldadura de galvanneal es mejor que un galvanizado convencional, ya que es más difícil la aleación entre las fases Fe - Zn y el Cu del electrodo, mejorando de esta forma la vida útil del mismo (Dionne y Botton, 2002).



1.8. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ Se pudo establecer que la carrocería está conformada por diferentes aceros y metales, los cuales unidos a través de los procesos de soldadura garantizan una estructura rígida en el automóvil.
- ✓ El proceso de soldadura en uniones soldadas posee algunas desventajas como son las deformaciones, las tensiones residuales y los defectos propios del método, elementos que provocan agrietamiento en el conjunto soldado.
- ✓ Para garantizar la unión metalúrgica en las planchas de aceros empleadas en el automóvil se utilizan procesos de soldadura como el oxiacetilénico y el de resistencia por puntos, cada uno con sus particularidades.

Capítulo 2
Materiales y Métodos

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Los trabajos de reparación, se refieren a zonas concretas de la carrocería. Algunos consejos relativos a los trabajos previos de preparación de la carrocería para su desmontaje de las piezas en mal estado y para prepararla para el trabajo del operario. Antes de comenzar el trabajo se debe tener en cuenta la necesidad de preparar la carrocería haciendo desmontajes o desconexiones previas o limpieza que posteriormente nos van a facilitar la tarea o van a eliminar algún riesgo. La revisión de estos trabajos previos se dividen en cuatro partes: elementos peligrosos para el trabajo, cuerpos extraños, elementos que pueden resultar dañados y elementos que obstaculizan el trabajo.

En este capítulo se plantea como objetivo establecer la metodología relacionada con la preparación de muestras, así como la relación de máquinas y equipos a emplear en el proceso de soldadura de acero AISI 1006 y del acero galvanizado.

2.2. Composición química de las aleaciones

La composición química estándar de las aleaciones según Alloy Casting Institute (ACI), según la designación adoptada por la AISI y SAE, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, se muestran en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Composición química del acero al carbono, en (%)

Acero	C	P	S	Cr	Si	Mn	Fe
1006	0,06	0,040	0,050	0,024	0,001	0,35 máx	Resto

Según la composición química estándar del acero, el mismo se clasifica como un acero de bajo contenido de carbono, que presenta buena soldabilidad y maquinabilidad, durante el proceso de soldadura no es susceptible al agrietamiento debido al contenido de carbono presente.

En la tabla 2.2 se muestra la composición química del acero galvanizado, en %

Tabla 2.2. Composición química del acero galvanizado, en %

Acero	C	P	S	Cr	Si	Mn	Fe
Galvanizado	0,076	0,006	0,027	0,014	0,085	0,43	Resto

Un recubrimiento de galvanizado es esencialmente Zn puro; el contenido de Al aproximado en el recubrimiento es de 0,2 a 0,3 %. El Al es probablemente el elemento más importante que se agrega al baño de Zn, con diferentes niveles requeridos para producir disímiles

propiedades en el mismo. Niveles de Al de 0,005 - 0,02 % son agregados para darle brillo al recubrimiento inicial de la superficie. El efecto se encuentra relacionado a la formación de una capa continua de Al_2O_3 en el área del recubrimiento que inhibe la oxidación posterior actuando como una barrera protectora.

Este efecto es también responsable de la reducción de la oxidación atmosférica del baño de Zn. Se agrega de 0,1 a 0,3 % de Al para suprimir el crecimiento de las fases intermetálicas frágiles de Fe-Zn en la interfase del recubrimiento del acero, formando una capa de inhibición [Fe_2Al_5 (Zn)]. El término de éste periodo de incubación es marcado por la interrupción de la capa inicial, seguido de un rápido ataque al sustrato de acero.

2.3. Microestructura de las aleaciones

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de ambas aleaciones, el objetivo es que permita establecer los cambios ocurridos en los mismos luego de realizados los procesos de soldadura a los cuales serán sometidos (acero bajo carbono 1006, soldadura por resistencia y el acero galvanizado, soldadura oxiacetilénica). La figura 2.1 se corresponde con la muestra patrón del acero al carbono y la 2.2 con la del acero galvanizado.

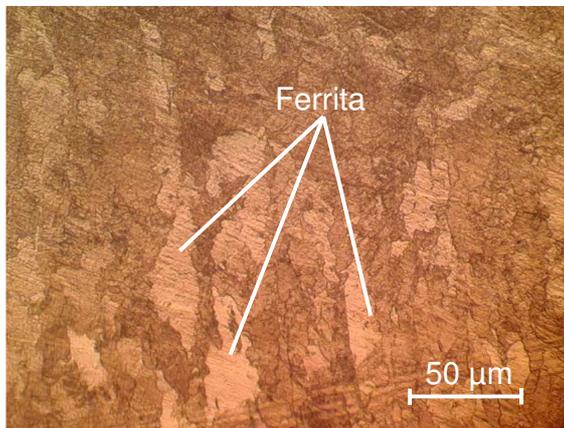


Figura 2.1. Microestructura ferrítica del acero bajo carbono.

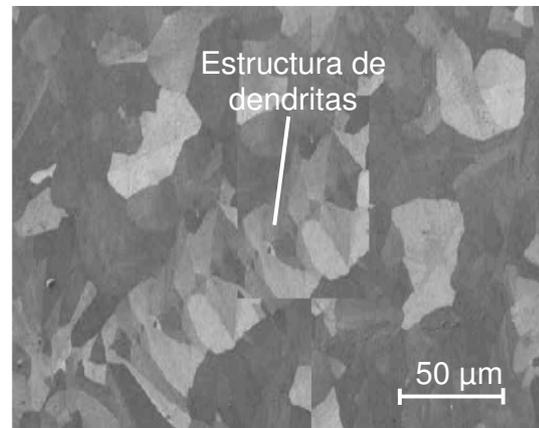


Figura 2.2. Microestructura tipo flor de una lámina galvanizada.

La microestructura de la figura 2.1 se corresponde con la muestra patrón de la aleación después del ataque, se distingue la estructura de ferrita. Los granos de ferrita muestran una estructura equiaxial y con un tamaño de grano número siete. En la figura 2.2 la microestructura del galvanizado. Los recubrimientos de galvanizado muy seguido ofrecen una estructura que consiste de un gran número de granos llamados flores como se muestra en la figura 2.2. En sección transversal, se forma primero una capa de inhibición de Fe_2Al_5

(Zn), previniendo la formación cualquier fase intermetálica de Fe - Zn. La sobre capa está formada de dendritas de la fase Eta (Zn puro) y aparece como una estructura policristalina. El tamaño de la flor está influenciado por las condiciones de enfriamiento durante la solidificación.

2.4. Plan experimental

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon las muestras, tanto de acero AISI 1006 para la soldadura por resistencia, como la de acero galvanizado con la soldadura oxiacetilénica, fueron sometidas a diferentes condiciones de soldadura, la unión de la soldadura por resistencia se realizó traslapada (figura 2.3) y para la soldadura oxiacetilénica se realizó a tope (figura 2.4).



Figura 2.3. Vistas transversales de la penetración de la soldadura por resistencia.

La figura 2.4 se corresponde con la unión a tope del acero galvanizado.

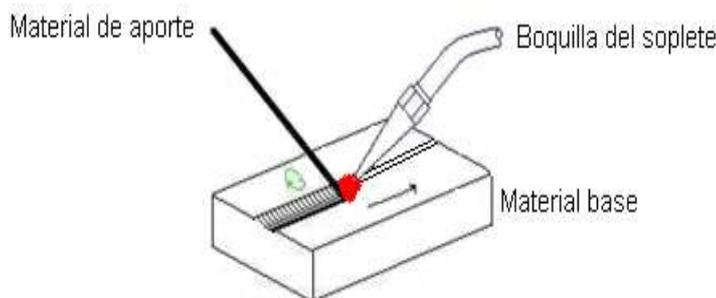


Figura 2.4. Preparación de la unión para la soldadura oxiacetilénica.

El depósito del cordón de la soldadura oxiacetilénica se realizó en soldadura a la derecha. Se empleó una varilla RG 65 de 914 milímetros de longitud y 1,6 milímetros de diámetro, con resistencia a la tracción de 485 MPa, según AWS A5.2.

2.4.1. Parámetros de soldadura

Las variables que se consideraron como esenciales fueron aquellas que pueden afectar las propiedades mecánicas del conjunto soldado, siguiendo las recomendaciones del código

ASME sección QW-263, variables de soldadura para especificaciones de procedimiento (soldadura por resistencia) y la AWS AWS A 5.2.

Las diferentes probetas se prepararon con longitud de 100 mm y un ancho de 50 mm, se cortó longitudinalmente con una cizalla manual, antes de la unión del acero galvanizado, se procedió a puntearla en ambos extremos para de esta forma evitar alabeo y distorsiones, fueron sometidas a proceso de soldeo en diferentes condiciones. La preparación de las muestras para la soldadura se realizó según Norma ASTM E - 92.

En la tabla 2.3 se muestran los parámetros de soldadura empleados para la unión del acero AISI 1006 (soldadura por resistencia) y en la 2.4 los parámetros de la soldadura del acero galvanizado (soldadura oxiacetilénica).

Tabla 2.3. Parámetros para la soldadura por resistencia.

Espesor de la lámina	Electrodo	Tiempo de soldadura	Fuerza del electrodo	Corriente de soldadura	Diámetro de la zona fundida
Espesor	Diámetro	Ciclo			
mm	mm	S	MPa	A	mm
1,02	6,35	10	23	12 000	X

La tabla 2.4 muestra los parámetros seleccionados para el proceso de soldadura oxiacetilénica.

Tabla 2.4. Parámetros para la soldadura oxiacetilénica

Espesor de la lámina	Orificio de la boquilla	Presión de los gases		Flujo del acetileno	Zonas unión soldada
Espesor	Diámetro	Acetileno	Oxígeno		
mm	mm	Pa	Pa	l/min	Microestruc
1	2	0,07	0,15	0,50	X

2.5. Materiales y equipos empleados en la experimentación

Se emplearon diferentes máquinas y equipos, se consideró que las mismas fueran certificadas según normas y que en lo posible se ajustaran a las condiciones experimentales y evitar errores causales que surgen de forma involuntaria. Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada máquina, para ensayos microestructurales, la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio en estas, refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

2.5.1. Pulidora metalográfica montasupal

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 120, 200, 400 y 800, las características de la máquina son:

Voltaje (V)	250
Corriente (A)	2,5
Número de revoluciones (rev/min)	300 - 1 000
Potencia del motor (kW)	3,72

El objetivo de este enfoque es lograr acabados de superficies que sean lo suficientemente finas para reducir drásticamente o eliminar el pulido manual u otros procesos de acabado manual, los cuales toman normalmente entre 25 y 30 % del tiempo total de manufactura.

2.5.2. Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 (figura 2.5) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.



Figura 2.5. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

2.6. Preparación metalográfica de la probeta

El análisis mediante microscopio metalográfico permite resolver aspectos relacionados a la microestructura de un metal. Por ejemplo, forma y tamaño de los granos, las fases presentes

además de su distribución, defectos e inclusiones y algunos constituyentes no metálicos como sulfuros, óxidos y silicatos.

Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone la realización de un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada. Las operaciones se resumen en el siguiente orden (NC 10-56:86 y ASTM E3 – 95).

- Corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.

2.6.1. Corte de las muestras

Las dimensiones de la superficie a examinar se cortaron en secciones de 15 x 15 de forma tal que permitiera su fácil manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico. Se procede al corte de las pepitas de soldaduras de los cupones de prueba, con el fin de obtener dos partes iguales del botón como se muestra en la figura 2.6. En ambas soldadura, el corte se realizó de forma transversal.

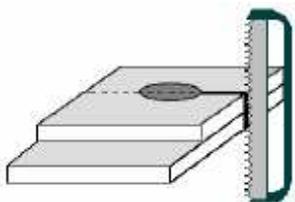


Figura 2.6. Corte transversal de la soldadura.

Para establecer el comportamiento microestructural en las diferentes zonas, luego de realizado el proceso de soldadura se siguió el procedimiento que aparece reflejado en las figuras 2.7a y 2.7b.



Figura 2.7a. Acero AISI 1006.



Figura 2.7b. Acero galvanizado.

En la figura 2.7a se muestra la forma de preparación y soldadura de la muestra de acero al carbono luego de realizado el proceso de soldadura por resistencia y en la 2.7b la

preparación de la unión soldada del acero galvanizado luego del proceso de soldadura oxiacetilénica. Se realizó para establecer el comportamiento de la microestructura en la zona fundida (ZF), la zona de influencia térmica (ZIT/ZAT) y la interfase del cordón.

Las muestras se encapsularon para poder realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el fácil manejo de las mismas. Cuando se va a realizar análisis microestructural en bordes de muestras deformadas, es importante conservar un ángulo de 90° en toda el área a observar, aspecto que no es posible, de no realizarse esta operación, ya que durante las operaciones de desbaste y pulido, los bordes se distorsionan redondeándose, obteniéndose una falsa observación de la imagen (Sturla, 1951). El encapsulado se realizó con resina epoxi ROYAPOX – 5050.

2.6.2. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050

La resina epoxi ROYAPOX 5050 está compuesta por dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas que conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre - 30 y 125 °C. Se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y endurecedor 5050.

La relación de mezcla en peso (resina/endurecedor) es de 100/40 y puede utilizarse en la impregnación ó relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

2.6.3. Desbaste y pulido

El desbaste a grandes rasgos, consistió en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El pulido con los papeles abrasivos se realizó con la variación de la granulometría, desde la más gruesa a la más fina. Concluido el proceso de lijado fino, se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas. En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 320 y 400 según (ISO 9001).

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

2.6.4. Lijado grueso y fino

Con el lijado grueso se redondearon los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulimento. Las primeras etapas de lijado se realizaron con papel de lija con tamaño de granos 120 y 240 respectivamente, para obtener una superficie plana, libre de toda distorsión o huellas producto del corte y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección. El lijado fino se realizó semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inició con lija de tamaño de granos 320 hasta 800. Cada vez que se cambió de lija se operó de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

En ambas operaciones de pulido se utilizó abrasivos, en nuestro trabajo se realizó el óxido de cromo. Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, se secaron con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

2.6.5. Ataque de las muestras para su examen microscópico

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo espejo, para observar la estructura metalográfica formada después del proceso de desgaste (ASTM E - 262 - Practice A). En la tabla 2.5 se muestra la forma de preparación y ataque de las muestras.

Tabla 2.5. Forma de preparación y ataque de las muestras.

Material	Composición de los reactivos	Régimen de ataque químico
AISI 1006	1-5 ml de ácido nítrico (peso específico 1,42) + 100 ml alcohol - Rectif (Nital)	Ataque químico bajo t 20 °C durabilidad de 15 s a un minuto.
Galvanizado	1-5 ml de ácido nítrico (peso específico 1,42) + 100 ml alcohol - Rectif (Nital)	Ataque químico bajo t 20 °C durabilidad de 15 s a un minuto.

Para la observación de las muestras por microscopia óptica fueron atacadas con el mismo reactivo, aunque son diferentes tipos materiales, la base metálica es la misma.

2.6.6. Determinación de la dureza

El ensayo de microdureza se aplicó para la determinación de la dureza de los volúmenes microscópicamente pequeños de la aleación. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168 (figura 2.8), ubicado en el laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa.



Figura 2.8. Microscopio metalográfico para medición de microdureza.

La superficie de la probeta se preparó de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido). El número de dureza HV se determinó por el tamaño de las huellas.

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante con 136° , con una penetración en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para los puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas.

La microdureza (VHN) se calculó por la ecuación siguiente:

$$VHN = 1,58 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.1)$$

Donde:

VHN - número de dureza Vickers; kgf/mm^2

1,58 - constante

P - peso; kgf

$$\text{Diámetro medio} = \bar{d} \text{ (mm)} \dots \bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 - d_4)}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \quad (2.3)$$

2.7. Ciclo de soldadura en la soldadura por resistencia

El análisis del comportamiento térmico del fenómeno físico es muy importante en el proceso y es crucial entenderlo por la formación de la geometría de la soldadura, cambios microestructurales en el metal base afectado térmicamente y la distribución de esfuerzos

residuales en la unión. Conocer la intensidad de calor de entrada y la temperatura en gradientes en la pieza de trabajo es extremadamente importante en el estudio de procesos de soldadura. Además, da la proporción entre el calor efectivo entregado al poder eléctrico consumido es un indicativo de la ejecución de proceso.

La correcta ejecución de un punto de soldadura implica el seguimiento de una serie de pasos o ciclo de soldadura. El modelo que se muestra en la figura 2.9 se tendrá en cuenta para la ejecución de la soldadura por punto.

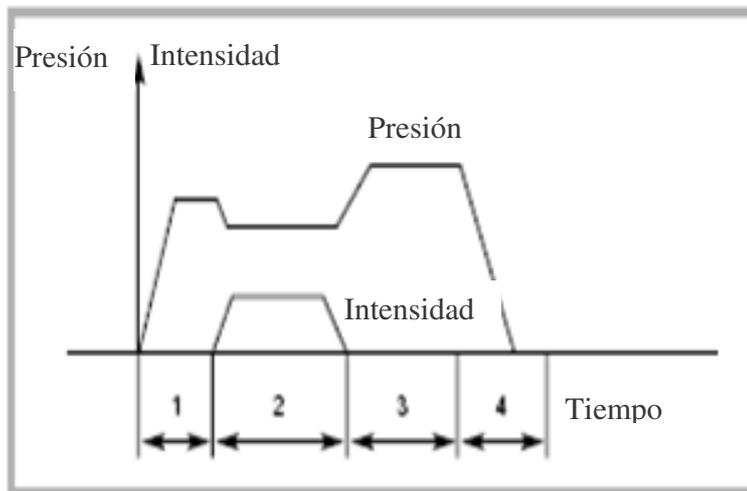


Figura 2.9. Procedimiento para la ejecución del proceso de soldadura por punto.

- ✚ Fase de posicionamiento y bajada (1). Es la operación en la que se produce el acercamiento de los electrodos hasta aprisionar las chapas a soldar, consiguiendo que éstas entren íntimamente en contacto, facilitando la ejecución de la soldadura.
- ✚ Fase de soldadura (2). Es la operación por la que se hace pasar la corriente eléctrica a través de las chapas a soldar, produciéndose así el calentamiento las zonas en contacto con los electrodos, para poder ejecutar la posterior forja del punto.
- ✚ Fase de mantenimiento o forja (3). Operación posterior a la fase de soldadura, una vez finalizada ésta, en la que se incrementa la presión de los electrodos sobre las chapas, para, aprovechando el calentamiento producido en la zona de unión, conseguir la forja del punto y sus posteriores propiedades mecánicas.
- ✚ Fase de cadencia o intervalo (4). Es la operación final del proceso, en la que se produce la reducción de la presión de los electrodos sobre las chapas ya soldadas, permitiendo la retirada de la máquina de soldadura y la vuelta a empezar para ejecutar un nuevo punto.

2.8. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura

El régimen de soldadura depende de diversos factores: tipo de material base, tipo de alambre, fundente, tipo de unión. Este proceso ocurre en tiempos muy cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la estructura del metal base. En general la velocidad del arco a lo largo de la pieza de trabajo es mucho mayor que la velocidad de difusividad térmica. En estos procesos, el flujo de calor en la dirección del trabajo es pequeño comparado con el de la dirección perpendicular de avance.

En el caso de la soldadura fuerte (oxiacetilénica) también conocida en la terminología inglesa como *brazing*, es un proceso de unión térmica donde el metal de aporte, se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad entre la holgura que existe entre los materiales a soldar y uniendo sus superficies por atracción atómica y mediante difusión. El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450 °C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que va a unir.

En este proceso se emplean tres tipos de llama (figura 2.10). La temperatura máxima se alcanza en la punta del cono interno; las temperaturas de la segunda etapa son, de algún modo, menores que las del cono interno. Durante la soldadura, la cubierta externa se extiende y protege de la atmósfera circundante las superficies de trabajo que se unen.

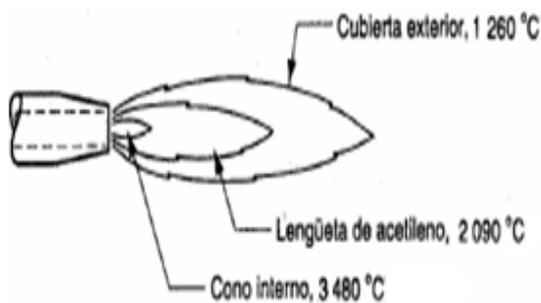


Figura 2.10. Tipo de llama empleada en el proceso de soldadura oxiacetilénica.

Para la unión de soldadura de las planchas de galvanizado, emplearemos la llama neutra, relación 1:1 de oxígeno y de acetileno con temperatura de 2 090 °C aproximadamente.

2.8.1. Generación de calor en la soldadura oxiacetilénica

El soplete de oxiacetilénico proporciona 0,5 mm³ de acetileno por hora y una razón igual de volumen de oxígeno para una operación de soldadura oxiacetilénica sobre acero de 1 mm. El calor generado mediante combustión se transfiere a la superficie de la pieza con una

eficiencia $f_l = 0,25$. Durante el proceso la concentración es del 75 % del calor de la llama en un área circular sobre la superficie de trabajo con un diámetro de 10 mm.

La razón de calor generado por la llama es el producto de la razón de volumen de acetileno por el calor de combustión y se determina como:

$$Q_g = V_a (C_c) \quad (2.4)$$

Donde:

Q_g - calor generado; J/s

V_a - volumen de acetileno, mm^3/h

C_c - calor de combustión; J/mm^3

El calor de combustión específico a considerar es de $55 \cdot 10^6 \text{ J}/\text{mm}^3$

Con una eficiencia de transferencia de calor $f_l = 0,25$ la cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo es:

$$Q_t = f_l \cdot Q_g \quad (2.5)$$

Donde:

Q_t - cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo; J/s

f_l - eficiencia de transferencia de calor

El área del círculo en la cual se concentra el 75 %, de calor de la llama se calcula como:

$$A = \frac{\pi(10^2)}{4} \quad (2.6)$$

Donde:

A - área del círculo en la cual se concentra el calor, mm^2

La densidad de energía en el círculo se encuentra al dividir el calor disponible por el área del círculo por la ecuación siguiente:

$$D_E = \frac{\%_{CLL} \cdot Q_t}{A} \quad (2.7)$$

Donde:

D_E - energía específica; $\text{J}/\text{s}\cdot\text{mm}^2$

$\%_{CLL}$ - por ciento del área de calor de la llama; %

2.8.2. Fuente de energía en la soldadura por resistencia

Se ejecutará la operación de soldadura de puntos por resistencia sobre dos piezas de láminas de acero AISI 1006 de 1,02 mm de espesor, usando 12 000 A con una duración de 10 segundos. Los electrodos tienen un diámetro de 6,5 milímetros en las superficies que hacen contacto. La resistencia es de 0,0001 (Ω). La unidad de energía de fusión para el metal U_m se considerará 10 J/mm³.

La energía calorífica aplicada a la operación de soldadura depende del flujo de corriente, la resistencia del circuito y el intervalo del tiempo en que se aplica la corriente. Esto se expresa mediante la ecuación:

$$Q = I^2 R t \quad (2.8)$$

Donde

Q - calor generado; J

I - corriente; A;

R - resistencia eléctrica, Ω

t - tiempo, en segundos.

La corriente usada en las operaciones de soldadura por resistencia es muy alta (por lo común de 5000 a 20 000 A), aunque el voltaje es relativamente bajo (normalmente menos de 10). La duración de la corriente es breve en la mayoría de los procesos (tiempo en segundos) para nuestro trabajo emplearemos 12 000 A.

Se determina el volumen de la pepita de soldadura (se supone que tiene forma de disco) por la ecuación siguiente:

$$V_p = 3 \frac{\pi}{4} (de)^2 \quad (2.9)$$

Donde:

V_p - volumen de la pepita; mm³

de - diámetro del electrodo, mm

El calor requerido para fundir este volumen de metal es:

$$Q_t = V_p (U_m) \quad (2.10)$$

Donde:

Q_t - calor generado total; J

El calor restante del proceso se determina como:

$$\%Q_{ig} = Q - Q_t \quad (2.11)$$

Donde:

$\%Q_{ig}$ - $\%$ de calor total generado total; $\%$

Q - calor generado; J

Q_t - calor generado total; J

2.8.3. Determinación del porcentaje de penetración

Condición en la cual la penetración en la unión es menor que la especificada, es una discontinuidad asociada con la soldadura. Es una condición donde el metal de soldadura no se extiende completamente a través del espesor de la junta con penetración total por una especificación. La apariencia superficial no siempre es un buen indicador de la calidad de la soldadura, ya que la desviación de corriente y causas de insuficiente calentamiento o penetración incompleta no dejan efectos visibles en la pieza de trabajo.

A partir de la macroestructura del punto soldado (probeta) utilizando una cámara digital. Las imágenes fueron impresas y con un pie de rey se midió las variables necesarias para el cálculo del porcentaje de penetración. En la figura 2.11 se muestra el procedimiento.

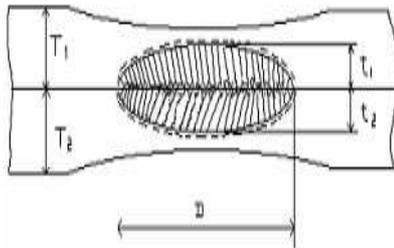


Figura 2.11. Vista transversal del punto de soldadura.

El porcentaje de penetración se calculó por la ecuación 2.12.

$$\%P = \frac{t}{T} \quad (2.12)$$

Donde:

$\% P$ - porcentaje de penetración.

t - espesor de la penetración, mm

T - espesor total de las láminas, mm

2.8.4. Prueba para determinar el porcentaje de penetración

Para determinar el porcentaje de penetración, se realizará la prueba de desgarre denominada Peel - roller test. Se empleará una herramienta manual (alicate). Esta prueba se realiza separando los extremos de las placas, uno de los cuales será sujeto en una mordaza y la otra será sujeto con el alicate.

Al realizar la prueba de desgarre se tiene dos condiciones:

- ✚ Si el punto de soldadura se desprende de la placa en la cual se está haciendo el efecto desgarre, para quedarse unido a la placa que está sujeta con las mordazas del alicate, implica que el punto de soldadura es bueno y tiene un comportamiento dúctil.
- ✚ Si el punto de soldadura desprende de la placa sujeta con el alicate sin haber realizado un esfuerzo considerable, implica que la soldadura es frágil y no es aceptable.

Esta prueba se debe realizar cuando el equipo de soldadura se encuentre calibrado y realice puntos de soldadura homogéneos. Se deberá desistir de esta prueba cuando existan puntos de soldadura con explosiones, como se muestra en la figura 2.12, de metal fundido.



Figura 2. 12. Explosión interna en placas.

Las principales causas de las expulsiones internas son la excesiva indentación y la separación considerable entre las láminas metálicas a soldar, es decir no existe una correcta sujeción de las piezas a soldar.



2.9. Conclusiones del capítulo 2

- ✓ Se establecieron los procedimientos para caracterizar el comportamiento microestructural de las aleaciones empleadas en el automóvil luego de ser sometida a proceso de soldadura oxiacetilénico y de resistencia por puntos.
- ✓ Para garantizar un adecuado análisis microestructural y en correspondencia con el espesor de las muestras, las mismas fueron encapsuladas con resina epoxi ROYAPOX 5050, de esta forma se evitará la distorsión de los bordes de las piezas.
- ✓ Las ecuaciones desarrolladas permitirán establecer el procedimiento metodológico para establecer las transformaciones que ocurren en los aceros analizados luego de ser sometidos a ciclo térmico de soldadura en diferentes condiciones.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

El análisis de los posibles cambios en las características y propiedades de los aceros de bajo contenido de carbono luego de realizada la soldadura permitirá conocer los parámetros del proceso, las transformaciones que ocurren en la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC). Esta información contribuirá a mejorar significativamente la soldadura de estos materiales y consecuentemente disminuiría pérdidas por uniones deficientes que incumplan características y especificaciones necesarias para determinadas aplicaciones.

En el presente capítulo se establece como objetivo analizar el comportamiento microestructural del acero AISI 1006 y del acero galvanizado sometido a soldadura por resistencia y soldadura oxiacetilénica respectivamente.

3.2. Análisis de la composición química

La composición química se tomó del resultados de tres chispas para obtener el promedio de cada una de ellas, se realizó en un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la empresa "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa. En la tabla 3.1 se muestra la composición química del acero AISI 1006 y en la tabla 3.2 la del acero galvanizado.

Tabla 3.1. Composición química del acero al carbono, en (%)

Acero	C	P	S	Cr	Si	Mn	Fe
1006	0,06	0,040	0,050	0,024	0,001	0,13	Resto

En la tabla 3.2 se muestra la composición química del acero galvanizado, en %

Tabla 3.2. Composición química del acero galvanizado, en %

Acero	C	P	S	Cr	Si	Mn	Fe
Galvanizado	0,054	0,006	0,027	0,014	0,085	0,43	Resto

En correspondencia con la composición química establecida por las normas y la determinada por análisis espectral, se puede plantear que los elementos presentes en ambas aleaciones se ajustan a las establecidas por las mismas.

3.3. Análisis del ciclo térmico para la soldadura oxiacetilénica

Se realiza el análisis del ciclo térmico de soldadura para las uniones metalúrgicas realizadas en el acero AISI 1006 por soldadura de resistencia y para el acero galvanizado realizado por proceso de soldadura oxiacetilénica.

El calor generado por la llama durante el proceso de soldadura se calculó por la ecuación 2.4, donde para un volumen de acetileno de $152,4 \text{ mm}^3/\text{h}$ y un calor de combustión de $55 \cdot 10^6 \text{ J/mm}^3$ se tiene que este calor es de $2\,328,33 \text{ J/s}$

La cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo durante el proceso de soldadura se calculó por la ecuación 2.5 para una eficiencia de transferencia de calor de 0,25 y un calor generado de $2\,328,33 \text{ J/s}$ se tiene que el calor que recibe la superficie es de $582,08 \text{ J/s}$

El área del círculo en la cual se concentra el 75 %, de calor de la llama se calculó por la ecuación 2.6 y se determinó que dicha área sea de $78,5 \text{ mm}^2$

La densidad de energía en el círculo donde se concentra la llama de la antorcha se determinó por la ecuación 2.7; para un 0,75 % del calor concentrado de la llama, un calor generado de $2\,328,33 \text{ J/s}$ y un área de $78,5 \text{ mm}^2$ se tiene que esta energía es de $5,56 \text{ J/s-mm}^2$.

El calor aplicado en la pieza es el que hará fundir al material de aporte y no el del soplete directamente sobre él. En función de las características de fluidez del material de aporte y del material base. Los cálculos realizados permiten establecer el ciclo térmico de la soldadura del galvanizado, sin embargo, la capa protectora en el área de soldadura afecta en gran medida la calidad y el aspecto del revestimiento galvanizado alrededor de la soldadura.

El revestimiento de zinc debería quitarse al menos entre 2,5 y 10 cm de cada lado de la zona de soldadura prevista y en ambos lados de la pieza de trabajo. Esmerilar el revestimiento de zinc es el método preferido y más frecuente, quemar el zinc o hacer retroceder el zinc fundido del área de soldadura también son opciones.

El alcance de la porosidad de la soldadura es una función de aporte de calor y tasa de solidificación del metal de soldadura. No siempre capaz de eliminarse, la porosidad afecta la resistencia a la fatiga y las tendencias de agrietamiento de las soldaduras.

3.3.1. Análisis del ciclo térmico para la soldadura por resistencia

El calor generado en la soldadura de unión por resistencia se calculó por la ecuación 2.8, para una intensidad de soldadura de 12 000 A, la resistencia de 0,0001 Ω y un tiempo de 10 segundos será de 1 440 W.

El volumen de la pepita de soldadura calculado por la ecuación 2.9 donde se tiene para un diámetro de los electrodos de 6,5 milímetros sea de 99,49 mm³.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determina por la ecuación 2.10 el calor requerido para fundir el volumen de metal, donde con un volumen de pepita de 99,49 mm³ y una unidad de energía de fusión para el metal $U_m = 10 \text{ J/mm}^3$, se requiere de 990,49 J.

El calor restante del proceso se determinó por la ecuación 2.11, para un calor generado de 1 440 J y un calor total de 990,49 J, sería de 449,51; lo que demuestra que el 31,12 % lo absorbe el metal circundante.

El porcentaje de penetración se determinó por la ecuación 2.12, luego de obtenida la unión soldada con un espesor de 1,02 milímetros, en la unión se determinó que la penetración había sido de 0,38 milímetros, esto representa un 37 % de penetración y que la pepita de soldadura resultante tiene un diámetro de 7 milímetros y un espesor de 0,64 milímetros. En la figura 3.1 se muestra como queda constituido el punto en la soldadura por resistencia.

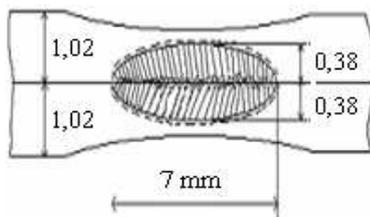


Figura 3.1. Estructura del punto de soldadura por resistencia.

De acuerdo con los parámetros establecidos en la tabla 2.3 del capítulo dos, con estos parámetros se establece el diámetro de la zona fundida como se observa en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultado del diámetro de la zona fundida

Espesor de la lámina	Electrodo	Tiempo de soldadura	Fuerza del electrodo	Corriente de soldadura	Diámetro de la zona fundida
Espesor	Diámetro	Ciclo			
mm	mm	S	MPa	A	mm
1,02	6,35	10	23	12 000	7

El ciclo térmico establecido para la soldadura por resistencia constituye en cada punto del metal base un estado térmico, definido por la máxima temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento. Esta variación de temperatura producida durante la soldadura en el punto de la pieza se describe por su ciclo térmico.

El tamaño y la forma del punto de soldadura se determinó por medio de la punta de electrodo, ya que el electrodo empleado fue de punta redonda, por lo que la pepita de soldadura resultante tiene un diámetro de 7 mm, con una zona afectada por el calor que se extiende un poco más allá de esta pepita dentro del metal base.

Para lograr la totalidad del ciclo térmico de soldadura se requirió una presión de 23 MPa y asegurar un circuito eléctrico continuo. La cantidad de corriente empleada y el tiempo están relacionados con el consumo de calor requerido para superar las pérdidas de calor y aumentar la temperatura del metal.

Esta derivación de corriente se denomina efecto Shunt y conlleva un gasto extra de energía eléctrica que se pierde a través de los puntos próximos y el riesgo de obtener puntos de soldadura de calidades diferentes según sea mayor o menor el efecto de derivación de corriente. La distancia recomendada entre puntos en la reparación de carrocerías, para que no ocurra este efecto, oscila entre 30 y 40 mm, debiendo respetar como referencia la distancia existente originalmente, planteado por Chuko y Gould (2002).

3.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura por resistencia

El análisis microestructural de la unión soldada por resistencia se realizará a partir de la macroestructura obtenida como se muestra en la figura 3.2, donde están expuestas las diferentes zonas a analizar.

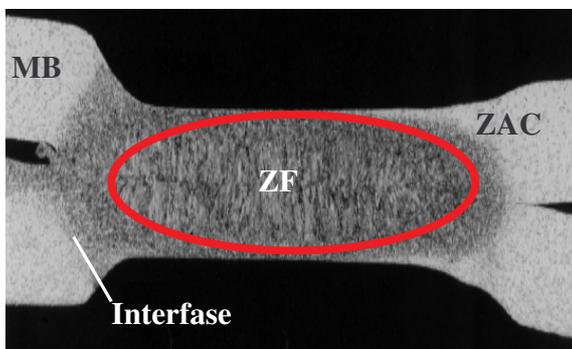


Figura 3.2. Macroestructura del punto de soldadura por resistencia.

Los cambios microestructurales y en composición química de las fases después de la soldadura dependen del pico más alto de temperatura, calor de aporte, temperatura de precalentamiento, temperatura de interfase y velocidad de enfriamiento.

Las particularidades generales de los procesos metalúrgicos de las soldaduras, la constituyen las zonas estructurales de la unión soldada. En una unión soldada se distinguen macrográficamente dos partes fundamentales como se muestra en la figura 3.2: la zona fundida, constituida por el cordón de soldadura con la región adyacente y el material base.

3.4.1. Análisis microestructural de la zona fundida

La zona fundida (ZF), formada únicamente por el material solidificado a partir del estado líquido sufre, durante la fusión, un cierto número de transformaciones que son de tipo químico, físico o estructural diferenciándose del material base por su composición química, su estructura y sus propiedades. La figura 3.3 se corresponde con la zona fundida

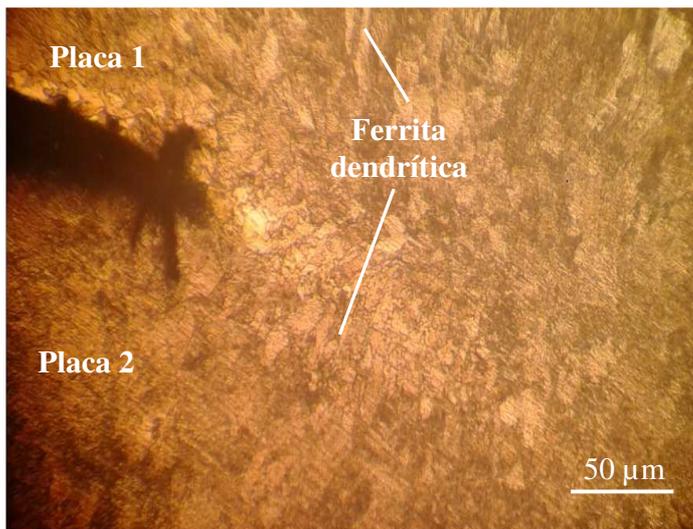


Figura 3.3. Zona fundida.

La figura 3.3 es la zona de fusión obtenida entre la placa 1 y la placa 2 durante la soldadura por resistencia del acero AISI 1006 en un espesor de 1,02 milímetros, se observa una morfología de matriz ferrítica precedida por la formación de dendritas de ferrita en el límite de grano, la ferrita es por el contenido de carbono presente en el acero (0,06 %), esta morfología resiste la transformación de la austenita durante el enfriamiento de la soldadura, puesto que se enriquecen de los elementos formadores de ferrita.

Se puede observar la pequeña separación entre la placa 1 y la placa 2 donde ambas placas, luego del proceso de soldadura se han fusionado, obteniéndose una formación de granos casi idéntica, por lo que resulta que el efecto de calor aportado y la presión han logrado la unión metalúrgica entre ambos materiales con dirección preferencial hacia donde se aplicó la presión.

3.4.2. Análisis de la microestructura en la zona afectada térmicamente

La zona afectada por el calor (ZAC/ZAT/ZIT) es la región del material base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura. En las figuras 3.4a y 3.4b se muestran los resultados microestructurales obtenidos en esta zona, obtenidos en ambas placas.

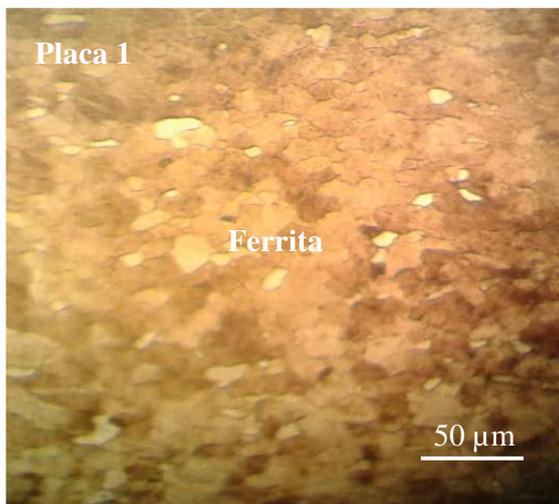


Figura 3.4a. ZAT placa 1.

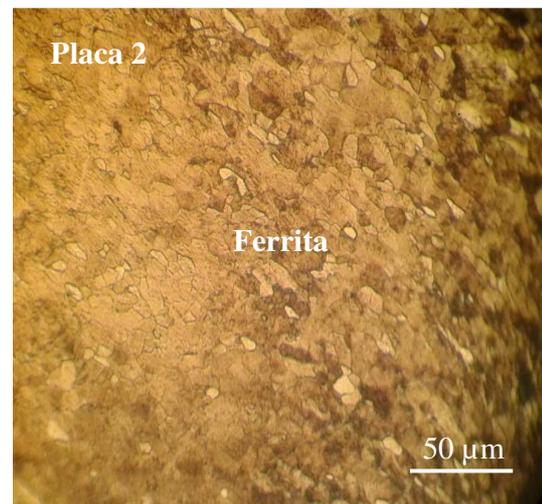


Figura 3.4b. ZAT placa 2.

Como se observa en ambas figuras 3.4a y 3.4b, que se corresponde con la zona afectada térmicamente de ambas placas, se aprecia una matriz ferrítica, pero con un tamaño de grano del número cinco. Durante el proceso de soldadura, el ciclo térmico impuesto provocó variaciones en el tamaño de los granos, no obstante los mismos mantienen una distribución equiaxial de forma ordenada. Los valores de mayor velocidad de enfriamiento corresponden al mayor calor de aporte, donde se aprecia que el aumento de temperatura de precalentamiento no tiene un efecto significativo en el grosor de la ferrita pues este tiene un comportamiento parecido al del metal base.

En la placa dos se puede observar una distribución de granos de menor tamaño que en la placa uno, presumiblemente la disminución esté asociada a la resistencia que ofrece la placa

al estar apoyada para la ejecución de la soldadura. En la parte inferior de ambas microestructura donde existe una porción de granos más pequeños es debido a que es una región de granos próxima a la zona fundida.

3.4.3. Análisis de la microestructura en la interfase

La interfase en la soldadura, es una línea donde el material base es parcialmente fundido, el cual está en contacto directo con la pileta (cordón de soldadura), donde los granos empiezan con el crecimiento epitaxial y de forma perpendicular a esta película, la cual contiene un refinamiento de grano, debido al choque térmico concedido por la temperatura propia de la soldadura. En la figura 3.5 se observa la microestructura de esta zona.

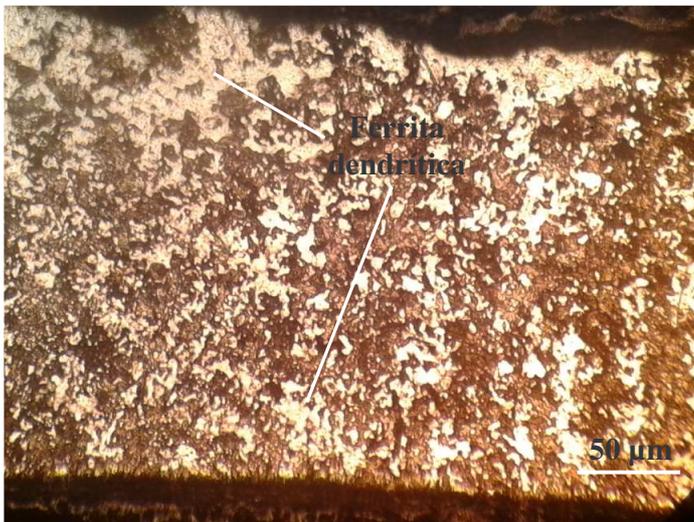


Figura 3.5. Interfase del punto de soldadura.

En la interfase del cordón de soldadura mostrado en la figuras 3.5, se ha obtenido la presencia de ferrita de granos finos en una matriz ferrítica. En esta parte de la unión soldada en la región de transición se observa por su forma y tamaño una morfología de granos pequeños número cuatro, la cual es el resultado de la dilución que se presenta entre la unión de las dos placas, previamente realizado por el calor y la presión, este tipo de morfología se encuentra presente en ambas placas de la interfase (líneas negra). Se presenta el mismo comportamiento, ya que las líneas que identifican la presencia de hierro, muestran un incremento en su porcentaje, desde el punto donde inicia la región de transición.

En las figura 3.6a, 3.6b y 3.6c se muestra el comportamiento microestructural de las diferentes zonas obtenidas en la soldadura del acero AISI 1006, pero con metal de aporte,

se ha empleado el electrodo E 7018, ya que el mismo es recomendable para la soldadura de este tipo de acero e incluso para soldar aceros de medio contenido de carbono.

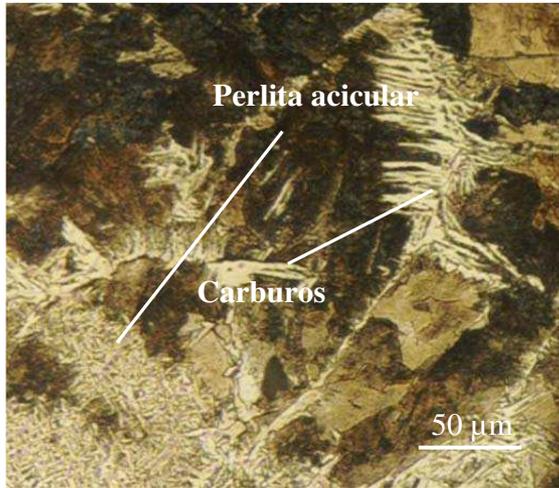


Figura 3.6a. Zona fundida

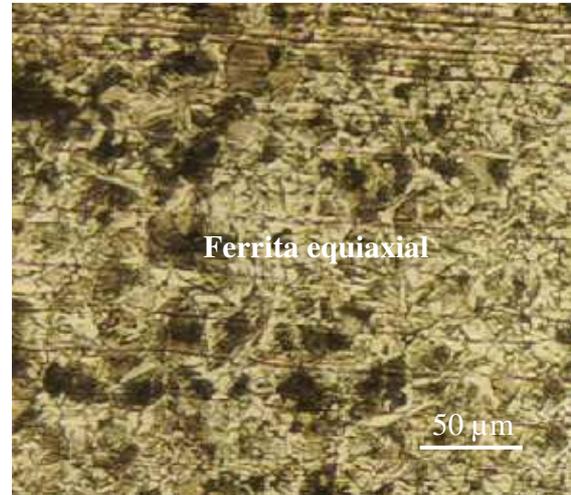


Figura 3.6b. ZAT

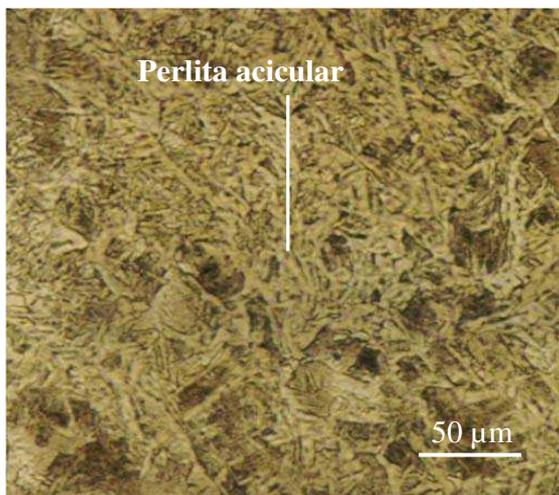


Figura 3.6c. Interfase.

Las microestructuras mostradas de las diferentes zonas del cordón de soldadura en una unión realizada por proceso manual y electrodos revestidos, muestran diferentes estructuras, la zona fundida está compuesta por perlita acicular y carburos, la zona afectada térmicamente por una estructura de ferrita equiaxial y la interfase por una estructura de perlita acicular, donde se puede plantear que de todas estas estructuras la más favorable es la de ferrita equiaxial, ya que las demás afectan la estructura soldada por presentar dureza entre 380 y 390 HV, donde se exige por la AWS que la dureza recomendada en una unión de soldadura sea no más de 350 HV.

Al establecer una comparación entre las microestructuras obtenidas por ambos procesos (soldadura por resistencia y soldadura por arco manual), se puede plantear que en proceso de soldadura del automóvil, sus agregados deben ser soldados con el primer proceso.

3.4.4. Análisis del comportamiento microestructural de la soldadura oxiacetilénica

Se realiza el análisis microestructural de las zonas afectadas de la unión realizada por el proceso de soldadura oxiacetilénica. La figura 3.7 se corresponde con la zona fundida.

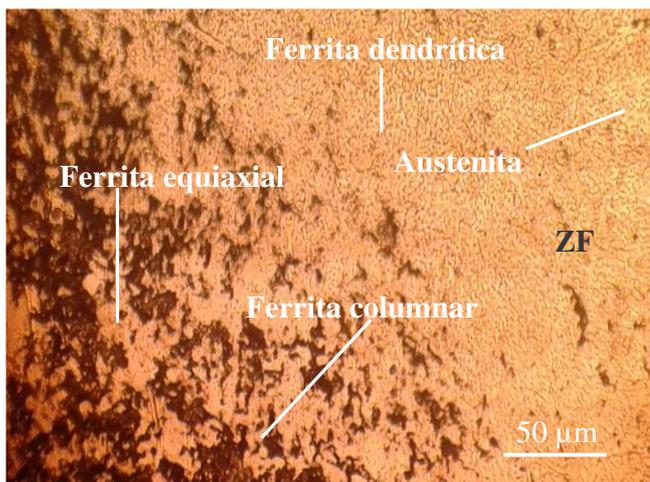


Figura 3.7. Zona fundida.

En la zona fundida se observan granos de ferrita equiaxial y granos de ferrita columnar, además de la presencia de austenita metaestable alrededor de los granos de ferrita. Se observa que la red de austenita no está muy bien formada alrededor de los granos en algunas zonas posiblemente debido a la rápida velocidad de enfriamiento. Se aprecia el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típico de la solidificación del metal.

Se ha obtenido la transformación de ferrita a ferrita de granos más finos. Se observa una microestructura más fina en el metal base, lo cual se puede explicar en términos de un proceso de recristalización forzada por un incremento en la temperatura y el posterior enfriamiento brusco de las zonas cercanas a la zona de fusión, generándose una zona de grano más fina, trae como consecuencia una diferencia en las propiedades mecánicas.

3.4.5. Análisis microestructural de la zona afectada térmicamente

La zona afectada térmicamente en la soldadura por fusión depende del proceso, del espesor del material y de la velocidad de soldadura. La figura 3.8 muestra la microestructura

obtenida en la zona afectada térmicamente de la soldadura del acero galvanizado de un milímetro.

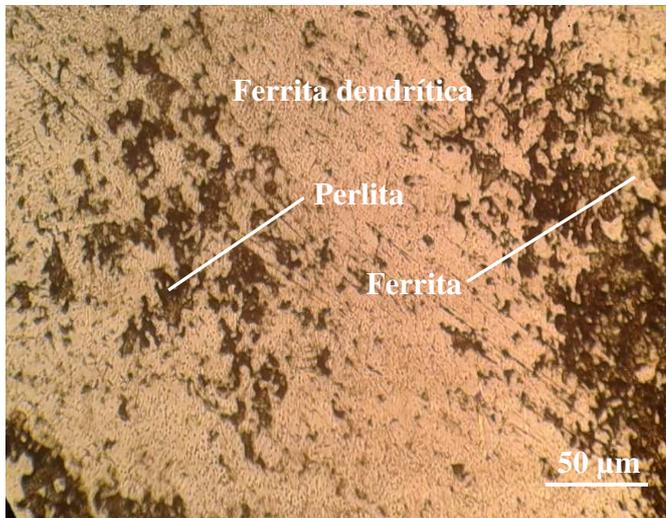


Figura 3.8. Zona afectada térmicamente

Se puede observar un tamaño de grano mayor con respecto a la zona fundida y la presencia de porciones pequeñas de ferrita y un área mayor de ferrita dendrítica. Esta estructura implica un valor de dureza ligeramente superior al que se mide para el metal base después del proceso de soldadura, por tener una buena penetración, fusión de la soldadura y presentar una superficie más uniforme.

Los granos de esta zona muestran una morfología equiaxial, un grano interlaminar pero con una morfología uniforme. En la zona del metal de aporte se detecta la formación de una estructura primaria del tipo ferrita con granos columnares (área blanca) que ingresan en el grano de la perlita (área oscura), este tipo de ferrita es de las primeras en aparecer en los límites de grano de la austenita durante la primera etapa del enfriamiento por debajo de la temperatura A3. Está se encuentra a lo largo de la junta soldada desde la línea central del cordón hasta la zona de dilución. En el interpase de la junta se logra identificar perlita de grano fino en la matriz ferrítica, el tamaño de grano de esta zona es afectado por el calor aportado durante la realización del pase de presentación, de igual manera ocurre en el pase de raíz de la junta.

3.4.6. Análisis microestructural de la zona de interfase

Se realizó el análisis microestructural en la zona de la interfase del cordón de soldadura. La figura 3.9 muestra los resultados microestructurales obtenidos.

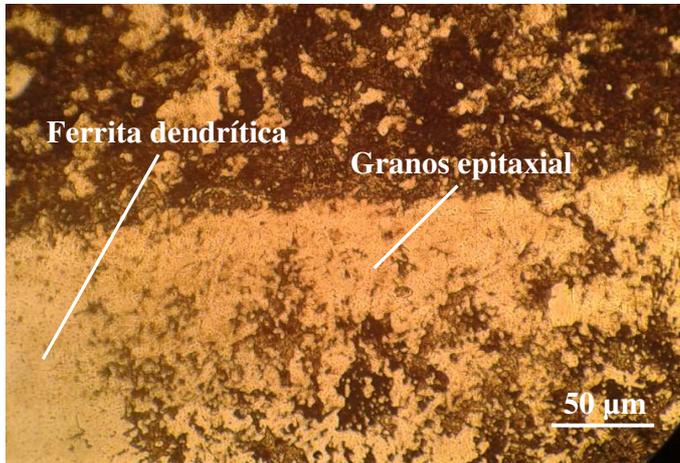


Figura 3.9. Microestructura de la interfase del cordón

La zona de dilución entre el metal de aporte y la ZAC, presenta un crecimiento de grano epitaxial que es provocado por la influencia de la zona de grano grueso (GG) de la ZAC que limita con el metal de aporte. Esta zona de grano fino (GF) se crea entre las temperaturas A1 y A3 en donde están presentes ferrita + austenita, la austenita durante el enfriamiento se descompone en granos finos de ferrita + perlita.

En el área cercana a la zona de dilución se da un tamaño de grano grueso (GG) recristalizado, provocado por un aumento de la temperatura mayor a la temperatura A3. Aquí la distribución de los granos de la ferrita y la perlita no es uniforme debido a la alta tasa de calor aportado a la junta durante el soldeo que impide una rápida difusión del carbono y un crecimiento lento de granos de austenita. Adyacente a esta primera zona se da otra de grano fino, más parecido al grano que ha sido normalizado.

La microestructura se caracteriza por la formación de un perfil de ferrita y perlita, con ferrita formando una red alrededor y en los límites de grano de la perlita (áreas oscuras) y ferrita (áreas claras alargadas) que ingresan desde el límite de grano hacia el interior de la perlita, estas características son casi constantes en el metal de aporte a lo largo del cordón.

Según los parámetros establecidos en la tabla 2.4 del capítulo 2, en la tabla 3.4 se muestra las microestructuras obtenidas en las diferentes zonas de la soldadura oxiacetilénica.

Tabla 3.4. Parámetros para la soldadura oxiacetilénica

Espesor de la lámina	Orificio de la boquilla	Presión de los gases		Flujo del acetileno	Zonas unión soldada
Espesor	Diámetro	Acetileno	Oxígeno		
mm	mm	Pa	Pa	l/min	Microestruc
1 (ZF)	6,35	0,07	0,15	0,50	F-A
1 (ZAT)	6,35	0,07	0,15	0,50	F-P
1 (interfase)	6,35	0,07	0,15	0,50	F-P

Analizando los resultados que se muestran en la tabla 3.4, se puede plantear que las microestructuras obtenidas en la junta soldada sean el resultado del calor aportado durante el proceso y por los aleantes presentes en esta zona. Si se comparan las energías determinadas en el ensayo con las energías reportadas para cada uno de los metales base en sus respectivas normas, existe similitud en las zonas analizadas, pero estas microestructuras, por el tamaño del grano, en comparación con la soldadura por resistencia, deben presentar una mayor dureza, lo cual está asociado al ciclo térmico impuesto y al metal de aporte empleado.

3.5. Análisis de la microdureza

Se realizó con el objetivo de determinar las variaciones asociadas a la geometría de la piletta ya que no se alcanza la misma deformación en todos los puntos de las zonas de soldadura. En la figura 3.10a y 3.10b, se muestra el barrido de dureza realizado en las uniones.

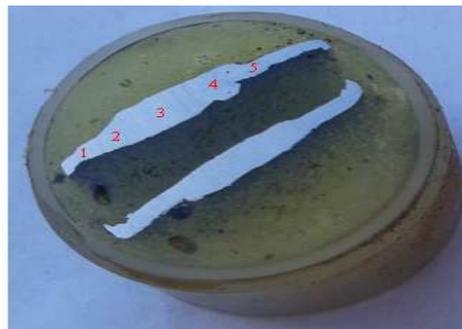


Figura 2.7a.Acero AISI 1006.

Figura 2.7b.Acero galvanizado.

Las zonas consideradas en el barrido de dureza son: el material base, la interfase del cordón y la zona fundida (tres mediciones en cada unión). Se analizará la influencia de cada ciclo térmico impuesto en las uniones soldadas.

En la tabla 3.5 se reportan los resultados de dureza obtenidos para los materiales de acuerdo al aporte térmico empleado.

Tabla 3.5. Microdureza de las uniones soldadas

Soldadura	Punto	Zonas	HV
Por resistencia AISI 1006	1	MB	190
	2	Interf	220
	3	ZAT	225
	4	ZF	220
	5	MB	190
Oxiacetilénica Galvanizado	1	MB	172
	2	Interf	235
	3	ZAT	245
	4	ZF	245
	5	MB	172

Como se observa en la tabla 3.5, para la soldadura por resistencia en el acero AISI 1006, se incrementa la dureza desde 190 HV en el material base (MB) hasta 225 HV en la zona fundida, se considera este incremento a dos factores, el primero por el calor y la presión y segundo que esta presión que ejerce la punta del electrodo sobre la presión contribuye a un proceso de deformación con el apilamiento de los granos, la temperatura permite un mayor flujo plástico para que el metal se deforme.

En la soldadura oxiacetilénica la dureza del material base es de 172 HV, se observa que es menor que la del acero AISI 1006, luego del proceso de soldadura se incrementa hasta 245 HV en la zona fundida, el ciclo térmico en este proceso es más intenso que en la soldadura por resistencia, además el material de aporte, introduce elementos en la unión soldada.

3.6. Análisis del porcentaje de penetración

Luego de realizada la unión de soldadura, la misma se colocó en la mordaza (figura 2.8) y se procedió a ejecutar la separación de ambas placas soldadas.



Figura 2.8. Procedimiento para determinar el porcentaje de penetración.

De acuerdo a las condiciones establecidas en el capítulo 2 para ejecutar la prueba de desgarre hay que plantear que se cumple la condición uno ya que el punto de soldadura se desprende de la placa en la cual se está haciendo el efecto desgarre, para quedarse unido a la placa que está sujeta con las mordazas del alicate, por lo tanto esto implica que el punto de soldadura es bueno y tiene un comportamiento dúctil.

3.7. Análisis económico

Para la realización del análisis económico tomaremos como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante la ejecución de los procesos de soldadura. En la tabla 3.6 se recoge el comportamiento de los costos.

Tabla 3.6. Costo por concepto de tiempo y consumo

Por concepto de tiempo				Por concepto de consumo					
	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo	equipos/ materiales	Consum (kW/h) /	Cant (U)	(\$/kg)	Tiemp (h)	Costo (\$)
Técnico	2,34	0,5	1,17	Galvaniz	3,146	1	4,87	-	35,09
Técnico	2,34	0,5	1,17	AISI 1006	3,16	1	4,87	-	27,30
Soldador	2,64	0,50	1,32	Fresadora	2,5	-	0,04	0,5	0,05
Soldador	2,64	0,50	1,25						
Costo total por concepto de tiempo		5,91		Costo total por concepto de consumo			52,14 \$		
Costo total				58,05					

Como se aprecia en la tabla 3.4, el gasto en el que se incurre en la preparación de las muestras para el análisis microestructural de las muestras soldadas sometidas a proceso de soldadura por resistencia y oxiacetilénica, el proceso de preparación metalográfica de las muestras es de 58,05 CUP, por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño considerando la importancia que reviste la determinación de los microconstituyentes que afectan las propiedades de estas aleaciones luego de someterse al proceso de soldadura.

3.8. Impacto ambiental

El sector automovilístico no se encuentra al margen de las políticas medioambientales. Se acepta que el vehículo a motor utiliza combustibles fósiles y es altamente contaminante. Por esta razón se está sugiriendo fuertemente en líneas estratégicas, que tienen como última finalidad, la reducción del consumo de los derivados del petróleo. Para ello el sector se



enfrenta con dos opciones, la primera es la apuesta por nuevos métodos de obtención de energía más limpias y la segunda por la reducción de contaminantes de los actuales combustibles.

Una forma de llevar a cabo esta reducción del consumo es la reducción del peso de los componentes de un automóvil. Esto justifica la investigación y aparición de nuevos materiales más ligeros y que tengan las mismas prestaciones mecánicas o superiores; así como el cumplimiento de las Directivas comunitarias respecto a la reutilización de los materiales constitutivos de los nuevos vehículos.

En todos los tipos de soldadura es esencial que el soldador se proteja de las radiaciones ultravioletas e infrarrojas invisibles y de la poderosa luz azul visible. Estas radiaciones pueden causar distintas afectaciones a la vista y otros órganos. Las enfermedades oftálmicas más comunes debido a estas radiaciones son la queratitis, la conjuntivitis y las cataratas. La queratitis es una inflamación de la córnea caracterizada por infiltración con matidez de la superficie y disminución de la transparencia.

Sus síntomas son dolor, lagrimeo, fotofobia y disminución de la visión. Se distinguen tres variedades: superficial, profunda y úlcera de córnea. Se conoce que la radiación ultravioleta emitida por el arco de soldadura puede causar numerosas y pequeñas quemaduras en la cornea y también provocar conjuntivitis, la que se presenta cuando se inflama la conjuntiva, una delicada membrana que tapiza los párpados y cubre la porción anterior del globo ocular. Sus síntomas son el enrojecimiento por inyección vascular, molestias, secreciones diversas y fotofobia, que no es más que una sensación ocular desagradable que se experimenta bajo el efecto de la luz.



3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ✓ Quedó establecido el comportamiento microestructural de las aleaciones sometidas a procesos de soldadura, el AISI 1006 por resistencia y el acero galvanizado por oxiacetilénico, donde se demostró que el proceso de soldadura por resistencia ofrece mejores ventajas que el segundo.
- ✓ Al comparar el proceso de soldadura por resistencia con el realizado por soldadura manual por arco eléctrico, se pudo comprobar que este último no es recomendable para ser empleado en la unión de las piezas del automóvil ya que se obtienen estructuras frágiles propensas al agrietamiento.
- ✓ Al determinar el porcentaje de penetración de la unión soldada por resistencia, el punto realizado no se desprende de la placa, existiendo desgarre en la misma, lo que justifica que existe buena adherencia del mismo y que se ha logrado buena propiedades metalúrgicas.



CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Durante la soldadura se estableció que el acero AISI 1006 soldado por resistencia y el acero galvanizado soldado por oxiacetilénica, la primera presenta zonas metalúrgicas compuesta por una morfología de ferrita y ferrita dendrítica y la segunda estructuras ferrita dendrítica, pero de menor tamaño que puede afectar la condición de la soldadura.
- ❖ Se determinó que, independientemente que se empleen diferentes procesos de soldadura en la carrocería, la soldadura de resistencia por puntos, a pesar que puede emplear de 5000 a 20 000 A, es más factible para ser utilizada en la soldadura de planchas del automóvil.
- ❖ Al determinar los perfiles de dureza en las uniones soldadas se determinó que por efecto del ciclo térmico, las uniones realizadas con la soldadura oxiacetilénica presenta una dureza en la zona fundida de 40 HV mayor que la zona fundida del acero soldado por resistencia.
- ❖ Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura de los aceros objeto de estudio, en el que se consideró gasto por concepto de tiempo y por concepto de consumo (mano de obra y materiales) el costo total es de 58,05 CUP.



RECOMENDACIONES

- ❖ Analizar en el proceso de soldadura por resistencia el efecto Shunt que se presenta cuando se realizan puntos de soldadura muy cercanos unos con otros y afectan la continuidad de estos puntos.
- ❖ Considerar en próxima investigación realizar la simulación por el método de los elementos finitos del proceso de soldadura por resistencia y establecer el comportamiento de las isotermas que se generan durante el ciclo térmico y la presión.
- ❖ Considerar someter a proceso de soldadura por resistencia otros materiales que se emplean en la estructura del automóvil como el acero inoxidable, donde para la unión del mismo en la estructura se emplea la soldadura por arco eléctrico.

Referencias bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre, O. Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles, Scientia et Technica Año XIII, No 34; Universidad Tecnológica de Pereira. Mayo de 2007.
2. AUTOMOTIVE, C. Pocket book of steel. Corus automotive, from, 2009. www.corusautomotive.com
3. Baik, B.; Yamada, K.; Ishikawa, T. Fatigue crack propagation analysis for welded joint subjected to bending. International Journal of Fatigue. 2011; 33:746-58.
4. Belsare, V. Rollover Analysis of Passenger Bus as per AIS-031. International Journal of Engineering, Research and Development , 4 (5). 2012.
5. Bermejo, R.; Oñoro, J.; García, R. Comportamiento a fatiga de uniones a solape simple con adhesivo epoxi de acero y acero prepintado. Revista de Metalurgia. Vol. 44 (4), Julio-Agosto. p. 310-316. 2008.
6. Bode, R.; Meurer, M.; Schaumann, T.; Warnecke, W. Galvatech. Selection and Use of Coated Advances High Strength Steels for Automotive Applications. '04 Conference Proceedings, pp. 107-118, Abril 2004, Chicago, EUA.
7. Boher, C.; Le Roux, S.; Penazzi, L.; Dessain, C. Experimental investigation of the tribological behavior and wear mechanisms of tool steel grades in hot stamping of a high-strength boron steel. Wear, 294–295(0), 286-295, 2012.
8. Burgos, J. Teoría de los procesos de Soldadura. Conferencias para la Maestría de Ingeniería Mecánica. CIS. Facultad de Mecánica. UCLV. 1995. 240 p.
9. Blackman, B.; Kinloch, A.; Rodríguez-Sánchez, F.; Teo, W.; Williams, J. The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing. Engineering Fracture Mechanics, Volume 76, Issue 18. Pages 2868-2889. December 2009.
10. Blackman, B.; Kinloch, A.; Rodríguez-Sánchez, F.; Teo, W.; Williams, J. The fracture behaviour of adhesively-bonded composite joints: Effects of rate of test and mode of loading. International Journal of Solids and Structures, Volume 49, Issue 13. Pages 1434-1452, 2012.
11. Bloem, C.; Amigó, V.; Salvador, M. Comportamiento a fatiga de uniones soldadas GMAW de la Aleación de Aluminio AA 7020. Revista de Metalurgia, 43 (2), 111-116, 2007.
12. Campestrini, M.; Mock, P. European Vehicle Market Statistics, 2011, from <http://www.theicct.org/european-vehicle-market-statistics>



13. Cárcel, A.; Ferrer, C.; Pérez, M. Mecanismos de fricción en la estampación de chapas electrocincadas para automóviles. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2004.
14. Cooman, B.; Chin, K.; Kim, J. High Mn TWIP Steels for Automotive Applications New Trends and Developments in Automotive System Engineering. 2011.
15. Chao, Y. Ultimate strength and failure mechanism of resistance spot weld subjected to tensile. Shear or combined tensile/shear loads. Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 125, pp. 125-132, Abril 2003, EUA.
16. Chuko, W.; Gould, J. Development of Appropriate Resistance Spot Welding Practice for Transformation Hardened Steels. Welding Journal, pp. 1s-7s, Junio 2002, EUA.
17. Crolla, D. Automotive Engineering powertrain, chassis system and vehicle body. E.U.A., Elsevier. 2009.
18. Christensen, J. Towards the lightweighting of low carbon vehicle architectures using topology optimization. Europe Altair Technology Conference. 2011.
19. Christensen, J. Development of Front End Crash Structure for Lightweight Hybrid Electric Vehicle. Global Journal of Researchers in Engineering - Automotive Engineering. 2012.
20. Davies, G. Materials for consideration and use in automotive body structures. In G. Davies (Ed.), Materials for Automobile Bodies (pp. 93-143). Oxford: Butterworth-Heinemann. Chapter 3. 2012.
21. Dionne, G.; Botton, F. Influence of Substrate Characteristics on the Inhibition Layer Breakdown and Galvannealing Kinetics, Goodwin, 44th Mechanical Working and Steel Processing, Conference Proceedings, Vol XL, pp 405-415, 2002, EUA.
22. Dubois, P. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection. USA: American Iron and Steel Institute. 2004.
23. Engl, B.; Drewes, E. Technology of continuously annealed cold-rolled sheet steels. Ed. Pradhan, Warrendale Proc. Symp. EE.UU. The Metallurgical Society of AIME, 1984, p. 123-138.
24. Ferrasse, S.; Verrier, P. Resistance Spot Weldability of High Strength Steels for Use in Car Industry. Meesemaeker, Welding in the world, 1998.
25. Font, J. Tratado sobre automóviles Tomo 1 Tecnología del automóvil. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia. 2004.



26. Fu, G.; Tian, F.; Wang, H. Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al–Zn–Mg alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 180 (1-3), 216-220, 2006.
27. Fuchs, M.; Riedel, F. Sistema de tratamiento electrolítico para aguas residuales con contenido de metales, GTW, 1995.
28. Griňak, I. Soldabilidad de los aceros. Moscú. Ed. Mir. 1984
29. Guerra, I. Diseño y construcción de una máquina tipo pinza para soldar por puntos resistencia: se diseña y se construye un equipo para soldadura por puntos por resistencia. Escuela politécnica nacional. Quito, 1993.
30. Hesling, S.; Hochstetter, K.; Voss, G.; Wallace, G. Integration of Coating Mass Control with Bath and Galvanneal Furnace Management. 93th Galvanizers Association Conference Proceedings, pp 1-19, Septiembre 2001, Portland, EUA.
31. Hong, S.; Jun, H.; Kang, K.; Park, C. Evolution on precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating. Department of Materials Science and Engineering and Center for Advanced Aerospace Materials, Technical Research Laboratories, Scripta Materialia # 48, 1201-1206, 2002, Corea del Sur.
32. Huang, X.; Xie, M. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. 2010.
33. Ignoto, V. Soldadura para Ingenieros. C.V.S. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, 2001. U.C.V.
34. Kaiser, J.; Dunn, G.; Eagar, T. The effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding. *Welding Research Supplement*, pp. 167s- 173s, Junio 1982, EUA.
35. Kalpakjian, S.; Schmid, S. *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (5 ed.). Pearson Education. 2008.
36. Kubotera, H.; Nakaoka, K.; Araki, K.; Watanabe, K.; Nishimoto, A.; Iwase K. *Trans. ISIJ*. 1977; **17**: 663.
37. Kuk, J.; Jang, K.; Lee, D.; Kim, I. Effects of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 1408-1414, 2004.
38. Kim, H.; Han, S.; Yan, Q.; Altan, T. Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS). *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57 (1), 299-304, 2008.



39. Krupitzer, D. Designing and Manufacturing Vehicles with Advanced Strength Steels. Galvatech '04 Conference Proceedings, pp. 31-50, Abril 2004, Chicago, EUA.
40. Lin, Y.; Nian, H. Structural Design Optimization of the Body Section Using Finite Element Method. Automotive Research & Testing Center, Taiwan. 2006.
41. Manokruang, S. Methodology of bus-body structural redesign for lightweight productivity improvement. Tailandia, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Press. 2009.
42. Martínez-Conesa, E.; Segura, J.; Quiles, F. Eguia, V.; Valcuende, M. Optimización de la zona afectada térmicamente con la aplicación de la metodología de superficie de respuesta. XVI congreso de ingeniería de proyectos. 2012 .Valencia - España. CSIC Revista de Metalurgia, 48-5 (2012): 333-350.
43. Meza, S. Soldabilidad de aceros HSLA termo galvanizados para aplicaciones automotrices. Tesis de Maestría, FIME-UANL, 2004, México.
44. Okamoto, A.; Takahashi, M. ICOTOM 6 Proc. 6th Int. Conf. on Textures of Materials. Tokio (Japón): The Iron and Steel Institute of Japan, 2, 739-748, 1981.
45. Pakandam, F.; Varvani, A. Fatigue damage assessment of various welded joints under uniaxial loading based on energy methods. International Journal of Fatigue. 2011; 33:519-28. ISSN 0142-1123.
46. Pástor, M. Introducción a la metalurgia de la soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56.
47. Pyttel, B.; Grawenhof, P.; Berger, C. Application of different concepts for fatigue design of welded joints in rotating components in mechanical engineering. International Journal of Fatigue. 2012; 34:35-46.
48. Pfeifer, T.; Gawrysiuk, W. Technology for automated MIG-welding of high-strength aluminium alloys and the properties of the welded joints. Welding International, 20 (7), 509-515, 2006.
49. Renault, A. Evaluación de la calidad del proceso de soldadura por resistencia eléctrica para la unión de carrocería de un automóvil de la planta ensambladora de vehículos M.M.C. Automotriz S.A. Tesis de Grado. Departamento de Ingeniería Mecánica. UDO - Anzoátegui. (2007).
50. Rojas, M. Daño por hidrógeno en acero galvanizado, Tesis de Grado. Caracas (Venezuela): Universidad Simón Bolívar, 2007.



51. Rossini, N.; Dassisti, M.; Benyounis, K.; Olabi, A. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design* (35), 572-588, 2012.
52. Skillingberg, M.; Green, J. Aluminum applications in the rail industry. *Light Metal Age*. 2007.
53. Sturla, A.; Castellano, E. *Metalografía microscópica: guía práctica de metalografía microscópica y macrografía*. Buenos Aires: Alsina. 1951. 278 pp.
54. Takahashi, M. Development of high strength steels for automobiles. *Steel Research Laboratories, Nippon Steel Technical Report No.87, 88*, pp. 2-7, Julio 2003, Japón.
55. Torres, J. Evolución microestructural de la aleación de aluminio 6061 durante el proceso de soldadura MIG. *Ingeniería y Desarrollo* (12), 52-65, 2002.
56. Valencia, A. El diseño y modelamiento de materiales, *Dyna*, Vol. 75, No. 156, Nov. 2008, p. 151.
57. Witik, R.; Payet, A.; Michaud, J.; Ludwig, V.; Manson, J. Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1694-1709, 2011.
58. Zander, J.; Sandström, R. Modelling technological properties of commercial wrought aluminium alloys. *Material & Design*, 3752-3759, 2009.
59. Zuñiga, C.; Fosca, C. Modelización del ciclo térmico de la soldadura multifase por arco. Departamento de ingeniería Universidad catolica de Peru. 2005