

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Análisis de la soldabilidad en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado para componentes estructurales de alta resistencia de carrocerías.**

**Por**

**Jorge Iván Martínez González**

**REPORTE DE PROYECTO**

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

**Saltillo, Coahuila, México a 29 de junio del 2019**



**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**Análisis de la soldabilidad en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado para componentes estructurales de alta resistencia de carrocerías.**

**POR**

**Jorge Iván Martínez González**

**REPORTE DE PROYECTO**

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

**Saltillo Coahuila, México a 29 de junio del 2019**



**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que el reporte de proyecto “**Análisis de la soldabilidad en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado para componentes estructurales de alta resistencia de carrocería**”, realizado por el alumno (a) **Jorge Iván Martínez González**, con número de matrícula **18ES-241** sea aceptado para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dr. José Jorge Ruíz Mondragón**  
Tutor Académico

---

**Ing. Armando Garza**  
**Sánchez**  
Tutor en Planta

---

**Dra. Rocío Saldaña**  
**Garces**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**Dr. Pedro Pérez Villanueva**  
Coordinador de Posgrado



**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **Jorge Iván Martínez González**, una vez leída y revisada el reporte de proyecto titulado “**Análisis de la soldabilidad en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado para componentes estructurales de alta resistencia de carrocerías**”, aceptamos que el referido reporte de proyecto revisado y corregido, sea presentado por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa del reporte de proyecto correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente al 29 de junio del 2019.

---

**Dr. Jesús Emilio**  
**Camporredondo Saucedo**  
Presidente

---

**Dra. Rita Muñoz Arroyo**  
Secretario

---

**Dr. José Jorge Ruíz Mondragón**  
Vocal



# Dedicatoria

A mis padres José Alfredo Martínez Ortiz y Rosa María González Acosta por haberme brindado la vida y todo el tiempo invertido en mi persona que fortalece mi corazón y mi mente para seguir adelante y reconocer que la disciplina y el trabajo duro es el único camino hacia el éxito, Dios me los guarde muchos años más.

A mi esposa Sandi Nallely Malacara Reyes, ya que durante un año y medio fue el pilar fundamental para que esto sucediera, su apoyo, sus cuidados, su comprensión y todo su amor, fue el “motor” de esta gran obra. Gracias.

A mis hermanos por siempre creer en mí y recordarme que los límites se encuentran en nuestra mente.

Y a la vida por haberme puesto durante esta formación a gente y amigos que me brindaron su amistad, confianza y compañía.



# Agradecimientos

Agradezco a los doctores José Jorge Ruiz Mondragón y a la doctora Rocío Saldaña Garcés, por haberme brindado sus consejos, confianza y conocimientos durante todo el proceso para mi formación como especialista en tecnologías de la soldadura.

A mis compañeros de COMIMSA que siempre estuvieron presentes para apoyarme en situaciones difíciles durante las clases y exámenes.

A la corporación Mexicana de Investigación de Materiales S.A de C.V (COMIMSA), por otorgarme la oportunidad de ser estudiante de medio tiempo y a todo su personal capacitado.

Y una mención a la empresa Magna CIMS, por el apoyo económico para tomar esta especialidad en soldadura y al ingeniero Armando Garza S. oportunidad y confianza para llevar a cabo este proyecto.

# Índice

SINTESIS .....	1
1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivo general y específicos .....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Justificación del proyecto.....	3
1.4 Planteamiento del problema .....	4
1.5 Hipótesis .....	5
1.6 Aportación (científica, tecnológica e industrial).....	5
1.7 Alcance y delimitaciones.....	6
2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 MARCO TEÓRICO .....	7
2.1.1 Importancia de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) en la industria automotriz.....	7
2.1.2 Uso y aplicaciones en la industria automotriz de los AHSS. ....	8
2.1.3 Propiedades de los AHSS.....	12
2.1.4 Metalurgia de los aceros AHSS martensíticos .....	15
2.1.5 Aceros microaleados.....	16
Efectos del boro en los aceros.....	17
2.1.6 Proceso de la soldadura: GMAW .....	18
Soldadura GMAW.....	18
Principios de operación (GMAW).....	20
Variables de proceso .....	26
2.1.7 Tipo y geometría de la junta de soldadura. ....	27
Partes de la junta de soldadura a tope. ....	27
2.1.8 Difusividad térmica. ....	28
2.1.9 Fractografía.....	31
Tipos de fracturas: Dúctil y frágil.....	31

Definición de fractografía .....	33
Patrones y mecanismos de fractura en metales .....	34
2.2 ESTADO DEL ARTE.....	38
3. CAPITULO 3: METODOLOGIA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Material base .....	47
3.2 Pruebas de soldabilidad.....	50
3.3 Material utilizado .....	51
3.4 Equipo utilizado .....	53
3.5 Diseño y dimensiones de la junta .....	53
3.6 Resumen y parámetros de soldadura.....	54
3.7 Calor de entrada y efecto en las muestras. ....	56
4. CAPITULO 4: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	57
4.1 Macrografías.....	57
4.2 Prueba de dobléz.....	59
4.3 Ensayo de tensión. ....	61
4.4 Fractografía .....	65
4.5 Metalografía.....	71
CONCLUSIONES .....	79
BIBLIOGRAFIA.....	81

# SÍNTESIS

Actualmente la parte estructural del chasis (carrocerías) se fabrica de una sola pieza lo que trae la generación de grandes volúmenes de desperdicio. La presente investigación tiene como objetivo el estudio de la soldabilidad en aceros avanzados al boro usados en la carrocería de vehículos actuales por medio de un proceso de soldadura convencional como el GMAW robotizado pero empleando un modo de transferencia STT (surface tensile transfer, por sus siglas en inglés) a fin de poder generar este tipo de componentes de forma modular.

En este tipo de acero (martensítico M1300) son susceptibles a obtener fases con alta resistencia a la tracción como la bainita y martensita posterior a tratamientos térmicos. Durante la soldadura, el calor que aporta este tipo de proceso se vuelve un tema de interés, ya que se promueve la formación de fases frágiles no deseadas.

El uso de nuevas tecnologías dentro del proceso GMAW abre la posibilidad de obtener una baja entrada de calor en la cual se presenten fases bainíticas que pueden emular las propiedades mecánicas del metal base.

Dentro del estudio de soldabilidad a nivel laboratorio se realizaron ensayos destructivos y no destructivos. Se encontró que si es posible soldarlos y el mejor resultado fue a una entrada de calor por debajo de los 0.2 kJ/mm donde se presentan fases como bainita que logra emular el comportamiento mecánico del metal base.

# CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El desarrollo del reporte de proyecto proviene de la diversidad de los materiales implementados en el diseño y fabricación de las carrocerías de los automóviles, ya que la industria automotriz se encuentra en una etapa en la cual se hace énfasis al desarrollo de materiales que puedan optimizar el rendimiento, reducir el consumo de combustibles fósiles y al mismo tiempo que no comprometa la seguridad de los usuarios.

“Las carrocerías de los vehículos son un conjunto grande de componentes de chapa metálica (estampado)” [1], con esto se indica que el componente con mayor volumen que conforma un automóvil es la carrocería.

Existen ciertos requisitos a nivel básico que influyen directamente en el rendimiento y calidad de una carrocería, entre ellos rigidez estructural, durabilidad, seguridad, resistencia al choque, resistencia a la vibración (ruido) y dureza.

La carrocería se convierte en una estructura compleja la cual desempeña múltiples tareas simultáneamente bajo estrictos requerimientos estéticos,

funcionales y económicos. El presente proyecto desarrolla una metodología a seguir para la fabricación de pilares de la carrocería de forma modular y ensamblados mediante el proceso de soldadura por arco de metal y gas (GMAW, por sus siglas en inglés).

## **1.2 Objetivo general y específicos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Analizar la soldabilidad para obtener uniones de buena calidad aplicables en la fabricación de componentes del chasis con aceros de alta resistencia al boro (martensítico M1300) como los pilares y barras anti choque, mediante la implementación de nuevas tecnologías del proceso de soldadura GMAW.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar revisión bibliográfica de las aplicaciones y especificaciones que tienen los aceros avanzados de alta resistencia dentro de la industria automotriz.
- Realizar uniones de láminas de acero martensítico M1300 mediante proceso GMAW-robotizado considerando los parámetros obtenidos de la revisión bibliográfica y en planta.
- Caracterizar por medio de ensayos destructivos y no destructivos el material base y material pos soldadura.
- Analizar la afectación que presenta el material pos soldadura en sus propiedades mecánicas y microestructurales.

## **1.3 Justificación del proyecto**

La industria automotriz cada día tiene más retos para permanecer de manera competitiva, para ello tiene que optimizar sus procesos y productos al máximo.

El uso de aceros avanzados AHSS en aplicaciones estructurales ha traído consigo el incremento del rendimiento energético.

Los componentes estructurales de las cabinas son fabricados de una sola pieza lo cual genera desperdicio a la hora de conformar piezas, por consiguiente, incrementa su costo considerablemente.

El presente proyecto considera el desarrollo de pruebas de soldabilidad en los aceros martensíticos M1300, al realizar uniones de soldadura en cupones con diferentes parámetros y condiciones, por ejemplo: mezcla de gases, tipo de material de aporte, voltaje, corriente y velocidad de avance. Con el objetivo de poder evaluar la posibilidad de realizar los componentes estructurales en secciones ensambladas por soldadura.

## **1.4 Planteamiento del problema**

La industria automotriz ha crecido mucho los últimos años y se ha enfocado en gran medida a fortalecer los sistemas de seguridad que ofrece la parte estructural de los autos.

Actualmente la industria automotriz produce en su mayoría carrocerías del tipo “Monocasco”, el cual es una integración de un marco estructural y el cuerpo exterior conformado por un conjunto de chapas metálicas (láminas) unidas por métodos de soldadura. Este tipo de carrocerías le brinda la eficiencia necesaria para cumplir las exigencias de los fabricantes y consumidores.

La carrocería fabricada por chapa metálica formada por medio de proceso de laminación y estampado, llega a usar diferentes tipos de aceros para determinar su aspecto y funcionalidad. El uso de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) en este tipo de carrocerías, brinda

propiedades como rigidez y fuerza, pero el fabricar piezas muy grandes de un solo estampado involucra un fuerte desperdicio de materia prima.

Por lo cual este proyecto centra su atención en poder realizar uniones soldadas en aceros AHSS tipo martensítico M1300, a fin de crear piezas automotrices en segmentos. Al poder crear una unión con buenas propiedades y calidad, implicaría una reducción de desperdicio de materia prima. El acabado superficial de esta estructura no representa un gran problema, por lo cual la problemática radica en los efectos que muestra el material en las zonas de unión.

### **1.5 Hipótesis**

La elaboración de uniones soldadas en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado, son aptas para cumplir requerimientos de componentes estructurales dentro de una carrocería.

### **1.6 Aportación (tecnológica e industrial)**

La aportación que presenta este proyecto es realizar una investigación y experimentación con aceros al boro M1300, que permita implementar nuevas tecnologías dentro del proceso de soldadura GMAW en la fabricación de elementos estructurales de las carrocerías.

Lo cual beneficiaría la reducción del consumo de combustible y la fabricación de los componentes estructurales a menor costo sin comprometer la seguridad de los pasajeros, ya que la carrocería es el subsistema más grande en el ensamble de un automóvil de pasajeros.

## **1.7 Alcance y delimitaciones**

### **Alcances:**

1. Realizar una búsqueda bibliográfica de las características y propiedades mecánicas de los aceros avanzados al boro.
2. Conocer los beneficios del uso de nuevas tecnologías de soldadura GMAW que proponen los fabricantes.
3. Analizar la afectación que presentan los aceros avanzados al boro al ser soldados por medio de las nuevas tecnologías de GMAW.

### **Delimitaciones:**

- 1 El caso de estudio solo considera el proceso GMAW aplicado en aceros M1300.
2. Los rangos y parámetros de soldadura serán definidos en base a recomendación del fabricante.
3. El caso de estudio solo considera probetas (cupones de 50 x 100 mm con espesor de 2.0 mm) y no productos terminados.
4. No se considera realizar algún conformado (estampado) posterior a la soldadura.

# **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se revisan diferentes fuentes bibliográficas y artículos, con el objetivo de conocer las aplicaciones y especificaciones que tienen los aceros avanzados al boro dentro de la industria automotriz, así como sus propiedades mecánicas y microestructurales, por medio de ensayos destructivos y no destructivos.

Otro de los temas principales de este capítulo toma las generalidades del proceso de soldadura GMAW, como: principios de operación, variables de proceso, tipos de transferencia y las nuevas tecnologías desarrolladas por los fabricantes.

## **2.1 MARCO TEÓRICO**

### **2.1.1 Importancia de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) en la industria automotriz.**

Durante los últimos años, la industria automotriz se ha esforzado para tomar medidas que involucren más cuidado al medio ambiente. Las empresas de la

industria automotriz han apostado sus recursos económicos a nivel investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías que sean más amigables con el medio ambiente.

La reducción del consumo de combustibles fósiles es uno de los puntos de mayor inversión como una solución para reducir o mitigar el daño que realiza ambientalmente la industria automotriz. Para esto el desarrollo de nuevas energías (energías verdes) y la reducción del peso de las carrocerías de un automóvil, ha conducido al desarrollo de nuevos materiales más ligeros sin comprometer las propiedades mecánicas.

Para llevar a cabo esta reducción de peso en aceros, son disminuidos los espesores usados en los diferentes componentes del automóvil. Lo cual es posible gracias a los aceros AHSS. Estos se definen como una gama de metales con límites elásticos mayores a los 550 MPa y esfuerzos de tensión mayores a 700 MPa, respecto a sus propiedades mecánicas muestran una considerable ventaja con respecto a los aceros convencionales HSS.

Esto se debe a que los HSS tienen estructuras monofásicas, mientras que los avanzados cuentan con mezcla de múltiples fases como: ferrita, martensita, bainita y/o austenita retenida.

### **2.1.2 Uso y aplicaciones en la industria automotriz de los AHSS.**

El cuerpo del automóvil es una estructura compleja que desempeña simultáneamente múltiples funciones bajo requerimientos estéticos y económicos. Los requisitos que deben de cumplir estos elementos comprenden desde un simple accesorio, el tren motriz, suspensión y elementos que puedan soportar impactos generados en accidentes y choques.

“La carrocería del vehículo de pasajeros es un conjunto grande de componentes de chapa estampada. Cada componente puede servir una variedad de requisitos estructurales y funcionales específicos. Como resultado, la geometría, el tipo de material y el grado de los componentes varían significativamente” [1].

Si bien toda la estructura del cuerpo debe cumplir estos requisitos, en un nivel básico los muchos componentes individuales se pueden categorizar en dos clases [1]:

- Partes que reaccionan a cargas con deformación mínima
- Partes que reaccionan a cargas con una deformación significativa, para cumplir ciertos requisitos.

Estos requisitos mencionados se pueden entender en otras palabras como: La rigidez, por su definición es la resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de una fuerza exterior que actúan sobre su superficie en función de su módulo de elasticidad. La deformación significativa; depende de las fuerzas y la energía, que en otras palabras son características de absorción de la estructura.

Los componentes dominados por la fuerza pueden ser necesarios para apoyar una carga significativa con un nivel controlado de deformación de la estructura. Otro punto importante es que los componentes pueden requerir un alto nivel de absorción de energía para muy poca deformación. Para estos componentes dominados por la fuerza hay una ventaja obvia de aplicar materiales de mayor resistencia, como AHSS [1].

El módulo de elasticidad de los aceros es constante (el cual no varía), con esto se puede decir que la geometría de una pieza en la carrocería se convierte en un parámetro primario. El sustituir un acero por otro con más resistencia, por ejemplo, los AHSS no mejoran considerablemente la rigidez sin embargo, la

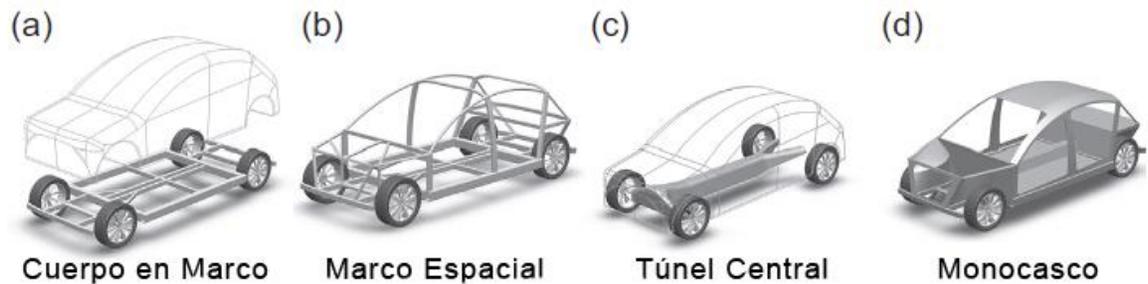
formabilidad que tiene este tipo de acero permite generar o proporcionar geometrías que mejoran la rigidez de los componentes, por consiguiente la reducción de espesores (calibres) y peso total de la carrocería.

### **Tipos de chasis:**

En la Figura 2.1 se muestra los tipos de chasis que son manejados dentro de la industria automotriz que han ido cambiando con el paso de los años, y se resalta la importancia de este elemento. La diferencia en estos tipos de chasis se ve analizada a principios de la etapa de diseño para cumplir con dicho propósito.

- a) Cuerpo en marco.-** La estructura de la parte superior del cuerpo está separada de un marco inferior. Este marco consiste en una serie de vigas que forman una estructura tipo escalera. Este tipo de cuerpos son los principales portadores de las cargas. Su uso es muy limitado en la actualidad.
- b) Marco espacial.-** La estructura es una red tridimensional de elementos unidos. Este tipo de cuerpo brinda la distribución de cargas y suele ser ligero. La complejidad de los procesos de fabricación limita la producción a un número pequeño de vehículos.
- c) Túnel central.-** Principalmente formado por un miembro estructural situado a lo largo del eje simétrico del vehículo. Este túnel tiene varios puntos de carga distribuidos. Una de las desventajas que posee es que limita el espacio para los pasajeros.
- d) Monocasco.-** Es una construcción del cuerpo exterior del vehículo y el marco estructural. Este tipo de cuerpo es el más común. Consiste en una pared delgada de paneles o láminas que forman el diseño exterior, unida o soldada a una estructura de vigas o elementos estructurales encargadas de soportar las cargas de deformación. En este tipo de cuerpos la forma del vehículo dictamina la eficiencia, es posible con la ayuda de procesos de estampado y soldadura robotizada, que da como resultado un diseño estético y con un cumplimiento de requerimientos de calidad y seguridad,

por lo cual, este tipo de carrocerías ha orillado al desarrollo de nuevos materiales por ejemplo los AHSS.



**Figura 2.1 Tipos de Chasis [1].**

### **Elementos del cuerpo de un automóvil.-**

“El cuerpo típico del vehículo de pasajeros constituye aproximadamente el 20% de la masa total, sin embargo, es el subsistema físico más grande” [1].

El cuerpo en blanco (BIW: Body in White) es el subconjunto principal del cuerpo del vehículo y se denomina chasis. Las carrocerías de los automóviles tienen dos características de seguridad:

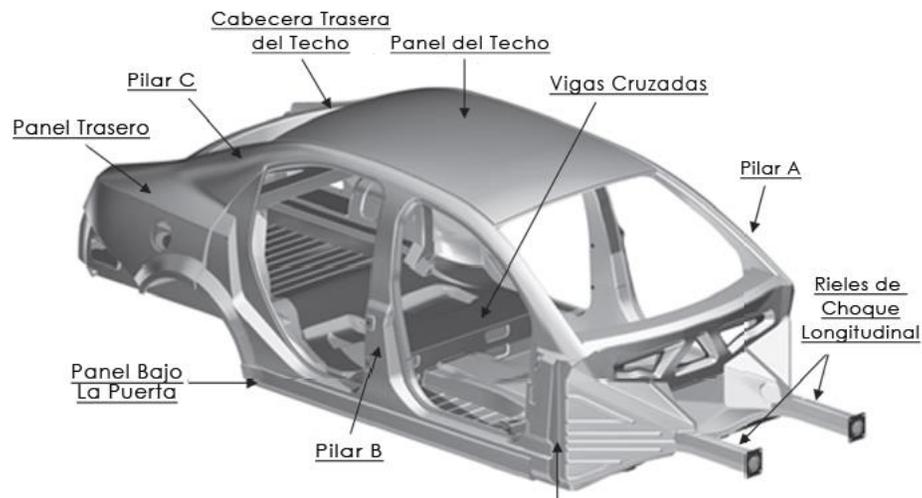
1. Impenetrable.- Celda de seguridad o compartimiento del ocupante, esta celda debe soportar cargas extremadamente altas con una deformación mínima.
2. Zona de deformación.- Esta zona esta optimizada para colapsar de manera controlada absorbiendo la máxima cantidad de energía posible generada por un impacto.

Este desarrollo de piezas se ha determinado por un gran número de pruebas de choque y continuamente se introducen nuevos estándares para dar una garantía de seguridad de los ocupantes dentro de los vehículos.

Para el diseño de cuerpo tipo “monocasco”, en la Figura 2.2 se muestra la estructura primaria que consiste típicamente en: miembros de piso longitudinales y laterales, un marco tridimensional, a este subsistema se le

llama: celda de seguridad. La celda de seguridad mencionada consiste en la unión de pilares (A, B, C/D), vigas del techo, vigas laterales, juntas de soporte y paneles de techo.

Los paneles exteriores del cuerpo requieren altos niveles de rigidez y resistencia a las abolladuras. Su superficie y geometría suele ser compleja, por lo cual requieren propiedades de alta formabilidad.



**Figura 2.2 Partes del Chasis [1].**

Los elementos estructurales en las celdas de seguridad requieren una resistencia elevada y baja deformación, mientras que en las zonas de impacto experimentan una deformación que permite absorber la energía generada por un choque.

### 2.1.3 Propiedades de los AHSS

En la industria de la fabricación de automóviles el desarrollo de nuevos materiales que cumplen las demandas de seguridad, calidad y reducción de peso, se ha vuelto uno de los objetivos más importantes.

“Dos factores importantes han estado impulsando el desarrollo de nuevos productos de acero para la industria automotriz. El primero es el deseo de una mayor economía de combustible, que además de diseño, se controle en gran parte por el espesor del acero. A fin de abordar el aspecto de reducir el calibre del material, se necesitan productos con resistencia más alta, mejor ductilidad y conformabilidad. El segundo se enfoca en el rendimiento y la seguridad, el factor principal es la capacidad del acero para una mayor absorción de energía, para este aspecto los aumentos en elongaciones totales y en particular con elongaciones uniformes, son importantes para implementarse en este tipo de manufactura automotriz” [1].

De esta manera los AHSS, son una buena opción para cumplir las expectativas de la industria automotriz, este proyecto hace énfasis en la implementación de nuevas tecnologías del proceso de soldadura GMAW, para realizar uniones con una calidad de soldabilidad con la mínima generación de defectos y condiciones indeseables como: baja dureza, fragilidad en la unión, una zona afectada por el calor grande y/o falta de fusión.

“Los aceros AHSS son clasificados en tres diferentes generaciones, la primera generación basada principalmente en aceros con una base de ferrita en su microestructura; se incluyen los aceros doble fase, de plasticidad inducida por transformación, fase compleja y martensíticos (DP, TRIP, CP y M; por sus siglas en inglés respectivamente). Una segunda clasificación son los aceros austeníticos con un alto contenido de manganeso y algunos con agregados de aluminio. Una tercera categoría se centra en el último avance de estos aceros, la tercera generación, son aceros con combinaciones de esfuerzo y ductilidad de propiedades muy por encima de la primera generación de AHSS. Esta generación pudiera ser producida por varias combinaciones de martensita con austenita estable. Un ejemplo de esta generación son los aceros de plasticidad inducida por maclaje (TWIP, por sus siglas en inglés)” [1].

Se debe señalar la diferencia que existe entre los aceros de alta resistencia y los aceros avanzados de alta resistencia, llamados de nueva generación.

“La diferencia fundamental entre los grados de aceros convencionales (HSS) y los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) es ciertamente su microestructura: los aceros HSS son monofásicos, con una matriz ferrítica; en cambio los aceros AHSS son aceros multifase que contienen ferrita residual, martensita, bainita y /o austenita retenida, en cantidades y proporciones adecuadas para obtener las características mecánicas deseadas” [1].

Gracias a estas propiedades, esta generación de aceros se ha vuelto una de las preferidas para los fabricantes de los automóviles y más a menudo se incorporan a la producción. En la Figura 2.3 se presenta una imagen de la clasificación de los aceros en base a su esfuerzo máximo de tensión y porcentaje de elongación.

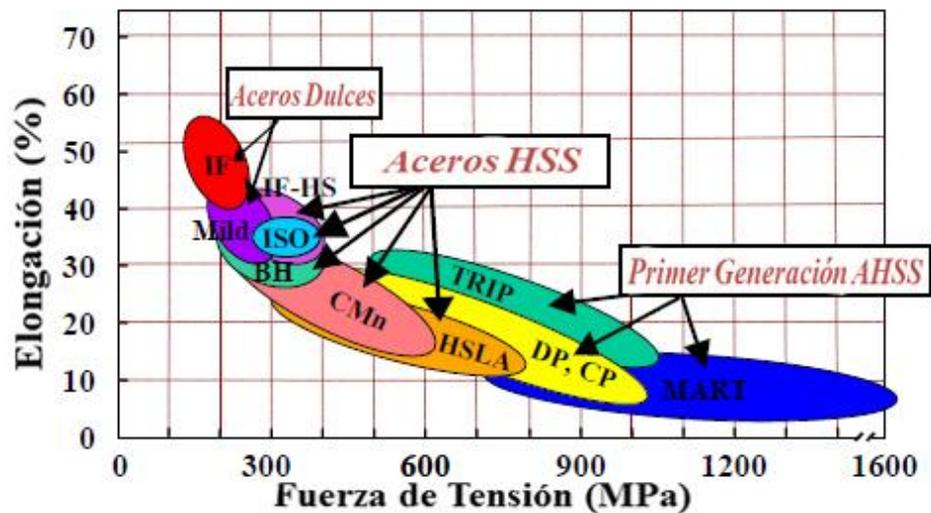
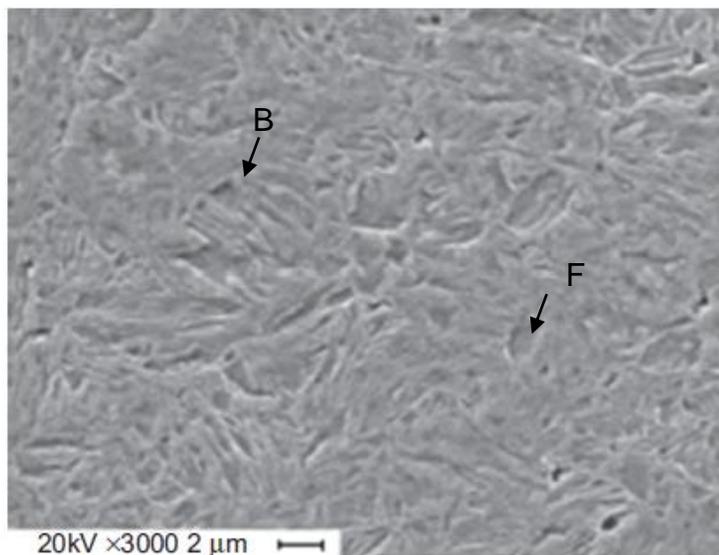


Figura 2.3 Rangos de Resistencia y Elongación de los Aceros [2].

### 2.1.4 Metalurgia de los aceros AHSS martensíticos

Estos aceros se caracterizan por contener una matriz martensítica que se transforma durante el proceso de temple, conteniendo pequeñas porciones de bainita y ferrita, Figura 2.4, “los aceros martensíticos tienen resistencias a la tracción entre 900 – 1600 MPa, con elongaciones totales alrededor de 4- 7 %” [1]. A pesar de ser muy resistentes tienen ciertas características de fragilidad, por lo cual, para reducir esta condición se someten a un precalentamiento y así poder conformarlo en diferentes productos.



**Figura 2.4 Micrografía obtenida por MEB de aceros martensíticos (M1200) [1].**

En su composición química se encuentran altos niveles de carbono que le otorgan esa capacidad de resistencia, además de contener Mn, Si y Cr, como aleantes. “Su capacidad de endurecimiento se logra gracias a su contenido en carbono del orden de 0.25% y 1.5% Mn” [1]. En la Figura 2.5, se puede observar la ubicación en el gráfico de resistencia vs elongación.

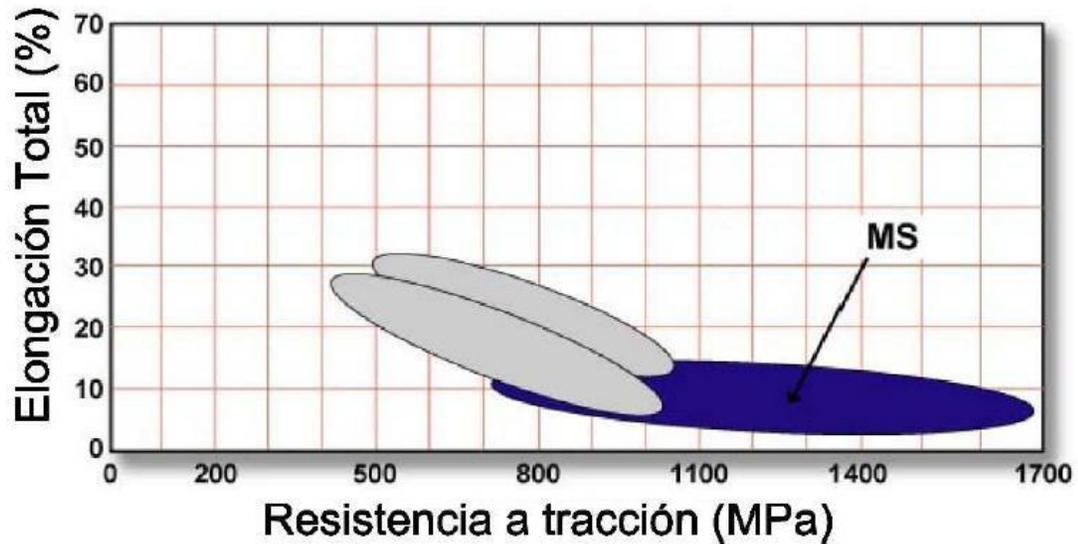


Figura 2.5 Rangos de elongación y resistencia, de los aceros M [2].

### 2.1.5 Aceros microaleados.

Los aceros con elementos microaleantes son constituidos por dos elementos principales en su composición química: hierro (Fe) y carbono (C). El resto de la composición química está constituida por pequeños porcentajes ya sea de boro (B), niobio (Nb), aluminio (Al), titanio (Ti), manganeso (Mn).

Estos elementos tienen efectos que modifican las propiedades mecánicas (tensión, tenacidad, ductilidad, templabilidad y soldabilidad) y la microestructura de los aceros, con las cuales el ingeniero de materiales por medio de una combinación y diversos tratamientos térmicos puede fabricar aceros para tareas específicas.

“Estos elementos microaleantes se pueden clasificar en cuatro tipos de sistemas debido a las características de la transformación que generan en los sistemas de equilibrio binarios del hierro, como: fase  $\gamma$ -abierto, fase  $\gamma$ -cerrada, fase  $\gamma$ -expandida y fase  $\gamma$ -contraída” [2].

De acuerdo a lo anterior la fase que expande y promueve la formación de austenita, también conocidos como estabilizadores gamma.

Y al contraer la fase  $\gamma$ ; se fomenta la formación de la ferrita, también conocidos como estabilizadores  $\alpha$ .

Elementos estabilizadores de la austenita: níquel (Ni), manganeso (Mn), carbono (C), nitrógeno (N), cobre (Cu), cobalto (Co) y silicio (Si) [3].

Elementos estabilizadores de la ferrita: cromo (Cr), molibdeno (Mo), niobio (Nb), titanio (Ti), aluminio (Al), vanadio (V) y wolframio (W) [17].

### **Efectos del boro en los aceros**

El boro (B) es un elemento utilizado para mejorar las propiedades físicas de los aceros. Uno de los principales efectos es inhibir la formación de la ferrita en el límite de grano de la austenita al limitar la movilidad atómica.

Este elemento es de radio atómico pequeño por lo cual difunde dentro de la red atómica intersticialmente distorsionándola, por consiguiente, se puede obtener un incremento en la dureza y resistencia (endurecimiento intersticialmente), esto facilita la formación de fases como bainita y martensita, lo que quiere decir que es un aumento en la templabilidad de los aceros [2].

La capacidad de endurecimiento del boro está limitada al porcentaje de carbono que esté presente en la aleación, la templabilidad es más marcada para los aceros al bajo carbono (<0.4%). Para porcentajes superiores a 0.4% se ve reducido el efecto de la templabilidad.

## **2.1.6 Proceso de la soldadura: GMAW**

### **Soldadura GMAW**

La soldadura GMAW es un proceso que une los metales al calentarlos con un arco eléctrico que se establece entre un electrodo consumible (alambre sólido o tubular) y la pieza de trabajo. Un gas o una mezcla de gases, actúa para proteger el arco y el baño de soldadura fundida” [4].

Este proceso de soldadura fue introducido en la década de 1920, pero puesto al mercado hasta 1948. Este proceso básicamente consiste en un electrodo desnudo (sin protección), al cual se le aplica una intensa corriente eléctrica y un gas inerte para brindarle protección al arco y al proceso de fusión. Dentro del proceso de soldadura con gas inerte, se le conoce como proceso MIG (Metal-Inert Gas).

El desarrollo de este proceso de soldadura incluyó variantes en la aplicación de la corriente y en el tipo de gas (gas reactivo), particularmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este último desarrollo en el que se usan gases reactivos y/o mezcla de gases, condujo la aceptación formal del término MAG (Metal-Active Gas) dentro del proceso GMAW.

El proceso de soldadura GMAW muestra ciertas ventajas sobre el resto de procesos ya que puede aplicarse automático y semiautomático, con casi todos los metales importantes del mercado actual, tales como: aceros al carbono, aceros baja aleación, aceros inoxidable, aluminio, cobre y aleaciones base níquel. Para realizar una unión de buena calidad se debe tener en cuenta la selección adecuada de los parámetros de soldadura como tipo de electrodos, tipo de corriente, avance, voltaje, corriente gas de protección y ángulo de antorcha.

“Las ventajas más importantes de este proceso son [4]:

- La longitud del electrodo no enfrenta restricciones como en otros procesos de soldadura.
- La soldadura se puede realizar en todas las posiciones, siempre y cuando se utilicen los parámetros adecuados.
- Las velocidades de soldadura son más altas en comparación con otros procesos.
- Las tasas de deposición son significativamente altas.
- La alimentación continua del alambre (electrodo) permite que se deposite soldaduras sin interrupciones
- La penetración es profunda.
- Es posible realizar soldadura de filete de tamaños reducidos, pero con gran fuerza de unión.
- La práctica de soldadura es menos complicada que en otros procesos convencionales, ya que el arco es más estable entre la punta del electrodo y el material base.
- Se requiere menos limpieza debido a la generación escasa de escoria”.

Esta serie de ventajas dan como resultado un proceso adecuado para aplicaciones de soldadura de alta tasa de producción y automatización. Dentro de la industria automotriz es uno de los procesos dominantes.

“El proceso GMAW, como cualquier otro proceso de soldadura tiene ciertas limitaciones que pueden restringir su uso [4]:

- El equipo de soldadura es complejo y costoso.
- El proceso es más difícil de aplicar en lugares de compleja accesibilidad ya que la antorcha es grande.
- La distancia de la antorcha debe ser de 10-19 mm o 3/8"-3/4" de distancia para asegurarse que la protección del gas sea efectiva.
- Se debe de cuidar el arco de soldadura de las corrientes de aire externas ya que pueden dispersar el gas de protección en zonas a la intemperie.
- Niveles de calor irradiado relativamente altos".

### Principios de operación (GMAW)

En la Figura 2.6 se muestra un esquema de los elementos importantes del proceso GMAW.

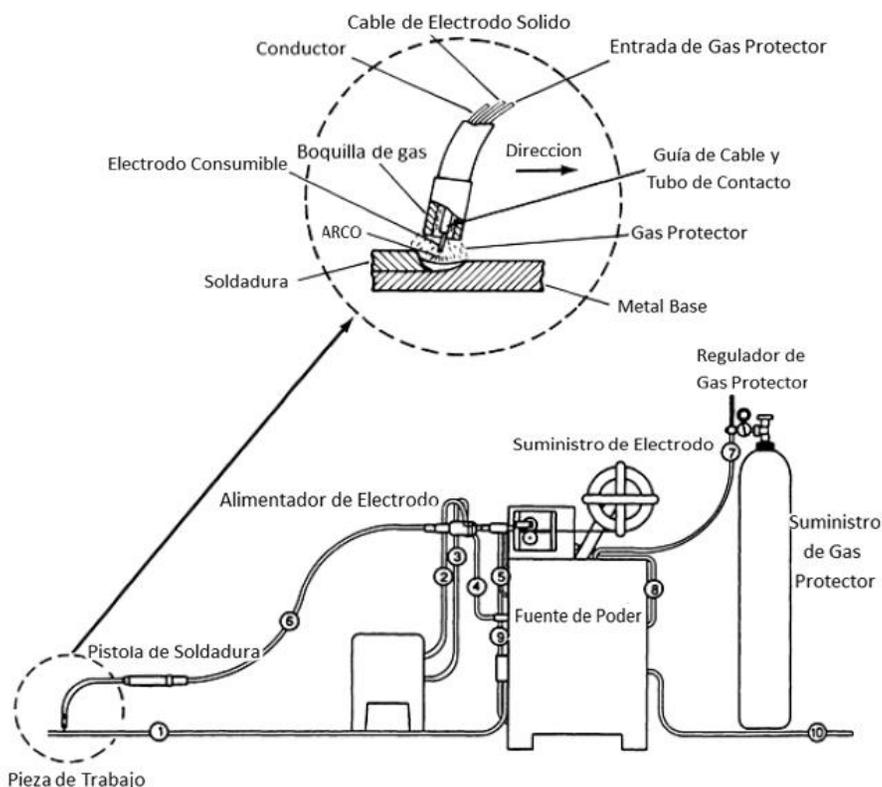


Figura 2.6 Esquema de Proceso de Soldadura GMAW [4].

Las características del proceso GMAW se describen mejor mediante la revisión de tres medios básicos por el cual el electrodo se transfiere al trabajo:

Transferencia de corto circuito, transferencia globular o pulverización. “El tipo de transferencia esta determinada por una serie de factores que son:

- Magnitud y tipo de corriente de la soldadura.
- Diámetro del electrodo.
- Composición del electrodo
- Gas protector
- Extensión del electrodo mas allá de la punta.
- Salida de suministro de energía

#### **Transferencia de cortocircuito.-**

Esta abarca el rango más bajo de corriente de soldadura en el proceso GMAW. Este tipo de transferencia produce pequeños charcos de soldadura, generalmente es bueno para usar en espesores pequeños. El material se transfiere desde el electrodo a la pieza de trabajo solamente cuando el electrodo entra en contacto con el charco de soldadura.

En esta transferencia el alambre toca el charco de soldadura (de 20 a 200 veces por segundo) y la corriente aumenta dando inicio al arco.

La tasa de aumento de la corriente debe ser suficientemente alta como para calentar el electrodo y promover la transferencia de metal, pero lo suficientemente baja como para minimizar la salpicadura causada por la gota fundida. Esta salpicadura se puede controlar ajustando la potencia de la fuente, la configuración óptima de este tipo de transferencia depende de la resistencia eléctrica del circuito de soldadura y la temperatura de fusión del electrodo. Cuando se inicia el arco, el alambre se derrite en medida que va avanzando hacia el próximo corto circuito, la transferencia de metal solo ocurre durante el cortocircuito, por lo cual el gas de protección tiene muy poco efecto en la

transferencia, sin embargo, el gas influye en las características de funcionamiento del arco y la penetración del metal base.

En los gases activos el gas de preferencia es el dióxido de carbono que generalmente produce altos niveles de salpicadura, en comparación de los gases inertes, pero permiten una penetración más profunda cuando se usa para soldadura en aceros. Para lograr un buen comportamiento entre salpicaduras y penetración, se realizan mezclas de dióxido de carbono y argón.

### **Transferencia globular.-**

Se usa un electrodo positivo, la transferencia globular tiene lugar cuando la densidad de corriente es relativamente baja, independientemente del tipo de gas de protección que se use. La transferencia globular se caracteriza por un tamaño de gota con un diámetro que es mayor que el del electrodo, esta gota es influenciada directamente por la gravedad lo cual limita la transferencia exitosa a superficies que no son planas o cordones con longitudes pequeñas. Esta técnica requiere de corrientes relativamente altas y da como resultado una penetración muy profunda, además que requiere de buenas habilidades del operador.

### **Transferencia por rociado.-**

Este tipo de transferencia es muy estable, se usa argón para evitar la excesiva salpicadura. Esta transferencia usa corriente continua (CC) con el electrodo positivo y un nivel de corriente por encima del crítico (corriente de transición).

A estos valores de corriente la transición ocurre en forma de gotas muy pequeñas que se forman y se separan. La corriente es proporcional al diámetro del electrodo que se esté usando.

“El modo de transferencia de pulverización da como resultado una corriente altamente dirigida de gotas intermitentes que se aceleran por las fuerzas de

arco a las velocidades que superan los efectos de la gravedad. Esto permite que el proceso se use en cualquier posición, bajo ciertas condiciones. Debido a que las gotas están separadas, no se producen cortocircuitos, y el nivel de salpicadura es insignificante, si no se elimina por completo” [4].

La desventaja de este proceso de soldadura se presenta cuando se trata de soldar materiales con espesores delgados, ya que los niveles altos de corriente pueden tomar la acción de cortar en lugar de soldar, además que existe una deposición de material y puede aumentar las tensiones superficiales, por consiguiente una gran distorsión de la pieza.

#### **Transferencia de corto circuito (modificado).-**

Se llevó a cabo la investigación de otros tipos de transferencia que se han desarrollado en la actualidad, por lo cual el proveedor Lincoln Electric propuso una transferencia de corto circuito modificada, o como ellos le llaman STT (Surface tensile transfer, por sus siglas en inglés) la cual presenta características similares a la transferencia corto circuito, pero se puede ajustar y manejar la entrada de calor independientemente de la velocidad de alimentación del alambre.

“Los beneficios que presume con este tipo de transferencia son una buena penetración, baja entrada de calor y la reducción de las salpicaduras y emanaciones” [5].

En la Figura 2.7 se puede observar de manera esquemática el funcionamiento de este tipo de transferencia. A continuación, una breve explicación de su funcionamiento:

- A. El STT produce una bola o gota uniforme por medio de una corriente continua y estable, la mantiene hasta que esta gota se une al charco de soldadura.
- B. Cuando la gota toca el charco de soldadura, la corriente disminuye abruptamente para que la gota se humedezca y se fusione con el charco.
- C. Automáticamente el sistema aplica una corriente llamada “Pinch current” o corriente de pinza. Esta corriente aumenta en forma de rampa gradualmente hasta el punto que se reduce abruptamente para evitar que existan salpicaduras en la zona de unión.
- D. En el nivel bajo de corriente se restablece el arco de soldadura.
- E. El sistema detecta automáticamente que ya se restablece el arco y aplica una “Peak current” o corriente de pico que establece la longitud de arco adecuada. El controlador cambia de corriente de pico a corriente de respaldo “Background current” la cual sirve como un control de calor bajando progresivamente la corriente de pico para restablecer la gota de soldadura y comenzar nuevamente en el paso A.

## El proceso STT®

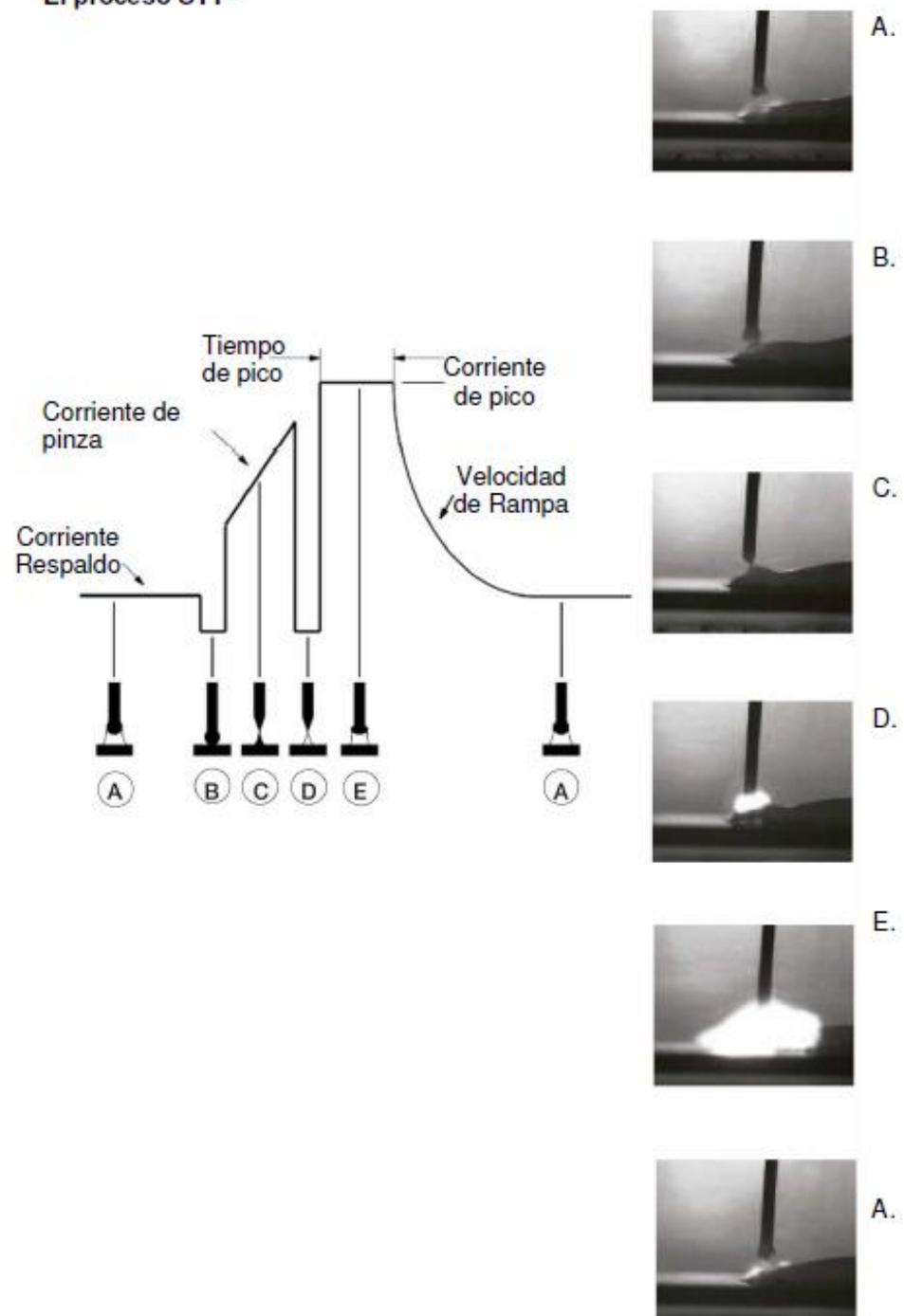


Figura 2.7 Funcionamiento por etapas de la transferencia STT de Lincoln  
[5]

## Variables de proceso

En la Tabla 2.1 se muestran las variables importantes dentro del proceso de GMAW que afectan la penetración de la soldadura, geometría del charco y la calidad en general.

“El conocimiento y el control de estas variables son esenciales para producir consistentemente soldaduras de calidad satisfactoria. Porque ellos no son completamente independientes entre sí, cambiar una variable generalmente requiere cambiar una o más de las otras para producir los resultados deseados” [4].

**Tabla 2-1 Variables de Proceso - GMAW [4].**

VARIABLES DE SOLDADURA A CAMBIAR	CAMBIOS DESEADOS							
	PENETRACIÓN		TASA DE DEPOSICIÓN		TAMAÑO DE CHARCO		ANCHO DE ARCO	
	AUMENTO	DESCENSO	AUMENTO	DESCENSO	AUMENTO	DESCENSO	AUMENTO	DESCENSO
CORRIENTE Y VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Poco Efecto	Poco Efecto
VOLTAJE	Sin Efecto	Sin Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco efecto	Poco Efecto	Incremento	Disminución
VELOCIDAD DE AVANCE	Sin Efecto	Sin Efecto	Poco Efecto	Poco efecto	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento
EXTENSIÓN DE ELECTRODO	Disminución	Incremento	Incremento	Incremento	Incremento	Disminución	Disminución	Incremento
DIAMETRO DE CABLE	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto
%GAS PROTECTOR	Incremento	Disminución	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Incremento	Disminución
ÁNGULO DE PISTOLA	Arrastre	Empuje	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Poco Efecto	Empuje	Arrastre

### 2.1.7 Tipo y geometría de la junta de soldadura.

Una junta es la unión entre los miembros o bordes en los cuales se va a realizar la unión.

Dentro de las especificaciones de la soldadura existen cinco tipos básicos de juntas, a tope, en esquina, en T, a traslape y de borde.

“La junta a tope describe la configuración en la que los dos miembros a unir están alineados en el mismo plano y sus bordes están en contacto” [6], como se presenta en la Figura 2.8.

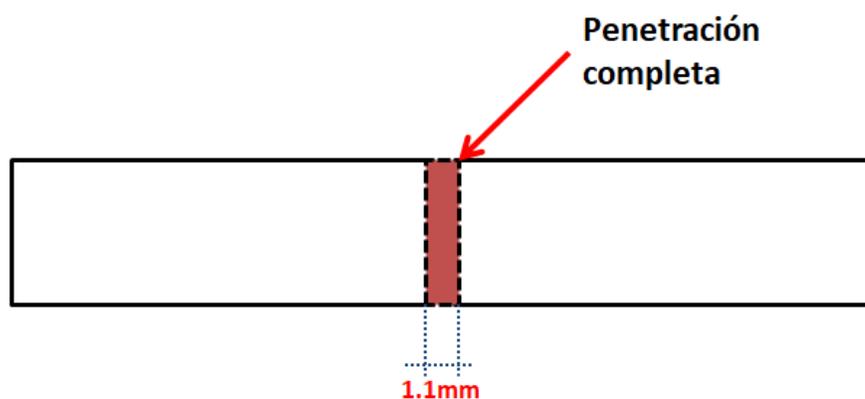
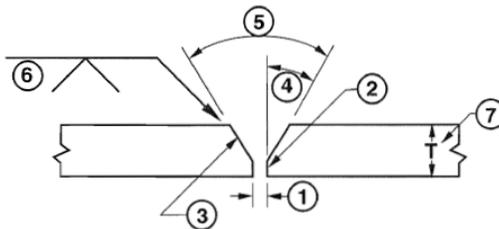


Figura 2.8 Junta a tope [6].

#### Partes de la junta de soldadura a tope.

Los tipos de juntas tienen elementos importantes que se deben de identificar para poder realizar una unión, ver Figura 2.9, donde se ilustra las partes de la junta.



1. ABERTURA DE LA RAÍZ:	Separación en la raíz de la junta entre las piezas.
2. CARA DE LA RAÍZ:	Parte de la cara de la ranura adyacente a la raíz de la junta.
3. CARA DE LA RANURA:	Superficie de un miembro de junta incluida en la ranura.
4. ÁNGULO DEL BISEL:	Ángulo entre el el borde preparado de un miembro y un plano perpendicular a la superficie del miembro.
5. ÁNGULO DE LA RANURA:	Ángulo total de la ranura entre las piezas.
6. TAMAÑO DE LA SOLDADURA DE RANURA:	Penetración de la junta en una soldadura de ranura.
7. ESPESOR DE LA PLACA (T):	Espesor de los metales base a soldar.

**Figura 2.9 Partes de una junta de soldadura a tope [6].**

### 2.1.8 Difusividad térmica.

Al aumentar la temperatura de un sistema o pieza, este pierde su homogeneidad, por lo cual, el calor fluye de las zonas más calientes a las más frías; a esto se le llama difusividad térmica, y puede propagarse por tres vías o mecanismos:

- **Conducción:** El calor se propaga a través de medios sólidos por la vibración de los iones alrededor de sus posiciones de “equilibrio”. Las vibraciones en las regiones con temperatura más elevada son de mayor amplitud (energía) que en las regiones del mismo sistema con menor temperatura. Las partículas con mayor energía cinética chocan con las menos excitadas y les transfieren parte de su energía, tendiendo así al equilibrio térmico. En metales, también los electrones son portadores de calor, teniendo una velocidad media mayor en las regiones de alta temperatura, y cediendo parte de la energía cinética a electrones en las regiones más frías [7].

En este caso de estudio se cuenta con una transferencia de calor por conducción ya que es un contacto directo entre dos cuerpos y no se cuenta con intercambio de material, por lo tanto el calor fluye del cuerpo con mayor temperatura hacia el de menor temperatura. La ecuación básica de este sistema es el siguiente:

$$Q = \frac{kA}{x} (T_1 - T_2)$$

Donde:

- Q, es el calor transmitido por unidad de tiempo
- k, es la conductividad térmica
- A, es el área de la superficie de contacto
- $(T_1 - T_2)$ , es la diferencia de temperatura entre el elemento caliente y el frío
- x, es espesor del material

En un proceso de soldadura se puede determinar que entre mayor entrada de calor en el material de aporte presenta un incremento en la temperatura  $T_2$ , lo cual trae consigo un gradiente térmico mayor, este incremento sugiere un aumento en la velocidad de enfriamiento propiciado a una transformación martensítica en el material.

- **Convección:** Es el mecanismo que además involucra el desplazamiento de masa, en líquidos o en gas. Cuando la masa de un fluido se calienta, aumenta la velocidad media, y se reduce la densidad. Esto hace que se generen desplazamientos, mientras que las masas menos calientes, pero más densas del fluido se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente [7].
- **Radiación:** El calor es transferido directamente entre diferentes partes del cuerpo por radiación electromagnética. No se requiere de un medio

para su propagación. Las superficies a una temperatura “T1” emiten radiación, proporcional a la otra zona con temperatura “T2” [7].

Cabe destacar que en los sólidos no puede ocurrir el mecanismo por convección y la transmisión por medio de radiación se considera despreciable. Por lo tanto, los sólidos solo pueden propagar su calor por medio de la conducción.

Los efectos al soldar una pieza pueden ser perjudiciales en el material que rodea la soldadura. Esto depende de los materiales a unir y el material de aporte. La zona afectada por el calor (ZAC), puede tener una variación en tamaño y fortaleza, ya que los materiales cuentan con una propiedad llamada difusividad térmica.

Si la difusividad es alta, la velocidad de enfriamiento del material es alta, por lo cual, la ZAC se reduce. De manera inversa, si la difusividad es baja el calor se conduce de manera más lenta, por lo cual, la ZAC es más grande.

Este efecto de la ZAC también puede verse afectado por el proceso de soldadura que se esté empleando, por ejemplo, si se utiliza un proceso de soldadura oxiacetilénica tiene una mayor entrada de calor por no tener una focalización del calor. A diferencia de un proceso de soldadura láser el cual cuenta con mecanismos para focalizar la entrada de calor a un punto.

Para calcular el calor para los procesos de soldadura de arco se puede usar la siguiente fórmula:

$$Q = \left( \frac{V \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \text{Rendimiento}$$

En donde [8]:

- $Q$  = Entrada de calor (kJ/mm)
- $V$  = Voltaje (V)
- $I$  = Corriente (A)
- $S$  = Velocidad de la soldadura (mm/min)

“El rendimiento es un valor adimensional que depende del proceso de soldadura que se esté usando. La literatura sugiere que para soldadura de arco de metal revestido es de 0.75, la soldadura por arco metálico con gas y sumergido de 0.9 y la soldadura de arco con tungsteno de 0.8” [8].

### **2.1.9 Fractografía.**

Como introducción a esta sección del documento, primero hay que definir que es una fractura:

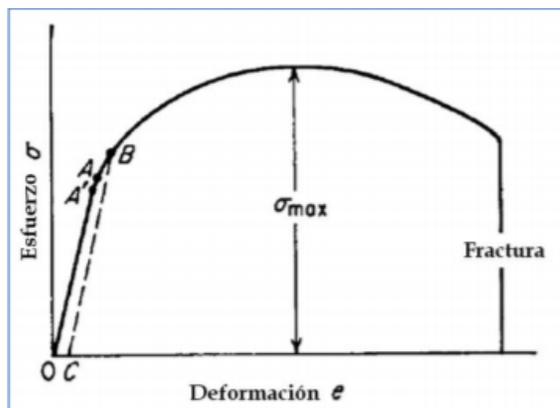
“Se define como la separación de un cuerpo en dos o más piezas bajo la acción de una carga, los componentes que rigen la fractura son: la iniciación de la grieta y su propagación, dependiendo del tipo de material en el que se presente la fractura, esta puede ser considerada dúctil o frágil” [9].

Por lo general la causa de una falla es la tensión excesiva que se le aplica a una pieza, sin embargo se debe determinar de qué manera la muestra presentó la fractura o cual fue su afectación al realizar un proceso de soldadura en el cual se debe considerar el tipo de material, los aleantes, la afectación del calor y las transformaciones en su microestructura y/o composición química.

#### **Tipos de fracturas: dúctil y frágil.**

Existen dos tipos de comportamientos de los materiales cuando se someten a una carga, la cual depende si inhibe la capacidad de una deformación plástica. [10].

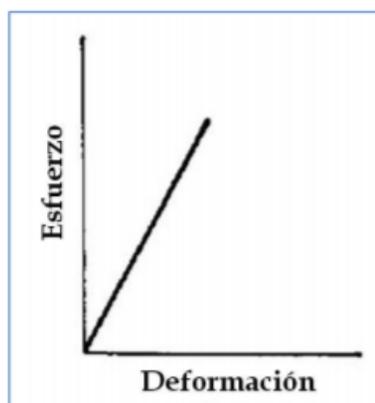
La Figura 2.10 se trata de una curva de esfuerzo-deformación de un material dúctil.



**Figura 2.10 Gráfica generada por un material dúctil al someterse a un ensayo de tensión [9].**

En la gráfica anterior se muestra una curva típica de deformación elástica y plástica. Al final de la curva se presenta la falla o fractura del material.

En la Figura 2.11 se muestra el comportamiento de un material rígido, donde la fractura se localiza en el límite elástico, por lo cual se puede decir que no cuenta con una zona de deformación elástica.



**Figura 2.11 Gráfica generada por un material frágil al someterse a un ensayo de tensión [9].**

“Una fractura dúctil se caracteriza por una apreciable deformación plástica durante la propagación de las grietas, en cambio las fracturas frágiles, en metales, se caracterizan por la rápida propagación de la grieta, sin ninguna deformación plástica. La fractura dúctil es común en los metales y en los polímeros, la fractura frágil se presenta en cerámicos y algunos metales a bajas temperaturas. Se le llama fractura transgranular cuando la grieta se propaga a través de los granos e intergranular, cuando la propagación se efectúa a través de los límites de grano” [10].

### **Definición de fractografía**

El propósito de la Fractografía es analizar las características de fractura para intentar relacionar la topografía de la superficie de fractura con las causas y/o los mecanismos básicos de la misma. Etimológicamente, la palabra fractografía es similar en su origen a la palabra metalográfico; *fracto* deriva del latín *fractus*, que significa fractura y *grafía* deriva del término griego *grafo*, es decir, tratamiento descriptivo [11].

Existen tres pasos básicos para el análisis de superficies de fractura que están en todos los estudios científicos basados en experimentos:

1. Observar
2. Describir y medir
3. Interpretar

Estos pasos no son independientes y no pueden ser manejados como procesos separados en una investigación, porque depende lo que se puede observar en las muestras [11].

Se debe considerar que los metales muestran una combinación de excelentes propiedades de resistencia contra plasticidad, gracias a la fuerza de cohesión que existe entre los átomos, lo cual, permite tener altos puntos de fusión, plasticidad, ductilidad y bajos coeficientes de expansión térmica [9].

La fractografía es un tema donde se realiza un amplio estudio para lograr conocer las causas de una falla o ruptura de un material.

Las técnicas de caracterización que se pueden realizar para poder determinar las causas de falla de una pieza, pueden ser:

- Ensayos de tensión
- Pruebas de dureza
- Análisis químico
- Macrografía y micrografía
- Ensayos no destructivos como: líquidos penetrantes, radiografía, etc.

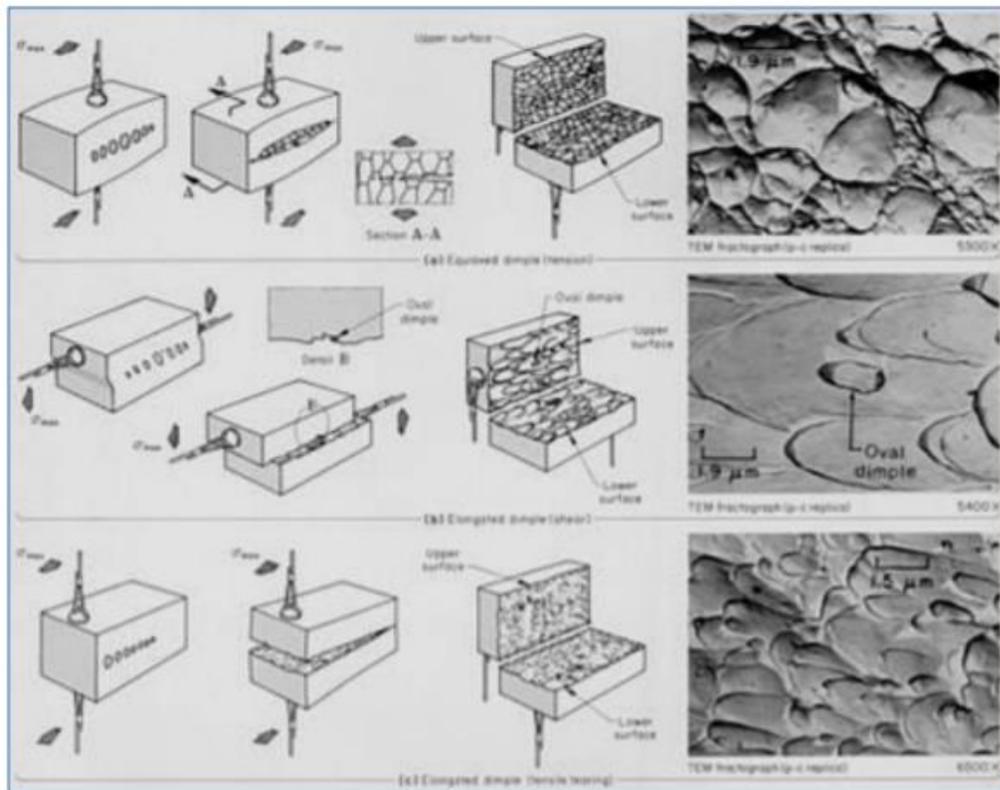
Por medio de la inspección visual y observación de la fractura se pueden determinar los parámetros de la ruptura como:

- Mecanismos de propagación de la fisura.
- Fractoténacidad del material.
- Configuración de tensiones: distribución y magnitud
- Origen de la fractura.

### **Patrones y mecanismos de fractura en metales**

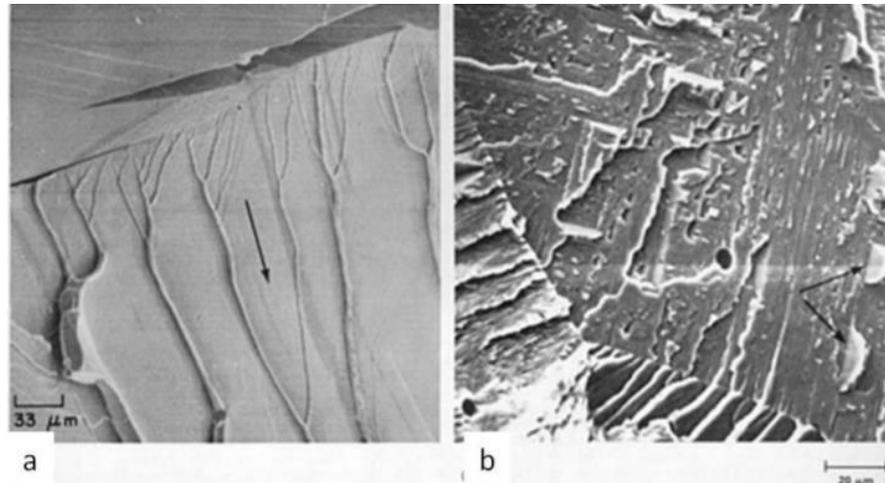
En las aleaciones metálicas se pueden presentar fracturas de tipo transgranular (a través de los granos) o intergranular (a lo largo de los límites de grano) y esencialmente solo hay cuatro tipos de fracturas:

- Cavidades o huecos.- los huecos son nucleados en zonas localizadas de deformación discontinua asociadas con la presencia de partículas de segunda fase, inclusiones, límites de grano y dislocaciones o apilamientos. En la Figura 2.12 se muestran fracturas que presentan microcavidades en distintas direcciones de esfuerzo.



**Figura 2.12 Influencia de la dirección del esfuerzo en forma de hoyos formados por coalescencia de microhuecos [11].**

- Clivaje.- es una fractura de baja energía que se propaga a lo largo de planos cristalográficos bien definidos conocidos como planos de clivaje, técnicamente este tipo de fractura se presentan en superficies planas. En la Figura 2.13 se muestran ejemplos de fractura por clivaje.



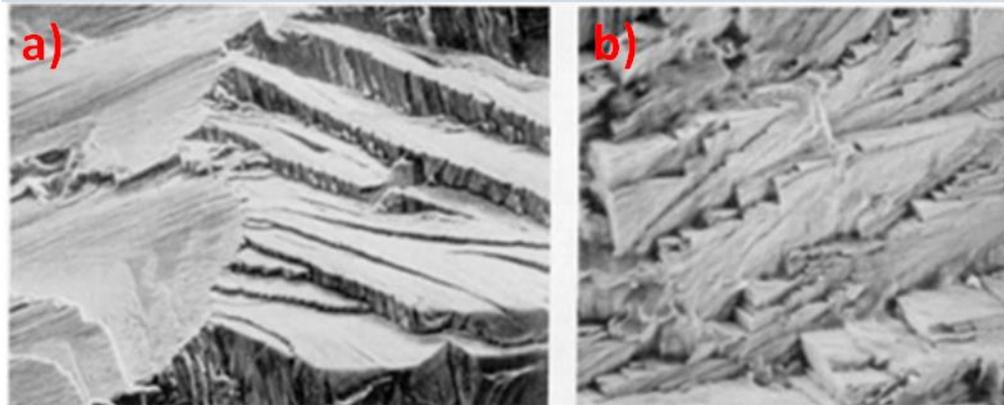
**Figura 2.13 Superficies de fractura por clivaje [11].**

- Fatiga.- es el resultado de una fractura por una carga repetitiva o cíclica, que se presenta en tres etapas.

Etapa I.- inicio y crecimiento de la grieta por deslizamiento de plano debido al proceso ciclico de los sistemas de deslizamiento activos del metal.

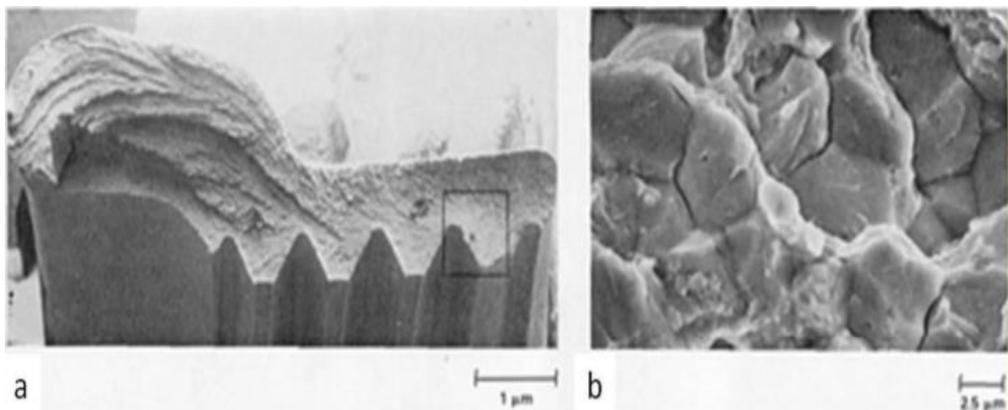
Etapa II.- En esta etapa las fracturas presentan marcas conocidas como estrías por fatiga que son registros visuales de la propagación de la fractura en el material.

Etapa III.- Es la fase terminal de propagación de una grieta por fatiga en el que el modo de formación de estrías es desplazado progresivamente por los modos de fracturas estáticos (microcavidades o clivaje) hasta llegar a la ruptura o falla. En la Figura 2.14 se muestran fracturas por fatiga.



**Figura 2.14** Apariencia de fractura por fatiga a) muestra una fractura similar a clivaje, b) superficie de fractura con estrías en pasos [11].

- Ruptura cohesiva.- Este tipo de fractura exhibe poca o ninguna deformación plástica, en este tipo de fractura no muestra microcavidades, clivaje o fatiga. Está asociada a la ruptura de los límites de grano ya que aquí se pueden encontrar componentes de punto de fusión más bajos que el sistema de aleación. En la Figura 2.15 se muestran ejemplos de fractura cohesiva.

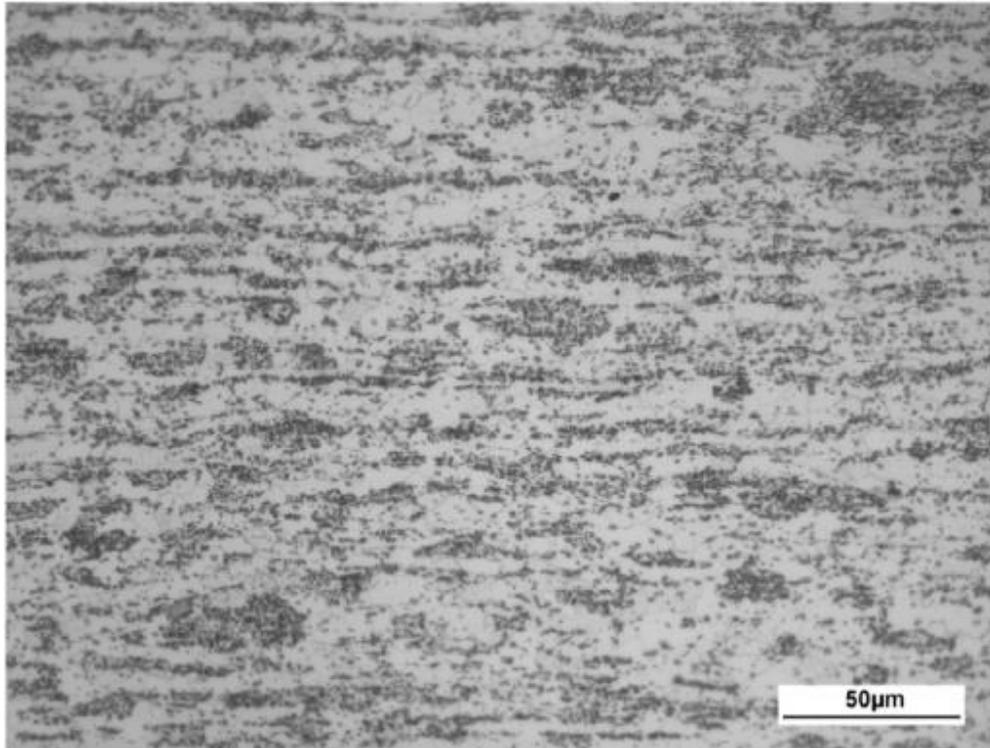


**Figura 2.15** a) Ruptura de cohesión de una tuerca de acero AISI 8740 debido a la fragilización por hidrógeno b) fractura intergranular de cohesión [11].

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Al tratarse de un acero microaleado con boro se verificó en la literatura los efectos que podría tener este tipo de aceros con un aumento en la temperatura.

En el artículo de Jue Lu y colaboradores, realizan un estudio en el cual someten un acero al Boro a tratamientos térmicos con diferentes temperaturas para ver su afectación en la microestructura y propiedades mecánicas. En la Figura 2.16 se muestra la microestructura del acero al boro con el cual trabajaron [12].



**Figura 2.16 Micrografía óptica de la microestructura inicial del B1500HS [12].**

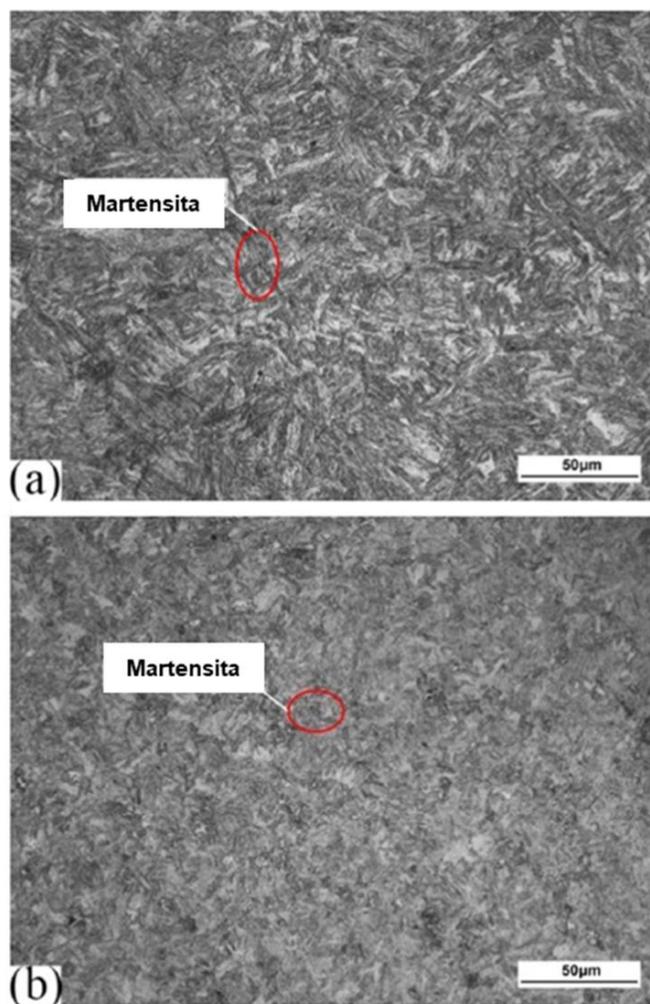
En la Tabla 2.2 se compara la composición química del acero al Boro y el acero con el cual se realizó la experimentación.

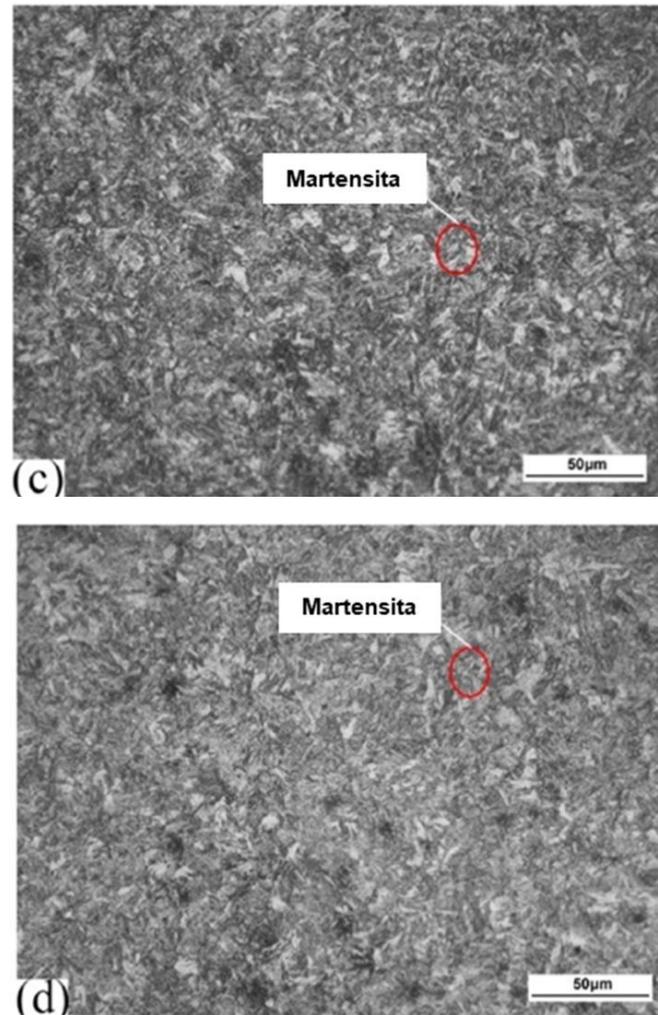
**Tabla 2-2 Composición química del acero B1500HS (% e.p) [12].**

Comparación	% C	% S	% Mn	% P	% Si	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu	% V	% Ti	%B
<b>B1500HS</b>	0.23	---	1.35	---	0.25	0.19	---	0.04	---	---	0.04	0.003
<b>Acero M1300</b>	0.19	0.002	1.2	0.006	0.056	0.19	0.019	0.008	0.051	0.003	0.033	0.005

Concluyen que a temperaturas alrededor de los 900°C, reducen el tiempo de nucleación y crecimiento de grano por lo cual las bandas de martensita son más cortas y esto mejora la ductilidad de la martensita sin perjudicar la resistencia al esfuerzo [12].

La Figura 2.17 muestra cuatro microestructuras obtenidas bajo el efecto de los tratamientos térmicos con diferentes tiempos de enfriamiento.





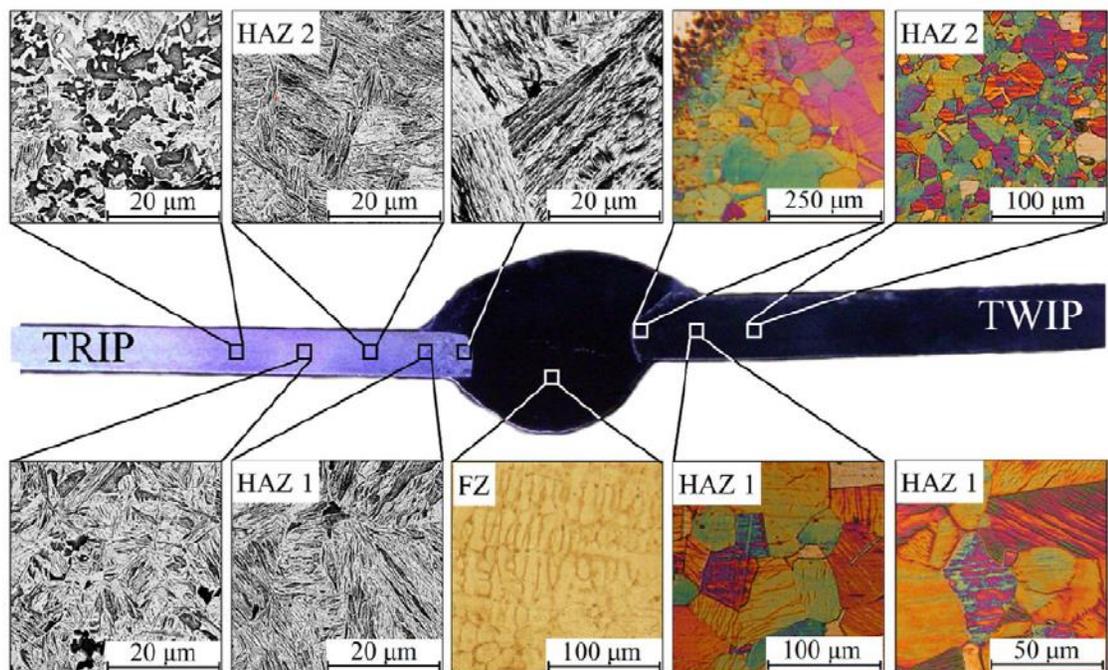
**Figura 2.17 Microscopía óptica del B1500HS acero al boro deformados a 900°C con tasas de deformación (a) 0.01 s<sup>-1</sup>, (b) 0.1 s<sup>-1</sup>, (c) 1 s<sup>-1</sup>, (d) 10 s<sup>-1</sup> y un rango de enfriamiento de 30 °C/s [12].**

En el trabajo realizado por Kornél Májlínger y colaboradores [13]; se investigó la unión de aceros disímiles (aceros TRIP y TWIP), por medio de soldadura GMAW. Se realizaron varias muestras con diferentes parámetros de soldadura con el fin de ejecutar una unión que cumpliera con requerimientos de calidad y buenas propiedades mecánicas. Materiales usados se muestran en la Tabla 2.3.

En la Figura 2.18 se puede observar los resultados, el mejor resultado obtenido fue con un calor en el rango de 0.500 – 0.650 kJ/mm, donde se obtiene un cordón de soldadura con buena fusión y sin defectos, por parte de la

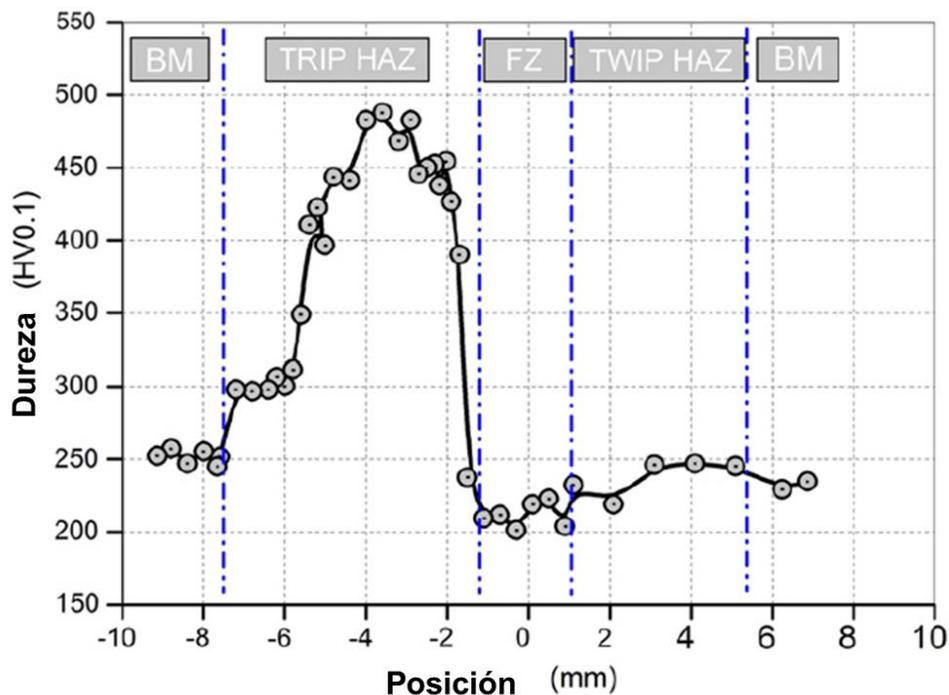
microestructura en la unión se puede observar que en la zona de fusión presenta un crecimiento dendrítico típico y una fase totalmente austenítica debido al material de aporte.

En el acero TRIP que tiene una mezcla de fases (ferrita, bainita, martensita y austenita) se genera una transformación martensítica en la zona afectada por el calor y un crecimiento en el tamaño de grano.



**Figura 2.18 Microestructura de la unión entre aceros TRIP y TWIP [13].**

En la Figura 2.19 se muestra la dureza que fue tomada perpendicularmente a la dirección del cordón de soldadura, cruzando la zona de fusión, la zona afectada por el calor y el material base. Donde presenta un incremento de dureza en la zona del acero TRIP, mientras tanto se mantiene una homogeneidad entre la zona de fusión y el acero TWIP.



**Figura 2.19** Gráfico que muestra las durezas obtenidas en la sección transversal de la unión entre aceros TRIP y TWIP [13].

Se observa que la elongación y resistencia a la tracción se ven afectadas por esta transformación martensítica, ya que la resistencia a la tracción es reducida en un 20-40%, y la elongación entre un 80-50%. Estos resultados son comparables con uniones realizadas entre AHSS y HSS.

**Tabla 2-3** Composición química de aceros TRIP, TWIP y el material de aporte usado AWS307 [13].

Material	Composición química (wt%)					
	C	Mn	Si	Al	Ni	Cr
TRIP	0.27	2.1	1.52	0.25	---	---
TWIP	0.51	15	0.46	1	---	0.13
AWS307	0.08	6.62	1.45	---	9.03	19.1

En otro trabajo realizado por Hernán Svoboda y Horacio Nadale [14], se presentan pruebas de fatiga en uniones soldadas por GMAW y plasma trasferido por arco (PAW, por sus siglas en inglés) usando aceros avanzados (AHSS) microaleados con boro (B). Esta familia de AHSS con microaleaciones, muestra buenas propiedades mecánicas (esfuerzos en el orden de 1000 – 1500 MPa) y entra el ámbito de reducir el peso de la carrocería.

De igual manera se realizaron probetas de 100X100mm a partir de elementos de 50x100mm con parámetros de soldadura para GMAW y PAW, obtuvieron buenas uniones usando los parámetros de soldadura mostrados en la Tabla 2.4.

**Tabla 2-4 Parámetros de soldadura [14].**

Proceso	I (A)	Volts (V)	Velocidad (mm/seg)	Gas protección	Q (L/min)	HI (J/mm)
<b>GMAW</b>	85	19	15.6	Ar-20CO2	20	0.11
<b>PAW</b>	50	13.5	7.7	Ar/Ar-5H2	0.8/20	0.09

Al aplicar a las dos piezas a un estudio de fatiga, encontraron que el calor de entrada que tiene el GMAW genera más tensiones internas por ser de valores más altos en comparación del PAW.

A pesar de tener una buena calidad de unión, microestructuralmente, si existe una diferencia, y esto afecta propiamente en sus respectivas aplicaciones.

El acero utilizado se encuentra bajo la norma: GMW-14400. Esta especificación se refiere a aceros al boro tratable térmicamente y con un bajo contenido de carbono. Con este tipo de aceros se fabrican piezas estructurales para soportar cargas muy altas de resistencia a la tracción con una deformación despreciable, cuidando la seguridad y protección de los ocupantes. Este material se debe tratar con calor y se enfría simultáneamente en el mismo troquel por medio de agua, a este proceso se le denomina estampado en caliente. “Este proceso produce piezas con una microestructura martensítica. Este material consiste principalmente en martensita templada (menos del 5%)” [15].

## **CAPITULO 3: METODOLOGIA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL**

A continuación se da una breve introducción de cómo se desarrolló la metodología y desarrollo experimental. En donde el primer paso fue obtener el material con el cual se va trabajar en la investigación, para caracterizarlo como materia prima (antes de someterlo a un proceso de soldadura), la obtención del material fue limitada por qué era una hoja de material que no cumplía las dimensiones geométricas del proceso.

En la caracterización se realizaron metalografías para conocer la microestructura, se realizó un análisis por espectrometría de emisión óptica el cual reveló la composición química y posteriormente se sometió a un ensayo destructivo de tensión para conocer el esfuerzo que puede soportar el metal base, los cuales fueron realizados en las instalaciones de COMIMSA.

El diseño de un herramental fue necesario ya que el hacer un proceso robotizado, marca tener la apertura de raíz y posición de las probetas iguales,

fue realizado con un software de desarrollo 3D CAD: Inventor. Y la fabricación se llevó a cabo en el taller de manufactura, mediante una selección de materiales para el proceso de GMAW.

Para continuar con la metodología se realizó la selección del equipo, material e instalaciones para poder realizar las probetas con el proceso de soldadura elegido, fue apoyada por la empresa Lincoln Electric, ya que se brindó asesoría. Las pruebas de soldabilidad se realizaron empleando un proceso de transferencia patentado por dicha empresa.

Se cortaron las probetas y cupones de soldadura con las dimensiones adecuadas, para pasar a las pruebas de soldabilidad con el proceso GMAW. Estas probetas fueron realizadas con el proceso de corte por agua, donde unos fueron evaluados por ensayos de dobléz y otros por tensión debido a la disponibilidad de material.

Para el análisis de resultados, se realizaron distintos estudios no destructivos y destructivos, entre ellos, microscopía óptica, microscopio electrónico de barrido, fractografía, macroscopia y ensayos de tensión.

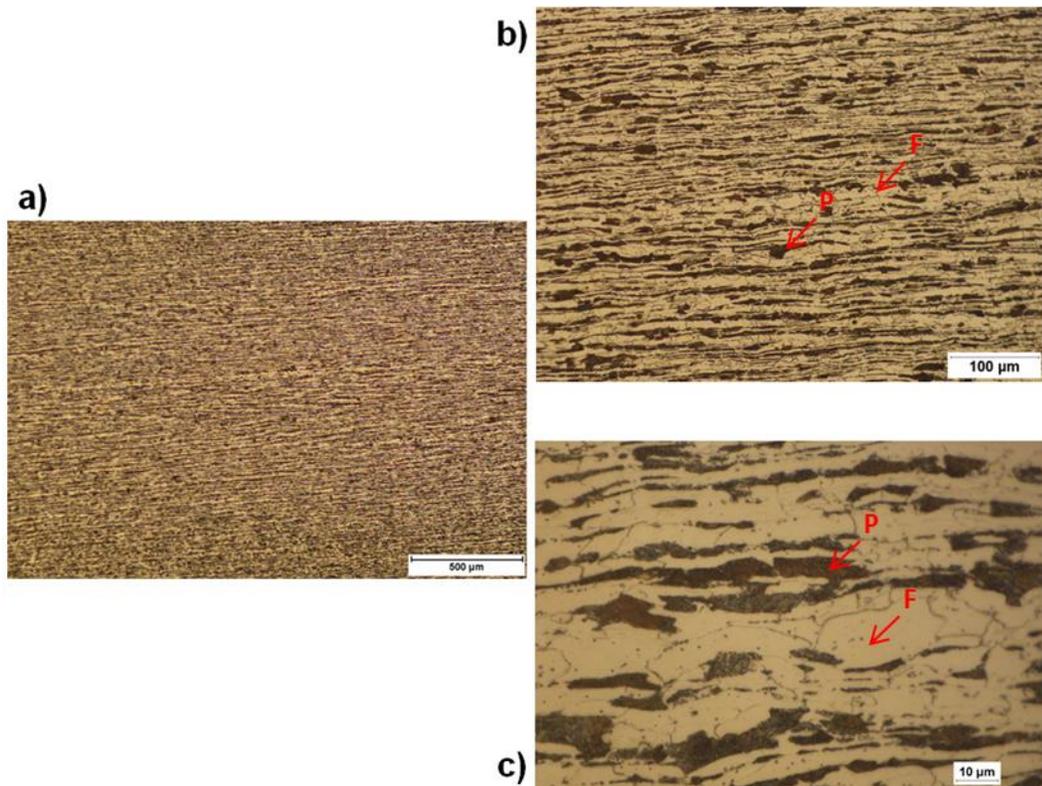
### 3.1 Material base

En la experimentación del proyecto de investigación se utilizó acero martensítico MS1300, la composición química fue obtenida por medio de espectrometría de emisión óptica de C y S por combustión y detección infrarroja en base a la norma ASTM E1019-2011; los resultados se muestran en la Tabla 3.1.

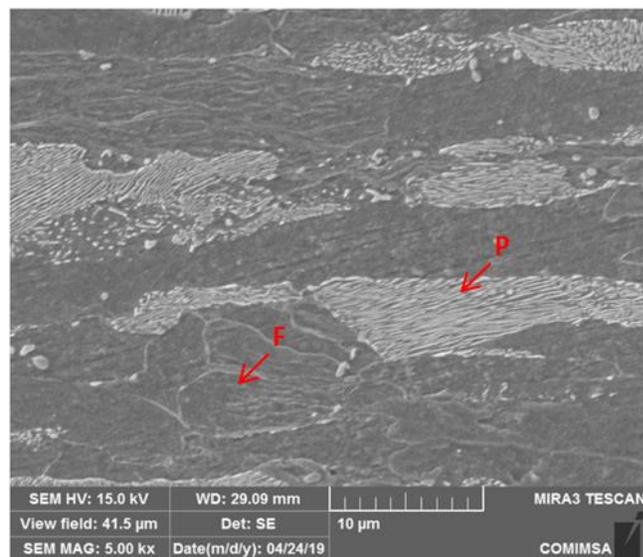
En la Figura 3.1 se muestran micrografías del metal base tomadas por microscopía óptica observadas a a) 50x, b) 100x y c) 1000x. Estas presentan una matriz ferrítica con bandas de perlita. En la Figura 3.2 se muestran micrografías obtenidas por medio de un microscopio electrónico de barrido, estas nos corroboran que la microestructura es una matriz ferrítica e islas de perlita.

**Tabla 3-1 Composición química del acero M1300 (% e.p)**

Muestra	%C	%S	%Mn	%P	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%V	%Ti
Acero M1300	0.19	0.002	1.2	0.006	0.056	0.19	0.019	0.008	0.051	0.003	0.033

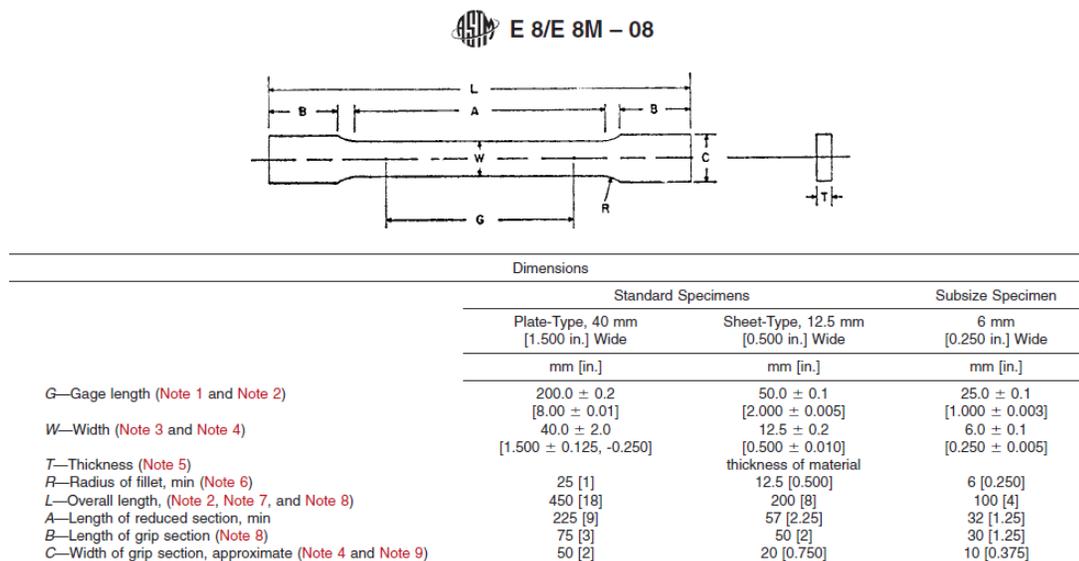


**Figura 3.1 Metalografía obtenida con microscopio óptico con diferentes aumentos a) 50x, b) 100x y c) 1000x.**



**Figura 3.2 Metalografía a 5000x del metal base en la cual presenta la matriz ferrítica y las bandas de perlita.**

Se realizaron 3 probetas para tensión del material base, con dimensiones bajo la norma de la ASTM E8/E8M. Las dimensiones que especifica esta norma se muestran en la Figura 3.3.

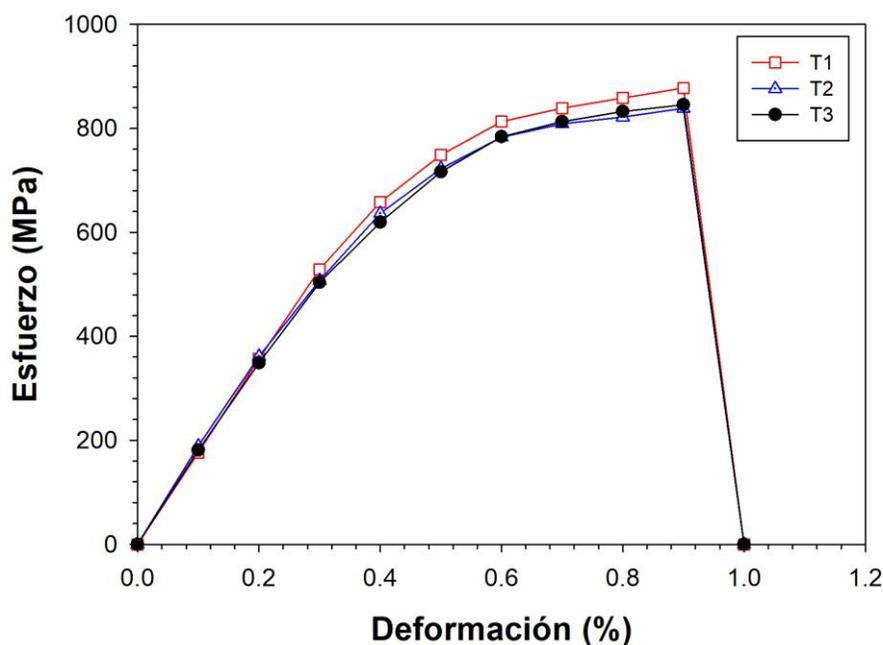


**Figura 3.3 Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo vs deformación [9].**

Los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 3.2, y las gráficas de “esfuerzo vs deformación” de las tres probetas, se observa en la Figura 3.4, el esfuerzo máximo tiene una media de 845.63 MPa y un esfuerzo a la cedencia de 784.53 MPa.

**Tabla 3-2 Resultados de pruebas de esfuerzo vs deformación.**

Tensión de metal base							
Muestra	Carga Máx (kgf)	Carga de 0.2% (kgf)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Cedencia (MPa)
T1	2300	2150	2.02	12.87	25.997	867.89	811.31
T2	2250	2080	2.02	12.8	25.856	853.67	789.17
T3	2260	2090	2.02	12.75	25.755	860.82	796.07



**Figura 3.4 Gráfica de prueba de esfuerzo vs deformación de 3 probetas de metal base.**

### **3.2 Pruebas de soldabilidad**

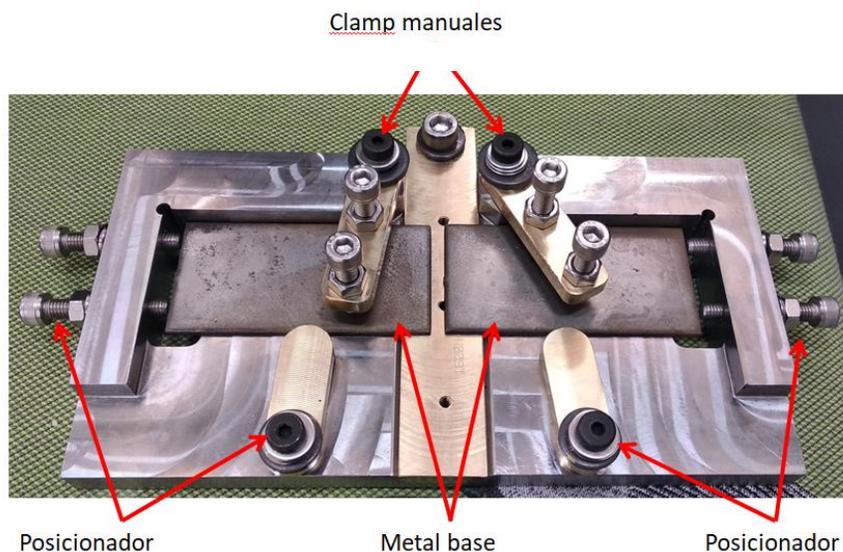
Las pruebas de soldadura para el material MS1300, fueron realizadas en las instalaciones de Lincoln Electric Mexicana, S.A. De C.V, en las cuales se usó un tipo de transferencia de corto circuito patentado por la misma empresa, aplicado por medio de un proceso GMAW robotizado.

Las pruebas de soldabilidad tienen como objetivo encontrar parámetros y variables que puedan brindar una buena fusión, una correcta sanidad de la soldadura y que las propiedades mecánicas no se vean afectadas de manera significativa.

### 3.3 Material utilizado

Para realizar las pruebas de soldabilidad se cortó el acero M1300 en cupones con dimensiones de 50 x 100 mm, para realizar uniones a tope. Se usó un proceso de corte por agua, el cual no proporciona entrada de calor que pudiera afectar la microestructura y por ende las propiedades mecánicas.

Dentro del proyecto de investigación, se diseñó y desarrolló un herramental para sujetar y mantener la pieza en la posición deseada y, no afectar la geometría del cordón de soldadura. Además de cuidar la separación que tenían los cupones y poder homogenizar los resultados obtenidos. La Figura 3.5 muestra una fotografía del herramental usado en las pruebas, tiene dos posicionadores para cuidar la orientación y la apertura de raíz de la unión. Los clamps son tornillos tipo guía que brindan una sujeción para evitar que las piezas se levanten o pierdan posición.



**Figura 3.5 Herramental usado en pruebas de soldabilidad.**

El material de aporte utilizado en estas pruebas fue proporcionado por Lincoln Electric, el cual consistió “**SUPERARC LA-90**” con un diámetro de 0.45” (1.1 mm), que es para aceros de baja aleación y con recubrimiento de cobre. Este material es considerado por la AWS dentro del código A5.28/A5.28M. En la Tabla 3.3 se muestra el equivalente de la AWS, el cual tiene las siguientes características [16]:

- Se puede obtener esfuerzos a la tensión de 550-620 MPa (80-90 kpsi)
- Contiene 0.5% de molibdeno (Mo), que ayuda al incremento de la resistencia y contribuye con la disminución del estrés de la unión.
- Puede ser usado con transferencias de corto circuito, globular, rociado y rociado en pulsos.
- Es apto para cualquier posición de soldadura.
- Gases de protección recomendados: 75-95% argón / balance de CO<sub>2</sub>.
- Flujos de gas de protección: 30-50 CFH (Cubic Feet per Hour por sus siglas en ingles)

**Tabla 3-3 Microalambre Lincoln y su comparativa con la norma AWS [16].**

LINCOLN	AWS
SUPERARC LA-90	ER80S-D2; ERS90S-D2

La composición química indicada por el fabricante [16], se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3-4 Composición química del micro alambre Lincoln Superarc LA-90(% e.p) [16].**

Material de aporte	% C	% S	% Mn	% P	% Si	% Ni	% Mo	% Cu
Superarc LA-90	0.09-0.11	≤ 0.010	1.63-1.74	0.007-0.016	0.56-0.64	≤ 0.04	0.43-0.46	0.16-0.22

### 3.4 Equipo utilizado

Para el desarrollo de estas pruebas de soldabilidad se usaron los equipos enlistados en la Tabla 3.5, los cuales son parte de las instalaciones de Lincoln Electric.

**Tabla 3-5 Equipos utilizados para el desarrollo de las pruebas de soldabilidad.**

<b>Equipo</b>	<b>Nombre comercial</b>	<b>Fabricante</b>
<b>Máquina de soldar</b>	Power Wave - R500	Lincoln Electric
<b>Módulo de transferencia</b>	Módulo STT (Surface Tensile Transfer)	Lincoln Electric
<b>Alimentador</b>	Autodrive - 4R220	Lincoln Electric
<b>Antorcha</b>	Magnum Pro 500 (Enfriada por aire)	Lincoln Electric
<b>Robot</b>	Arc Mate 120iC	Fanuc

### 3.5 Diseño y dimensiones de la junta

El tipo de junta a tope fue empleada para las pruebas de soldabilidad de esta aplicación, en la cual el objetivo es reducir la cara de la soldadura y el refuerzo de cara, para no llevar a cabo un retrabajo posterior en la zona de unión.

La abertura de raíz fue de 1.5 mm para poder obtener una penetración adecuada con el diámetro de alambre usado. Para cuidar de esta abertura de raíz, el herramental contaba con posicionadores y clamps, para evitar que las piezas perdieran posición.

### 3.6 Resumen y parámetros de soldadura.

En la Tabla 3.6, se muestra un resumen de las pruebas de soldabilidad y los parámetros de soldadura usados en cada uno de los cupones. Debido a la poca disponibilidad de material y al tamaño de los cupones se distribuyeron las pruebas para su análisis de la siguiente manera. Las pruebas obtenidas del ensayo 2 y 5 fueron ensayadas por doblez, mientras que las muestras 1, 4 y 6 fueron seccionadas según la norma ASTM E8/E8M para la obtención de su ensayo de tensión y microdurezas. Cabe mencionar que de cada cupón se obtuvieron dos probetas por lo que estas se realizaron por duplicado. Y todas fueron analizadas macroscópicamente; en la Figura 3.6 se muestran los cortes según la norma de las probetas 1, 4 y 6.



**Figura 3.6 Corte de las probetas 1, 4 y 6, según la norma para realizar el ensayo de tensión.**

**Tabla 3-6 Resumen de parámetros y equipo implementado en las pruebas de soldabilidad.**

Gas de Protección	Número de muestra	Tipo de transferencia	Transferencia Lincoln	Velocidad de avance (cm/min)	Velocidad de Alimen. (cm/min)	Voltaje (V)	Amperaje (A)
<b>Mezcla de Gas: 90% Ar - 10% CO<sub>2</sub></b>	Muestra 1	Pulsos	Precision Pulse	76.2	812.8	22.5	225.6
	Muestra 2	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	13.6	125 (300 peak, 65 background)
	Muestra 3	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	13.8	130 (300 peak, 65 background)
	Muestra 4	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	13.6	122 (300 peak, 65 background)
<b>Mezcla de Gas: 75% Ar - 25% CO<sub>2</sub></b>	Muestra 5	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	14.5	134.4 (310 peak, 75 background)
	Muestra 6	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	14.2	130 (310 peak, 65 background)
	Muestra 7	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	14.8	125.4 (310 peak, 65 background)
	Muestra 8	Corto Circuito Modificado	STT ( Surface Tensile Transfer)	50.8	355.6	14.8	122.8 (310 peak, 65 background)

### 3.7 Calor de entrada y efecto en las muestras.

Se realizó el cálculo del calor de entrada para las muestras realizadas por medio de GMAW con transferencia STT. En la Tabla 3.7 se muestran los valores del calor de cada uno de los cupones.

**Tabla 3-7 Cálculo de entrada de calor**

Número de muestra	Velocidad de avance (cm/min)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Calor (kJ/mm)
<b>Muestra 1</b>	76.2	22.5	225.6	0.4
<b>Muestra 2</b>	50.8	13.6	125	0.201
<b>Muestra 3</b>	50.8	13.8	130	0.212
<b>Muestra 4</b>	50.8	13.6	122	0.196
<b>Muestra 5</b>	50.8	14.5	134.4	0.23
<b>Muestra 6</b>	50.8	14.2	130	0.218
<b>Muestra 7</b>	50.8	14.8	125.4	0.219
<b>Muestra 8</b>	50.8	14.8	122.8	0.215

Revisando los valores arrojados por la Tabla 3.7 en la cual se puede observar que la muestra con menor calor de entrada fue la muestra N°4 con 0.196 kJ/mm, y la muestra N°1 muestra mayor entrada de calor de 0.4 kJ/mm. Posteriormente se realizaron ensayos para analizar los efectos que presenta una muestra respecto a la otra.

## 4. CAPITULO 4: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

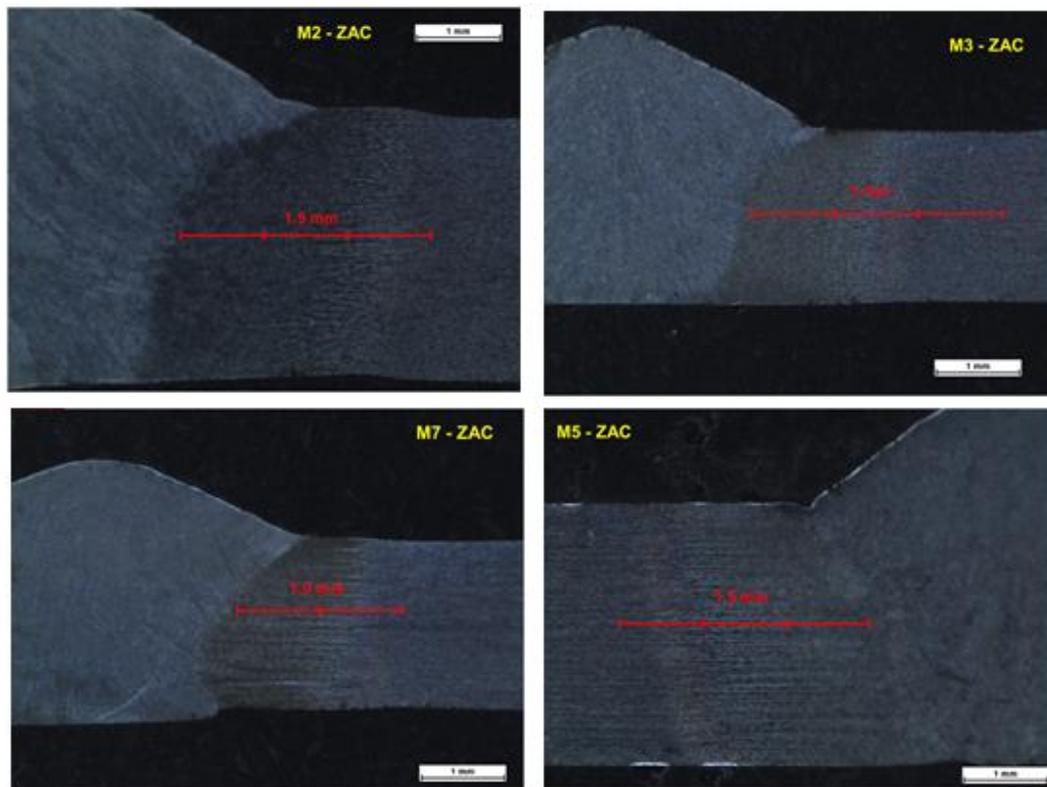
Para este estudio las pruebas realizadas en la caracterización de los cupones fueron los siguientes: microscopía para analizar su microestructura en las tres zonas (ZF: Zona de fusión, ZAC: Zona afectada por el calor y MB: Metal base), fractografía por medio de estereoscopio y microscopio electrónico de barrido, ensayo de tensión y ensayo de dobléz.

### 4.1 Macrografías

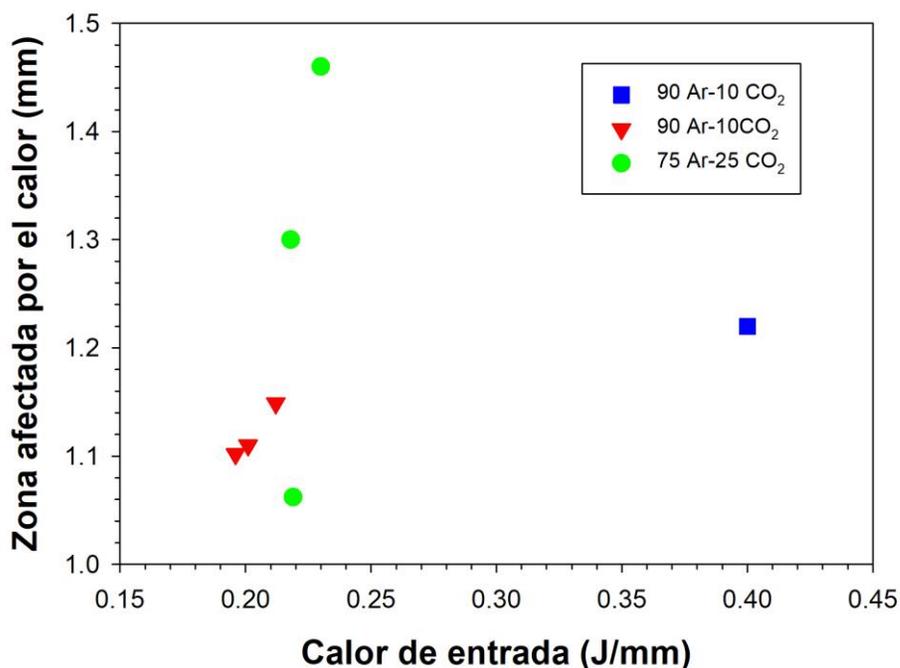
Se realizaron mediciones de las ZAC por medio de un estereoscopio en las muestras M2, M3, M5 y M7, las cuales presentaron valores similares en el calor de entrada.

En la Figura 4.1 se presentan las ZAC de las muestras M2, M3, M5 y M7, las cuales muestran una zona afectada por el calor por debajo de los 2 mm. En la Figura 4.2 se muestra la relación existente entre la entrada de calor y el tamaño de la ZAC. Se observa que usando el modo de transferencia propuesto y para la mezcla 75Ar-25CO<sub>2</sub> el tamaño de la ZAC es variable oscilando entre 104-1.47 mm, mientras que al usar la mezcla 90Ar-10CO<sub>2</sub> se observa un comportamiento homogéneo teniendo un valor promedio de 1.12 mm. Mientras

que para el caso del modo de transferencia normal y una mezcla de 90Ar-10CO<sub>2</sub> el tamaño de la ZAC fue de 1.4 mm.



**Figura 4.1** Dimensión de la ZAC en las muestras M2, M3, M5 y M7.



**Figura 4.2 Relación de la zona afectada por el calor y el calor de entrada.**

## 4.2 Prueba de doblez

Para comprobar la sanidad de la soldadura se realizaron pruebas de doblez, que se trata de una prueba destructiva. Las probetas ensayadas en estas pruebas se sometieron a diferentes parámetros de soldadura. En la Tabla 3.6 se muestran los valores de cada uno de los parámetros con las cuales fueron soldadas las probetas. En la Figura 4.3 se puede notar que la soldadura cuenta con una sanidad correcta ya que la ruptura se muestra en la zona afectada por el calor (ZAC) y no en la zona de fusión (ZF), la ZAC es la zona en la cual se debe enfocar esta investigación ya que pudieron haberse presentado fases con mayor fragilidad.

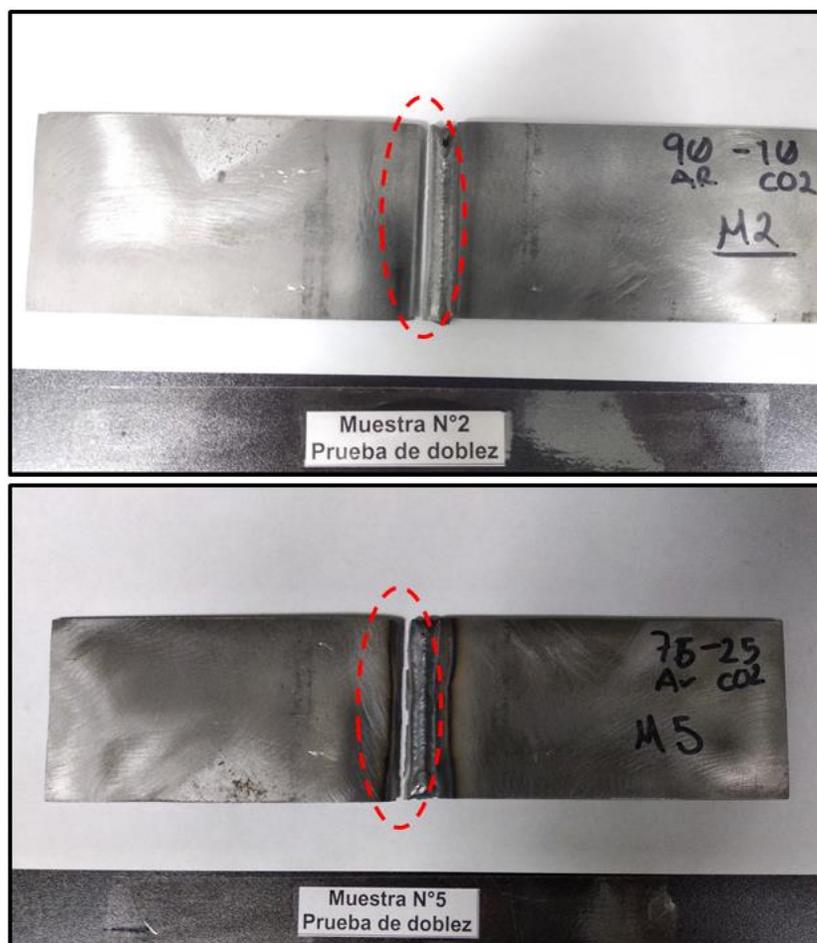
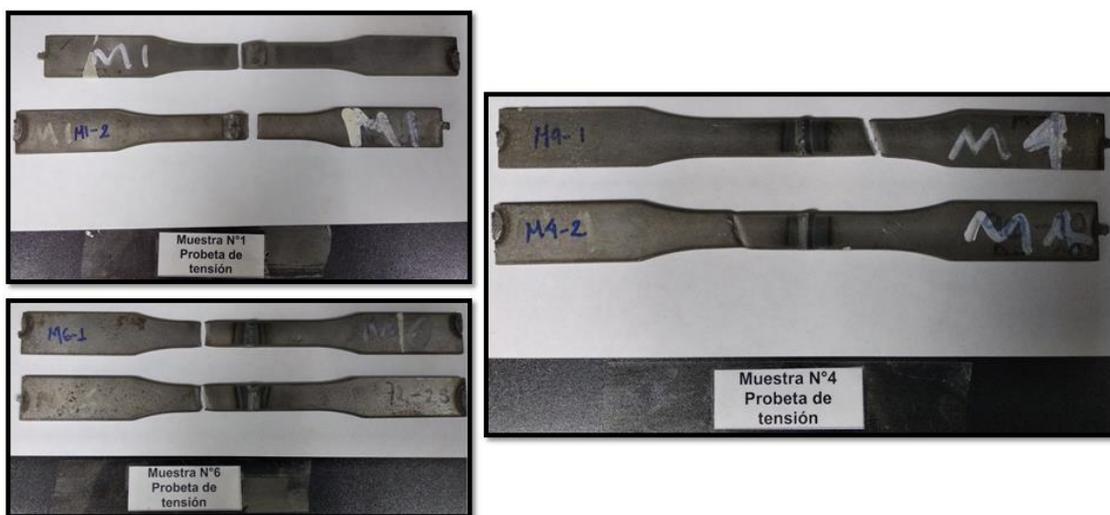


Figura 4.3 Cupones M2 y M5 sometidos a prueba de dobléz.

### 4.3 Ensayo de tensión.

El objetivo de este estudio es encontrar una buena soldabilidad del metal M1300, sin afectar significativamente las propiedades mecánicas del metal base y de la unión (ZF y ZAC)

Las pruebas de tensión se realizaron para analizar la afectación que pudo haber presentado el metal base al ser sometido al proceso de soldadura, los cupones presentaron fracturas en la ZAC y en el metal base como lo muestra la Figura 4.4



**Figura 4.4 Probetas sometidas a ensayo de tensión.**

La probeta número 1 muestra una falla en la ZAC justo al borde de la zona de fusión como se muestra la Figura 4.5, el cupón de soldadura número 1 (M1) tiene una entrada de calor de 0.400 kJ/mm, que es el doble que el resto de los cupones de soldadura, lo cual se esperaba que aquí se presentara esa ruptura.

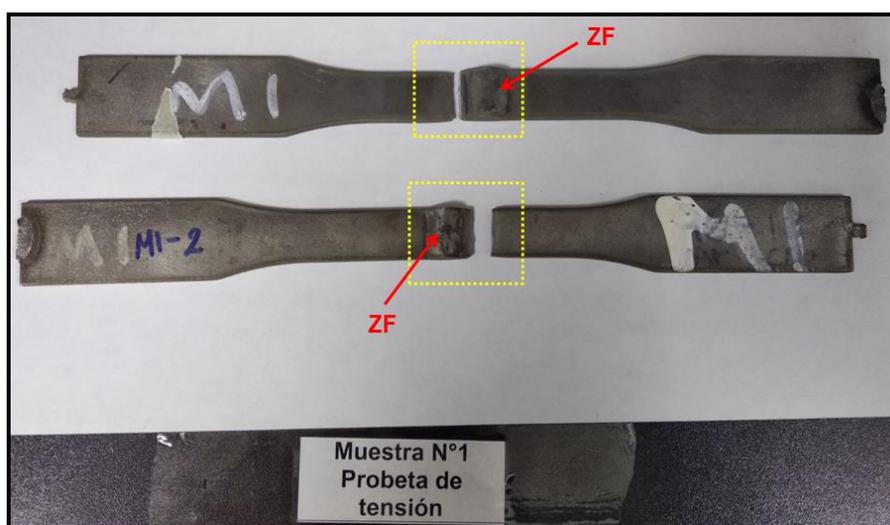
El cupón de soldadura 6 (M6), su fractura tiene un aspecto de fractura dúctil ya que muestra una reducción de área en su sección transversal, este cupón de soldadura al ser sometido a un método de transferencia STT, muestra una afectación menor de calor de 0.218 kJ/mm, su ruptura sucede en el metal base como lo muestra la Figura 4.6.

El cupón de soldadura 4 (M4), su fractura tiene un aspecto muy similar a las que presentaron las probetas de metal base que se sometieron al mismo ensayo de tensión. De igual manera se nota su reducción en el área de la sección transversal como lo muestra la Figura 4.7. Este cupón de soldadura fue el que se unió con la menor entrada de calor registrada de 0.196 kJ/mm.

La Tabla 4.1 muestra el resumen de los resultados generados del ensayo de tensión.

**Tabla 4-1 Resumen de ensayo de tensión a cupones de soldadura.**

Tensión de cupones de soldadura					
Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga máxima (kg)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de ruptura
M1-1	2.08	12.59	2230	835	ZAC
M1-2	2.1	12.49	2200	823	ZAC
M4-1	2.12	12.65	2370	867	MB
M4-2	2.09	12.52	2340	877	MB
M6-1	2.1	12.6	2210	819	MB
M6-2	2.1	12.8	2250	821	MB



**Figura 4.5 Muestra N°1, fractura justo en el borde de la ZAC.**

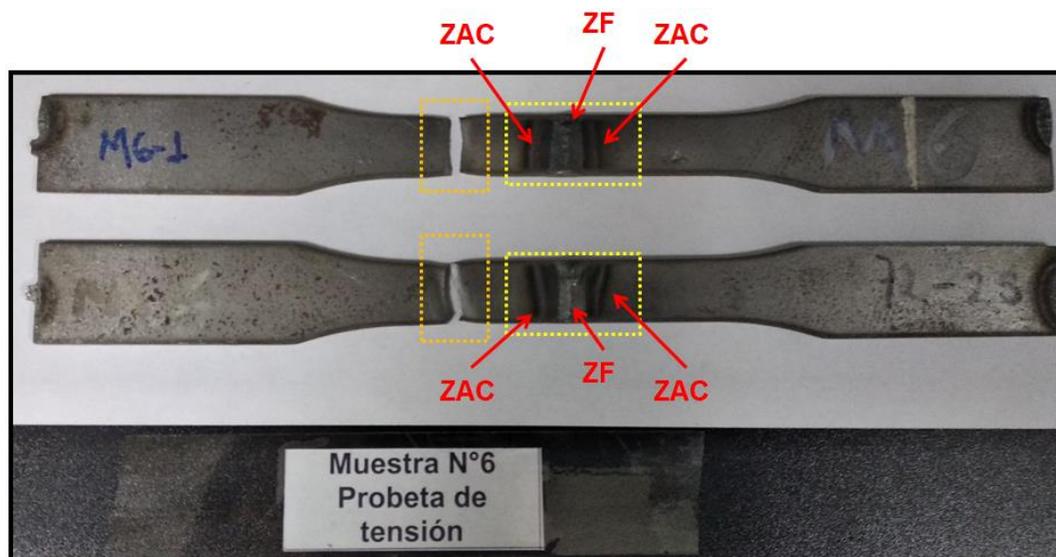


Figura 4.6 Muestra N°6, fractura en el metal base.

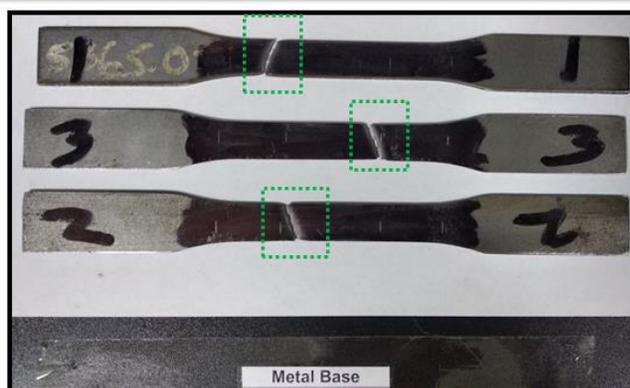
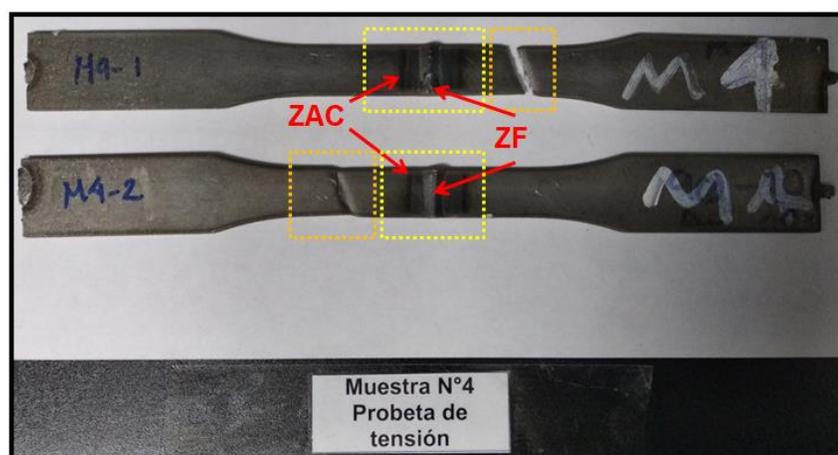


Figura 4.7 Muestra N° 4, fractura en metal base similar a metal base sin soldar.

Los ensayos a tensión de las muestras exhiben un comportamiento de material dúctil, ya que se presenta la curva de deformación típica de este tipo de materiales

La muestra N°1 presenta ruptura en la ZAC, su deformación es menor las muestras M4 y M6, sin embargo, la que muestra un mejor comportamiento es la M4 ya que alcanza esfuerzos alrededor de los 860-870 MPa, sobrepasando el esfuerzo máximo de tensión del metal base. En la Figura 4.8 se ilustra el comportamiento de cada una de las probetas.

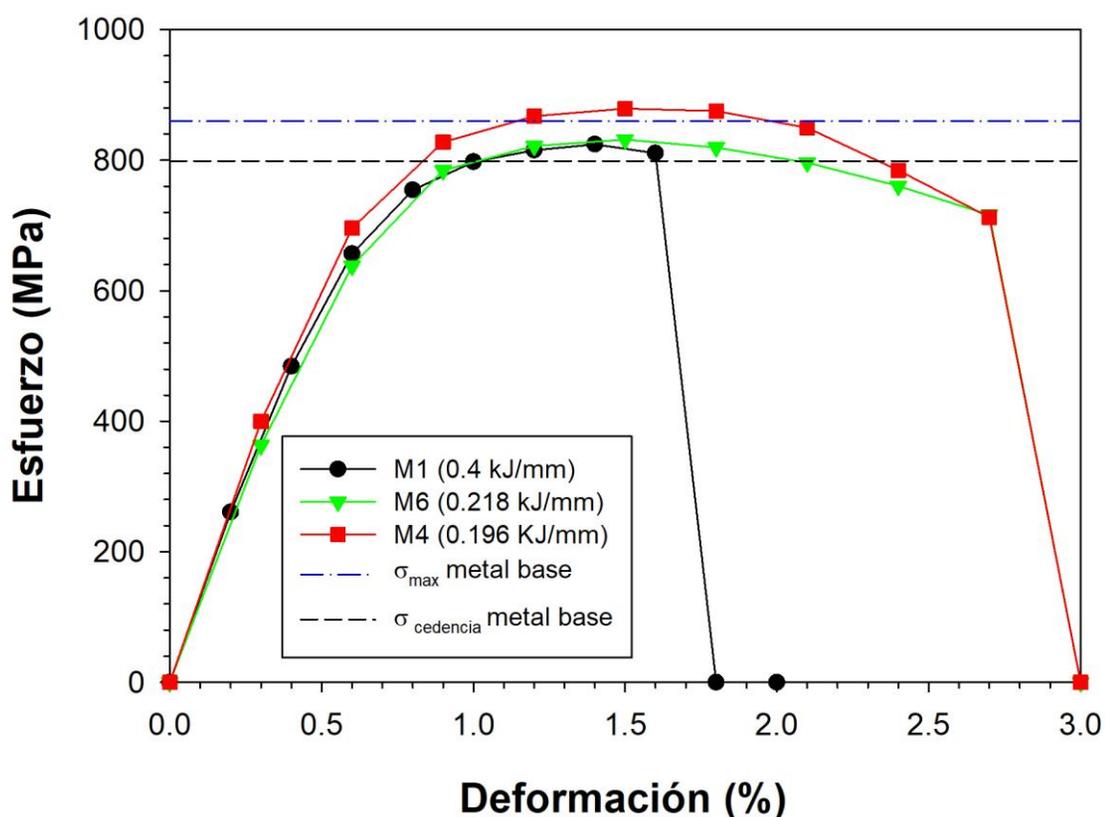
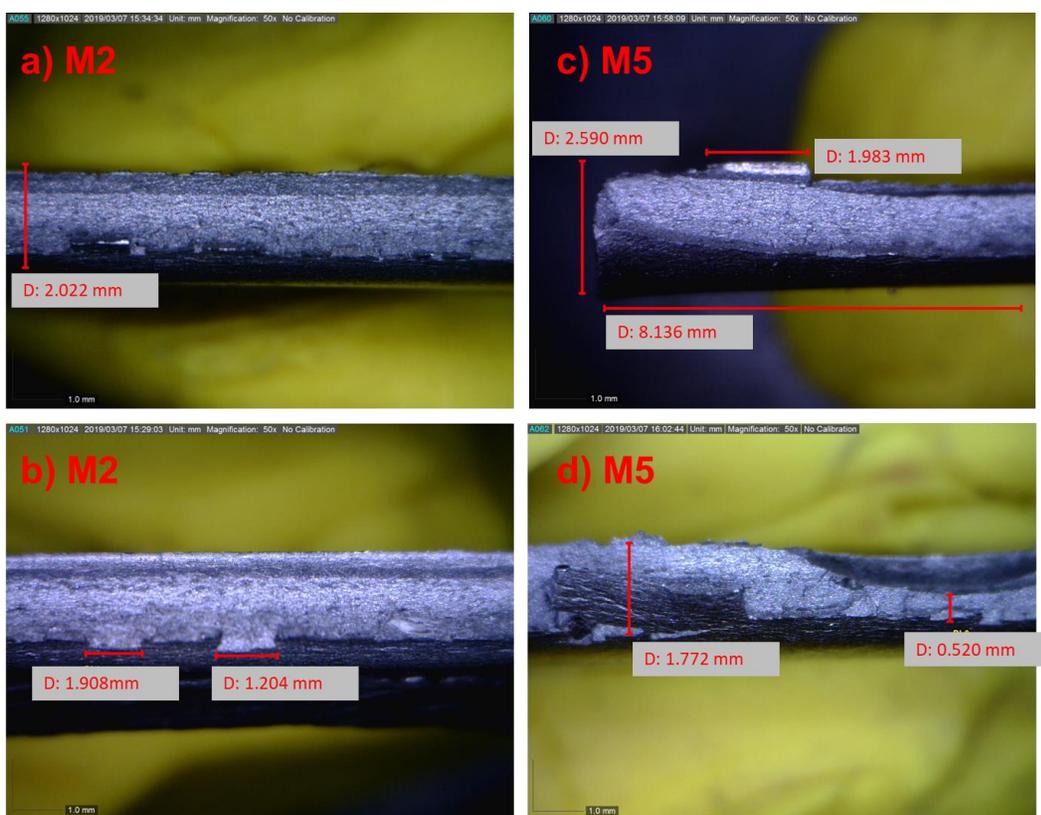


Figura 4.8 Relación entre el esfuerzo y la deformación par diferentes calores de entrada.

## 4.4 Fractografía

Para el análisis de la fractografía se obtuvieron imágenes con el estereoscopio y el microscopio electrónico de barrido. En la Figura 4.9, se muestran las macrográficas de las zonas de ruptura de las pruebas de doblez M2 y M5, las imágenes muestran zonas fibrosas y opacas, típicas de las fracturas dúctiles en los metales, otra característica que se presenta es un borde dúctil de ruptura, donde se desgarra el material y se muestra la reducción de área transversal de la probeta.

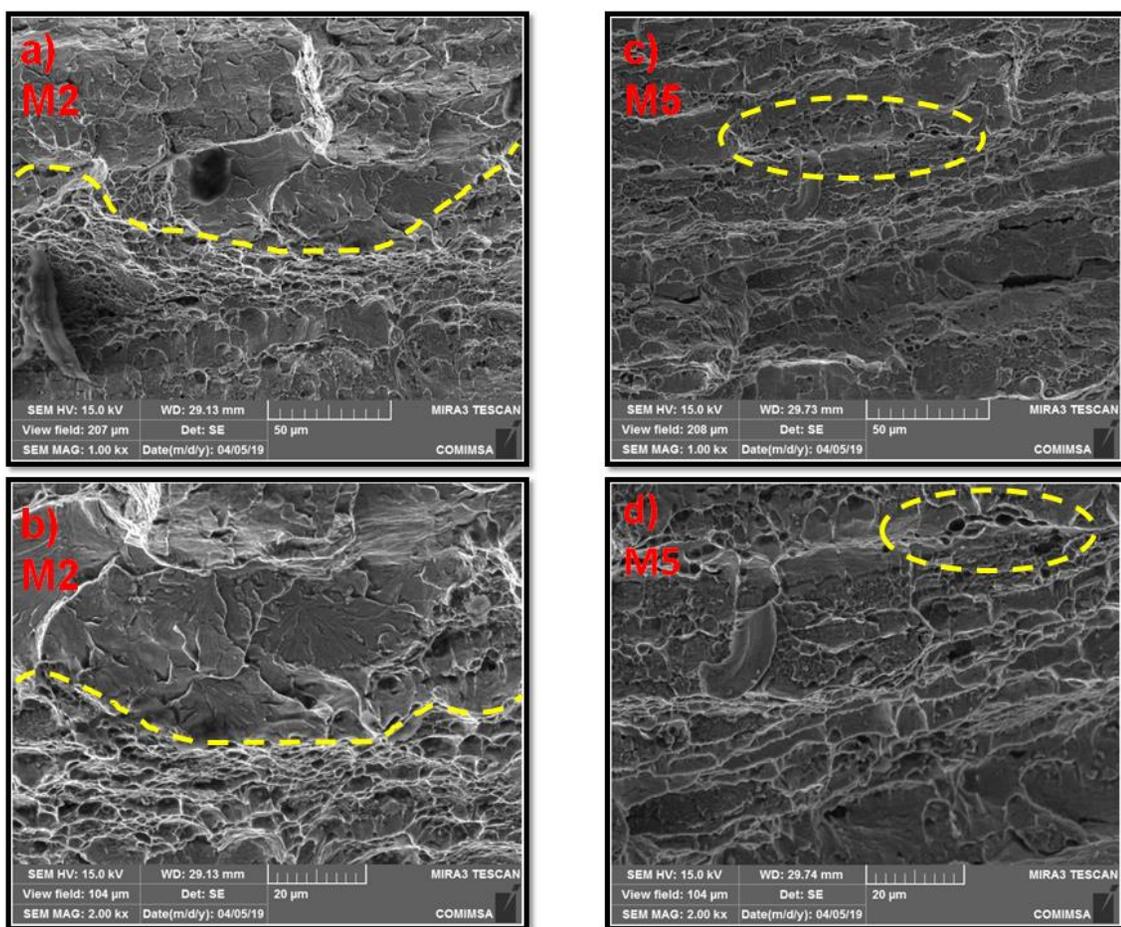
Los cupones de soldadura se realizaron con dos mezclas de gases de protección: 90% - Ar / 10% - CO<sub>2</sub>; para la muestra M2 y 75% - Ar / 25% - CO<sub>2</sub>; para la muestra M5.



**Figura 4.9 Macrográficas por estereoscopio de las muestras M2 y M5 a) y b) fractura con borde dúctil de la M2; c) y d) fractura dúctil con reducción de área significativa.**

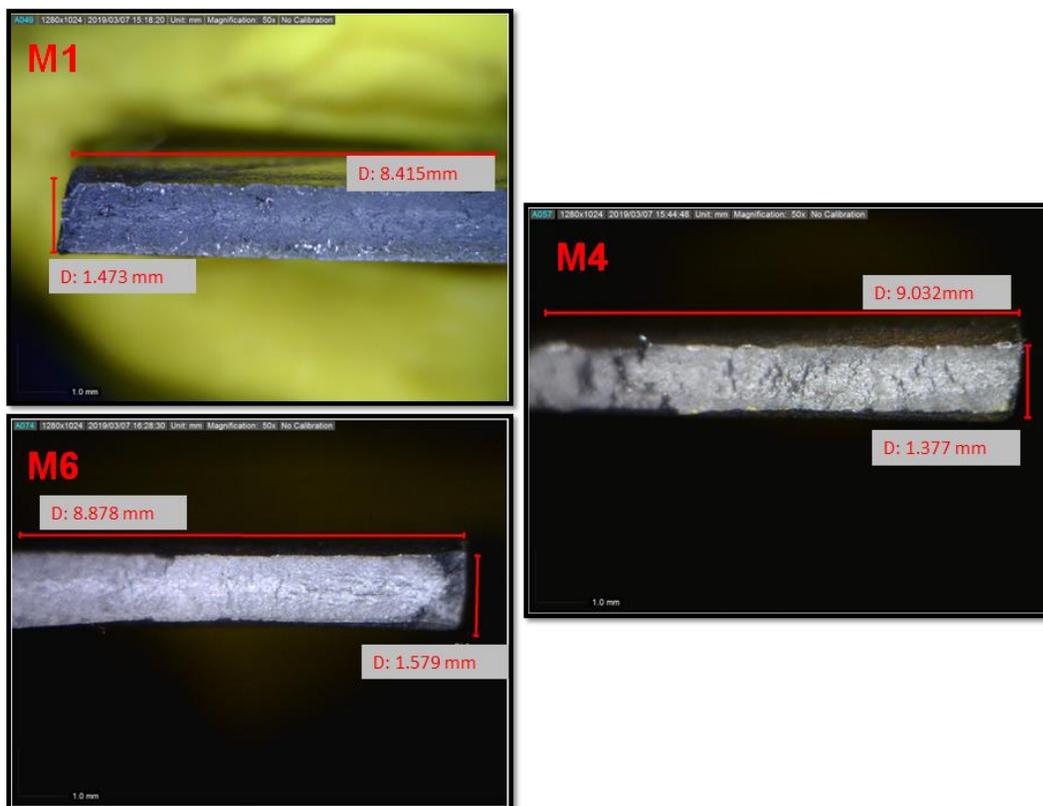
En la Figura 4.10 se muestran las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido, en donde presentan microcavidades (dúctil) y clivaje (frágil) por la morfología presente en la zona de ruptura, las líneas amarillas indican los límites en las zonas de falla dúctil y frágil. La Figura 4.3 indica que la ruptura de estas probetas sucedió en la ZAC.

La diferencia de gases muestra efecto en la zona de ruptura ya que las cantidades de microcavidades se ven reducidas al tener una relación mayor de CO<sub>2</sub> en la mezcla. A continuación se presentan los resultados para las pruebas de tensión realizadas en las muestras M1, M4 y M6; examinadas en la zona de fractura.



**Figura 4.10** Imágenes obtenidas por MEB de la zona de fractura, a) Muestra 2 a 1000x, b) Muestra 2 a 2000x, c) Muestra 5 a 1000x y d) Muestra 5 a 2000x

En la Figura 4.11 se observan las imágenes del estereoscopio, la cual se observa una reducción de la sección transversal, la superficie opaca y fibrosa propia de la fractura dúctil. Estas imágenes no aportan la suficiente información para discernir diferencias entre ellas, por lo cual también fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido.

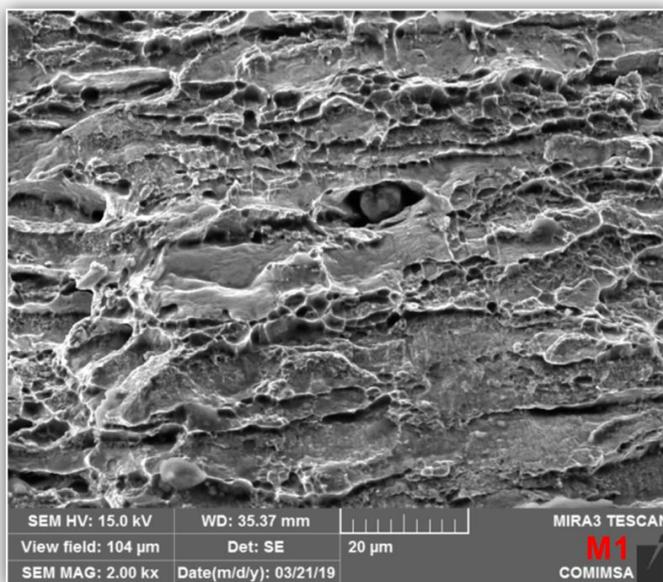
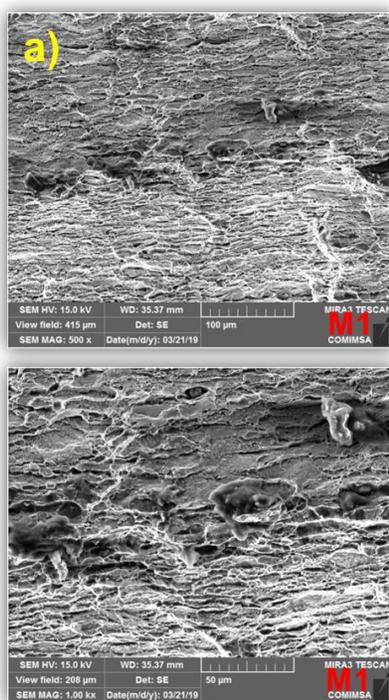


**Figura 4.11 Macrografías de las muestras M1, M4 y M6, bajo un estereoscopio.**

En la Figura 4.12 se muestran las macrografías de fractura para las muestras M1, M4 y M6, observadas a 500x, 1000x y 2000x. Se observa la presencia de microcavidades y clivaje en la zona de ruptura de las tres muestras. Dentro de las muestras analizadas, la muestra M4 muestra microcavidades y pocas zonas de clivaje. Resultados previos indican que sus propiedades mecánicas son más elevadas al ser la muestra con el valor menor

de entrada de calor y la cual soporto esfuerzos de 877 MPa similares a las probetas de metal base.

Las muestras M1 y M6, presentan menor cantidad de microcavidades, lo cual indica una reducción significativa de las propiedades mecánicas de este acero ya que en sus ensayos de tensión presentaron valores de esfuerzo muy similares dentro del rango de los 819 – 830 MPa, estas probetas experimentaron diferentes entradas de calor, indicando que la M1 (0.4 kJ/mm) tiene una mayor entrada de calor y la M6 (0.196kJ/mm) menor.



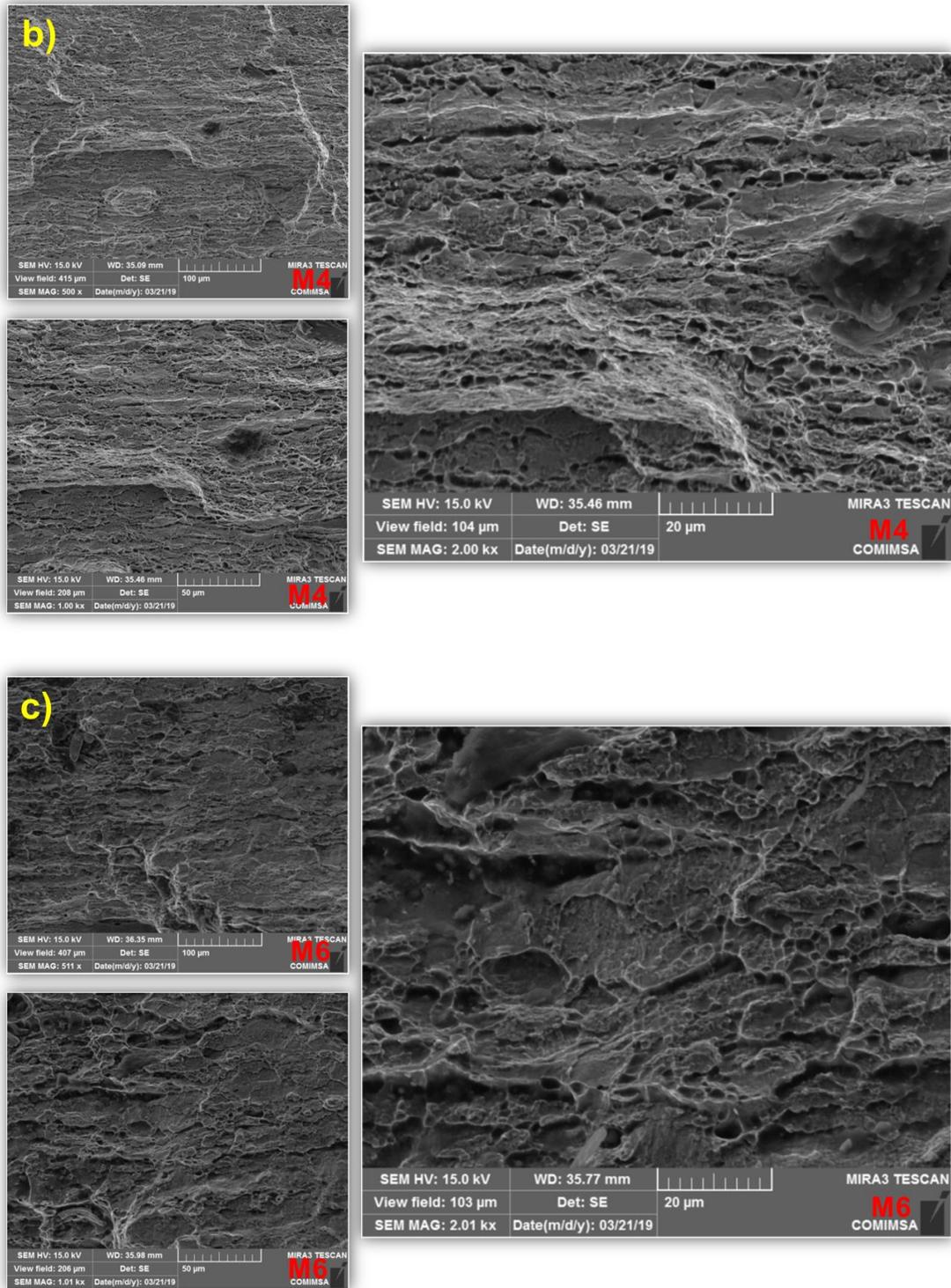


Figura 4.12 Microscopía electrónica de barrido a 500x, 1000x y 2000x, de las muestras a) M1, b) M4 y c) M6.

Para complementar la información de la fractografía, se realizó un ensayo no destructivo en el cual se obtuvieron las durezas de las muestras en tres zonas: ZF, ZAC y MB.

En la Figura 4.13 se presentan los resultados de estos ensayos, en la cual se puede destacar que la muestra M1 con mayor calor de entrada tiene el valor más grande de dureza arriba de los 450 HV<sub>300</sub>.

En los resultados de M4 y M6, se aprecia una mayor repetitividad de sus durezas, la muestra M6 presume de tener fases más duras (martensita) que la M4. Lo cual coincide con lo encontrado en el análisis de fractografía donde se tiene una menor cantidad de microcavidades.

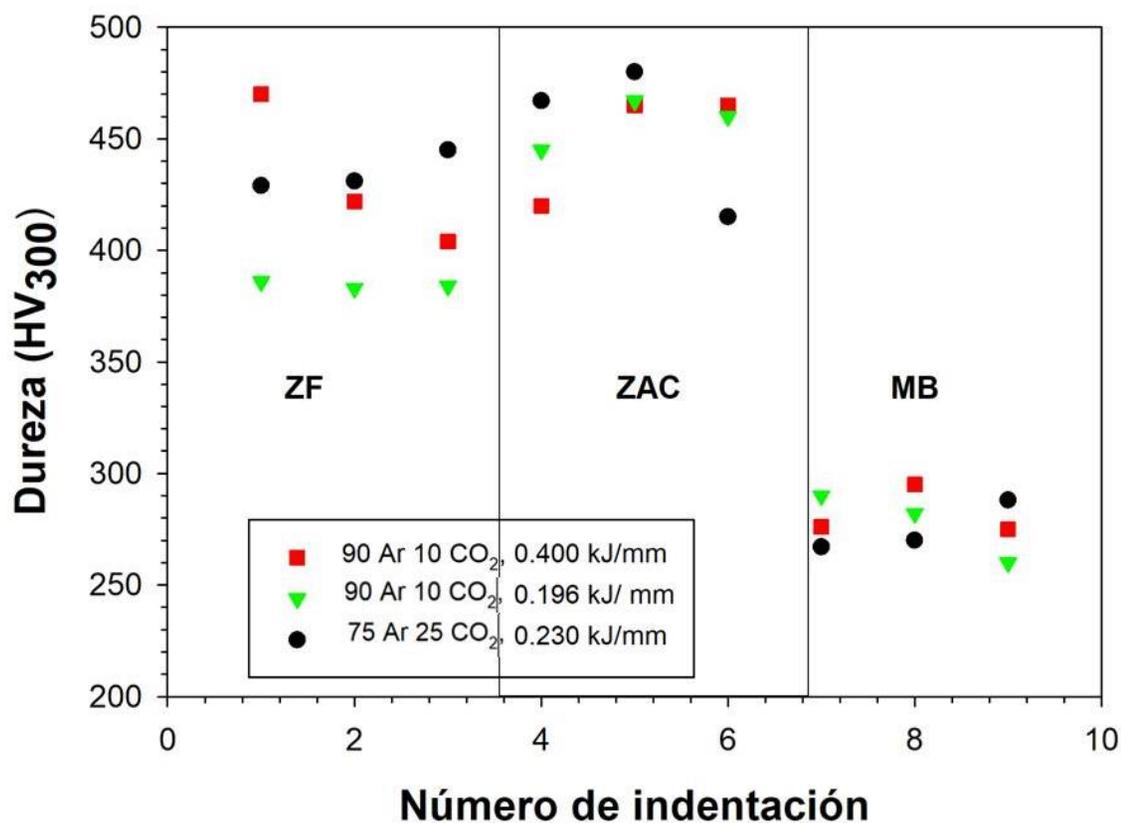


Figura 4.93 Ensayo de dureza en muestras M1 (Cuadros rojos), M4 (triángulos verdes) y M6 (círculos negros).

## 4.5 Metalografía

Se realizó el análisis metalográfico usando un microscopio óptico para apreciar las transformaciones de fase que presentaron los cupones de soldadura en un área cercana a la zona de fusión. En la Figura 4.14 se presentan una serie de imágenes de las fases presentes después del proceso de soldadura. Se observa que el metal base Figura 4.14.5 muestra una microestructura inicial compuesta de ferrita y perlita, después la ferrita es enriquecida con carbono por la disolución de la perlita, la cual al enfriarse da origen a fases como bainita y martensita, observándose en gran medida la presencia de bainita y de ferrita aislada en la Figura 4.14.4 y de solo bainita en la Figura 4.14.3, sin embargo, en la Figura 4.14.2 en la matriz se observa en mayor proporción la presencia de martensita. Por otro lado, en la Figura 4.14.1 se muestra la microestructura en la zona de fusión el cual consiste en bainita inferior en mayor proporción. Jue Lu y colaboradores [12] encontraron que aceros con composiciones químicas similares al someterse a temperaturas altas, la matriz ferrítica con bandas de perlita transforma a martensita y bainita.

En la Figura 4.15, se muestran las zonas de interés para caracterizar las muestras de soldadura. Se observa la zona de fusión, que es una zona donde se realiza el crecimiento columnar y en la zona afectada por el calor se alcanzan a distinguir dos zonas, una de grano fino (ZAC F) y otra de grano grueso (ZAC C).

En las zonas afectadas por el calor se pueden apreciar transformaciones martensíticas y bainíticas como se esperaba en este tipo de metal ya que el contenido de boro favorece tales condiciones

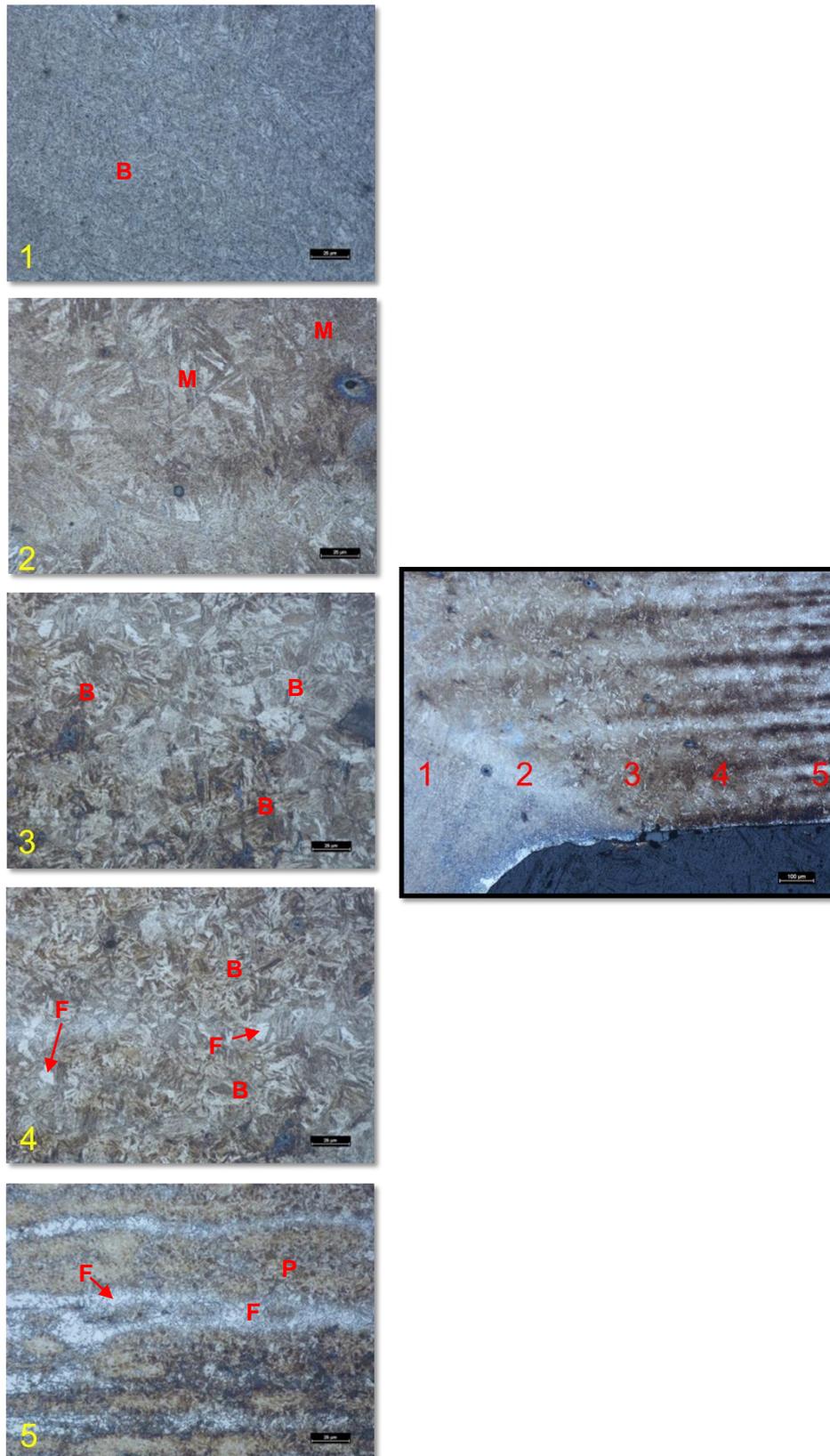


Figura 4.10 Metalografía de diferentes zonas de la M2.

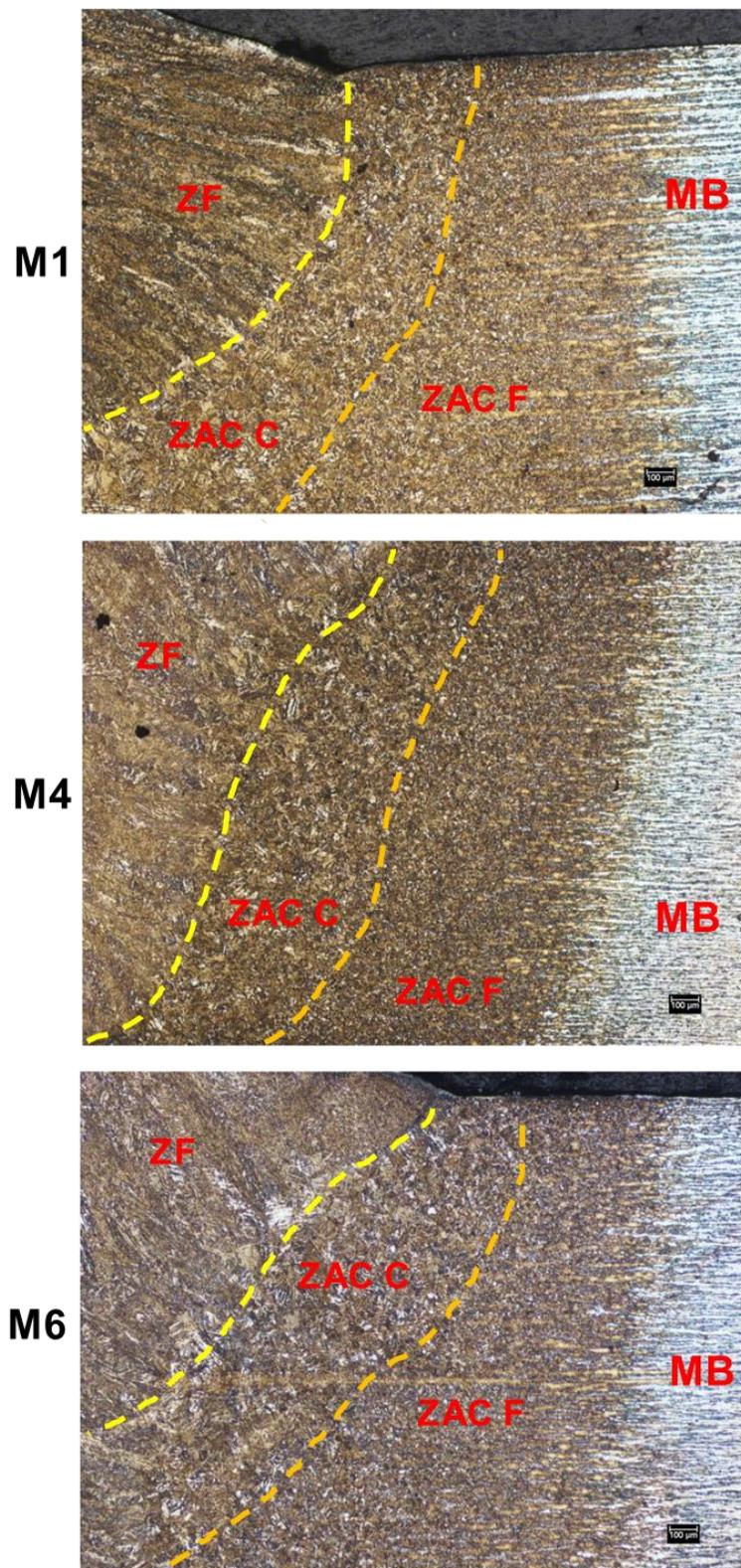
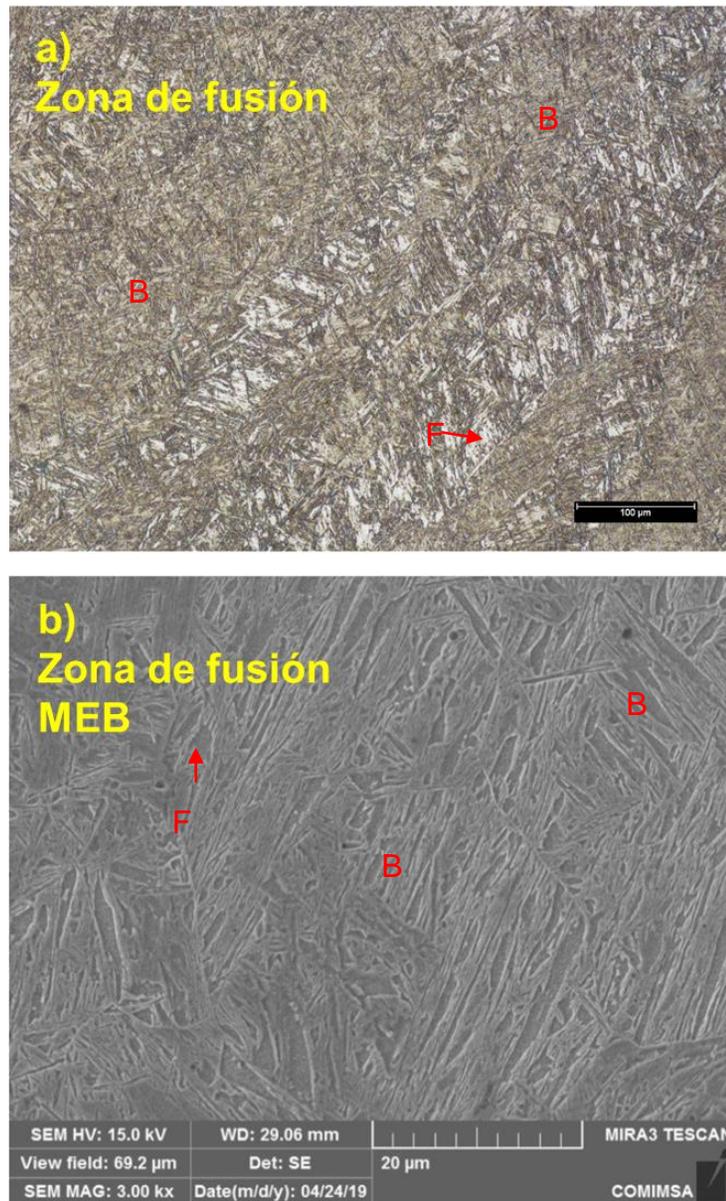


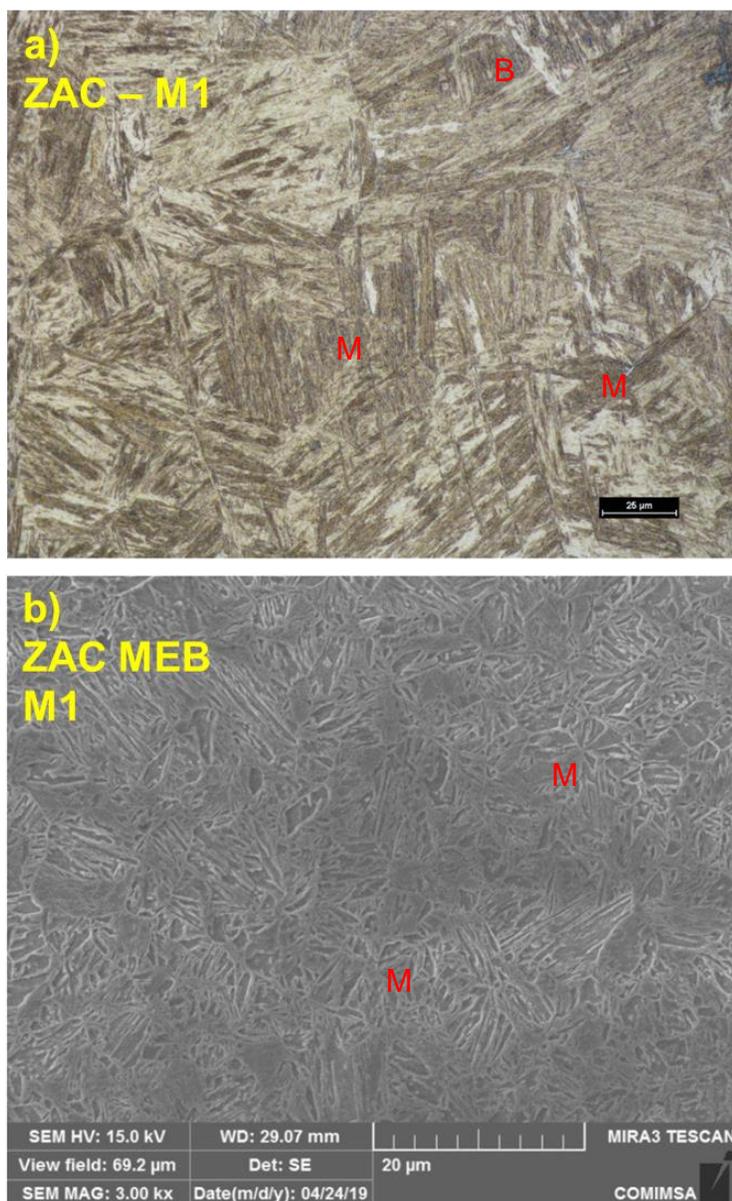
Figura 4.115 Metalografía de M1, M4 y M6 a 50x, donde se aprecian las tres zonas.

En la Figura 4.16 se muestran las microestructuras de la zona de fusión. El inciso a) presenta una microestructura de la zona de fusión a 50x por medio de un microscopio óptico y el inciso b) muestra la microestructura por un microscopio electrónico de barrido. Se aprecia una microestructura similar a la bainita inferior y su aspecto puede ser comparado con el de la martensita, la bainita inferior cuenta con una forma acicular (agujas) paralelas entre sí, el cual se puede corroborar con las durezas obtenidas en el ensayo.



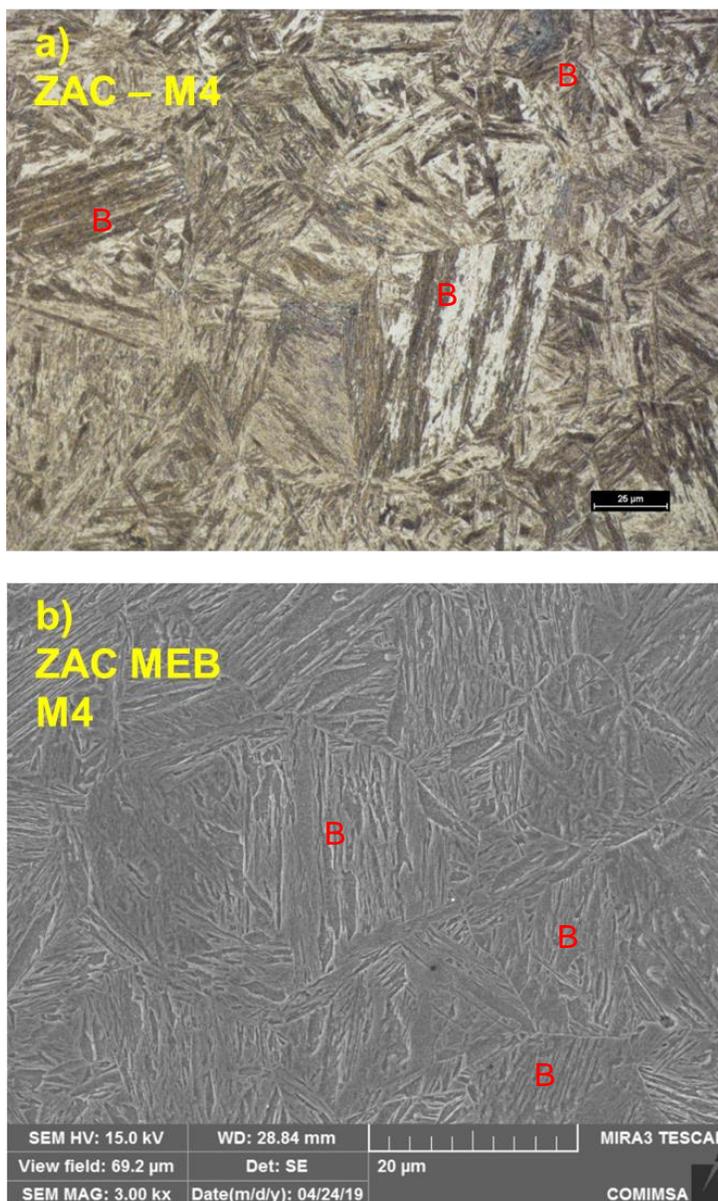
**Figura 4.126** Microestructura de la zona de fusión a) imagen de microscopio óptico a 50x, b) imagen de microscopio electrónico de barrido a 3000x

En la Figura 4.17 se observan las microestructuras de la zona afectada por el calor de la M1, el inciso a) presenta la microestructura de la zona afectada por el calor a 50X con un microscopio óptico y el b) muestra las imágenes obtenidas por un microscopio electrónico de barrido a 3000x en la cual presenta la morfología de listones dentro de los granos paralelos entre sí, lo cual es común en una microestructura martensítica.



**Figura 4.137 Microestructura martensítica en la ZAC de la muestra M1, a) imagen a 50x, b) imagen a 3000x.**

En la Figura 4.18 se observa la microestructura de la zona afectada por el calor de la M4, que consiste en una microestructura bainítica como matriz con pequeñas zonas que sugieren ser de martensita.



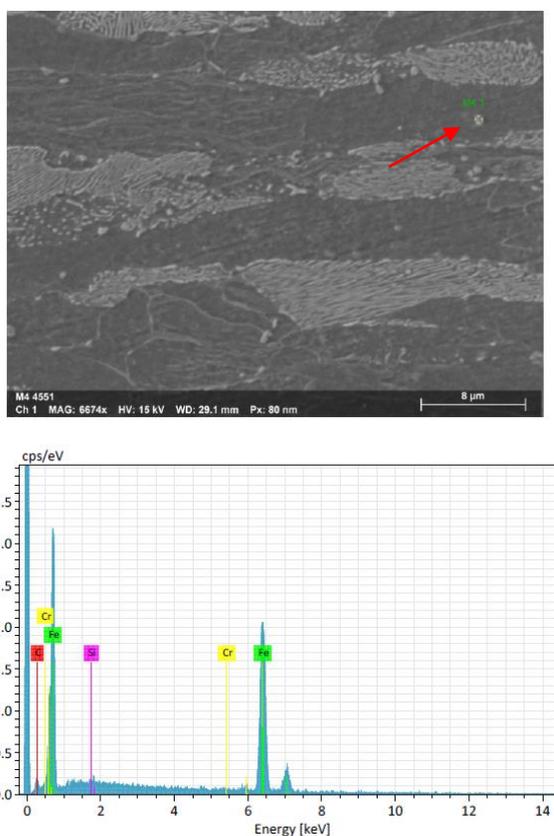
**Figura 4.14 Microestructura bainita inferior en la ZAC de la muestra M4, a) imagen a 50x, b) imagen a 3000x.**

Para la función de este tipo de aceros, se requieren buenas propiedades mecánicas y tribológicas para soportar esfuerzos grandes, desgaste, tenacidad, etc. Los resultados obtenidos sugieren que la fractura temprana de la M1 es debido a que la ZAC no muestra la transformación bainítica si no una

transformación en su mayor parte martensítica lo cual promueve mayor fragilidad, de ahí que su elongación sea menor.

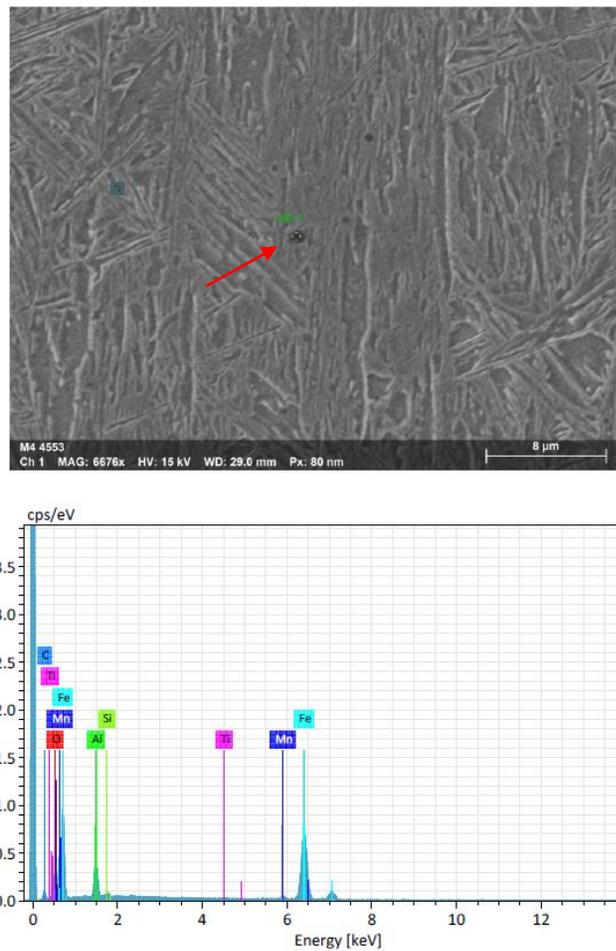
Como estudio complementario se realizó un análisis químico semicuantitativo con electrones dispersados característicos (EDS), donde destaca la composición química de partículas observadas en la microestructura.

En las zonas que se analizaron se encontraron elementos como Fe, Cr, Mn, C y Si como lo muestra la Figura 4.19, lo cual sugiere que algunos de estos elementos se encuentran en el metal base como carburos ya que elementos como Fe, Cr y Mn tienden a formarlos al ser alfégenos, estos distribuidos en la matriz ferrítica, tienden a reforzarla y a incrementar su resistencia al igual que los boruros los cuales no fueron identificados.



**Figura 4.159 Análisis EDS en carburos encontrados en el metal base.**

En la Figura 4.20 se muestra la microestructura post soldadura (martensita) en donde se detectaron partículas, las cuales fueron analizadas mediante la técnica EDS. El análisis indica que estas están compuestas por elementos como O, Si, Al, Fe, Ti, Fe y Mn. La presencia de O sugiere inclusiones globulares formadas principalmente por alúmina enriquecidas con manganeso provenientes desde etapas primarias de aceración.



**Figura 4.20 Análisis por EDS en el metal post soldadura, donde se muestran ciertos elementos que mejoran las propiedades mecánicas.**

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en este estudio de soldabilidad de un acero martensítico M1300 usado dentro de la industria automotriz, se puede concluir lo siguiente:

- Las piezas soldadas por GMAW mostraron buena sanidad, lo cual fue evaluado por dobléz, los resultados obtenidos en la fractografía dictan una falla cuasi frágil con microcavidades y clivaje, además de poseer una buena resistencia a la tensión (860-870 MPa).
- Las fases encontradas en las zonas de fusión es bainita y en la zona afectada por el calor una mezcla de martensita y bainita.
- Es posible emular las propiedades mecánicas del material base y la soldadura cuando se presenta en la zona afectada por el calor como fase predominante la bainita.
- Las condiciones que presentan el mejor comportamiento mecánico son cuando el calor de entrada fue menor (muestra M4 - 0.196 kJ/mm) la cual presenta ausencia de martensita en la zona afectada por el calor.
- La variación del modo de transferencia STT para GMAW propuesto por Lincoln Electric permitió obtener la buena soldabilidad del componente,

abriendo la posibilidad a soldar aceros avanzados de alta resistencia por este proceso convencional.

- De forma complementaria faltaría validar nuevamente estos ensayos y adicionalmente llevarlo a la siguiente etapa de procesamiento que es el conformado para ver si no existe alguna complicación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] T.B. Hilditch, T. de Souza, P.D Hodgson, *“Properties and automotive applications of advanced high-strength steels”*, Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), cap 2, pp. 9-28, 2015.
  
- [2] OTEA: Observatorio Tecnológico del Metal. *“Aceros Avanzados de Alta AHSS”*, 2008
  
- [3] J.F Lancaster, *“Metallurgy of Welding”*, Springer Netherlands, 1980
  
- [4] A. S. M. I. Handbook, *“ASM handbook: (Welding, Brazing and Soldering)”*, ASM Int., vol. Volumen 6, pp. 569–581, 2006.
  
- [5] THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY, *“Invertec STT II Advanced Welding”*, 2012.
  
- [6] AWS: American Welding Society, WIT-T, Doral FL: American Welding, 2000.

- [7] H. S. Carslaw and J.C. Jaeger "*Conduction of Heat in Solids*"; Segunda edición, Oxford University Press, Oxford, 1959.
- [8] Klas Weman, "*Welding processes handbook*", Woohed Publishing Ltd, Cambridge England, 2003.
- [9] Dieter George Ellwood, "*Metallurgy and Metallurgical Engineering*", New York, McGraw-Hill, 1961.
- [10] Rodríguez Vázquez Carlos Alfonso, "*Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras*", San Nicolás de los Garza Nuevo León: UANL, 2013.
- [11] Ipohorski Miguel; Acuña R.J., "*Fractografía-Aplicaciones al Análisi de Fallas*", Buenos Aires, Argentina. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), 1988.
- [12] Jue Lu, Yanli Song, Lin Hua, ianing Liu, Yuhan Shen, "*Influence of thermal deformation conditions on the microestructure and mechanical properties of boron steel*", Material Science & Engineering, Volumen A, pp. 328-337, 2017.
- [13] Kornél Májlínger, Eszter Kalácska, Pasquale Russo Spena. "Gas Metal Arc Welding of Dissimilar AHSS Sheets", 2016.
- [14] Svoboda Hernán G., Nadale Horacio C., "*Fatigue life of GMAW and PAW welding joints of boron microalloyed steels*", Procedia Materials Science 9, pp. 419-427, 2015.
- [15] General Motors Worldwide (GMW), "*Pre-coated or Uncoated Low*", 11<sup>th</sup> edition, 2016.
- [16] THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY, "*SUPERARC LA-90. MIG (GMAW) WIRE*", Lincoln Global, Inc, 2016.

- [17] ASTM International, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic", Rev 16A, 2008
- [18] Secretaria de Economía, "*La Industria Automotriz Mexicana: Situación Actual*", Secretaría de Economía, Ciudad de México, 2016
- [19] MatWeb, LLC.  
<http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=boron>
- [20] Brad L. Kinsey and Xin Wu, "*Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing*", Woodhead Publishing, pp. 0-240, 2011.
- [21] Alvarado Gutierrez Ariana Lissbeth. "*Análisis Microestructural y de Propiedades Mecánicas a Temperaturas Elevadas de Aceros Avanzados de Alta Resistencia Para el Conformado en Caliente*". Nuevo León, México: UANL, 2013.
- [22] Pérez Medina Gladys Yerania, "*ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA (AHSS): DOBLE FASE (DP) Y DE PLASTICIDAD INDUCIDA POR TRANSFORMACIÓN (TRIP)*", COMIMSA, Saltillo, Coahuila, México, 2009.
- [23] S. Kang, J. G. Speer, R. W. Regier, H. Nako, S. C. Kennett, and K. O. Findley, "Materials Science & Engineering A The analysis of bainitic ferrite microstructure in microalloyed plate steels through quantitative characterization of intervariant boundaries," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 669, pp. 459–468, 2016.
- [24] W. L. Costin, O. Lavigne, and A. Kotousov, "A study on the relationship between microstructure and mechanical properties of acicular ferrite and upper bainite," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 663, pp. 193–203, 2016.

- [25] S. Kang, J. G. Speer, R. W. Regier, H. Nako, S. C. Kennett, and K. O. Findley, "Materials Science & Engineering A The analysis of bainitic ferrite microstructure in microalloyed plate steels through quantitative characterization of intervariant boundaries," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 669, pp. 459–468, 2016.
- [26] B. L. Bramfitt and S. J. Lawrence, "Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels," *Metallogr. Microstruct.*, vol. 9, pp. 608–626, 2004.

# Índice de figuras

Figura 2.1 Tipos de Chasis [1].	11
Figura 2.2 Partes del Chasis [1].	12
Figura 2.3 Rangos de Resistencia y Elongación de los Aceros [2].	14
Figura 2.4 Micrografía obtenida por MEB de aceros martensíticos (M1200) [1]. .....	15
Figura 2.5 Rangos de elongación y resistencia, de los aceros M [2].	16
Figura 2.6 Esquema de Proceso de Soldadura GMAW [4].	20
Figura 2.7 Funcionamiento por etapas de la transferencia STT de Lincoln [5].	25
Figura 2.8 Junta a tope [6].	27
Figura 2.9 Partes de una junta de soldadura a tope [6].	28
Figura 2.10 Gráfica generada por un material dúctil al someterse a un ensayo de tensión [9].	32
Figura 2.11 Gráfica generada por un material frágil al someterse a un ensayo de tensión [9].	32
Figura 2.12 Influencia de la dirección del esfuerzo en forma de hoyos formados por coalescencia de microhuecos [11].	35
Figura 2.13 Superficies de fractura por clivaje [11].	36
Figura 2.14 Apariencia de fractura por fatiga a) muestra una fractura similar a clivaje, b) superficie de fractura con estrías en pasos [11].	37
Figura 2.15 a) Ruptura de cohesión de una tuerca de acero AISI 8740 debido a la fragilización por hidrógeno b) fractura intergranular de cohesión [11].	37
Figura 2.16 Micrografía óptica de la microestructura inicial del B1500HS [12].	38
Figura 2.17 Microscopía óptica del B1500HS acero al boro deformados a 900°C con tasas de deformación (a) 0.01 s <sup>-1</sup> , (b) 0.1 s <sup>-1</sup> , (c) 1 s <sup>-1</sup> , (d) 10 s <sup>-1</sup> y un rango de enfriamiento de 30 °C/s [12].	40
Figura 2.18 Microestructura de la unión entre aceros TRIP y TWIP [13].	41
Figura 2.19 Grafico que muestra las durezas obtenidas en la sección transversal de la unión entre aceros TRIP y TWIP [13].	42

Figura 3.1 Metalografía obtenida con microscopio óptico con diferentes aumentos a) 50x, b) 100x y c) 1000x.....	48
Figura 3.2 Metalografía a 5000x del metal base en la cual presenta la matriz ferrítica y las bandas de perlita. ....	48
Figura 3.3 Dimensiones de probetas para ensayo de esfuerzo vs deformación [9].....	49
Figura 3.4 Gráfica de prueba de esfuerzo vs deformación de 3 probetas de metal base. ....	50
Figura 3.5 Herramental usado en pruebas de soldabilidad.....	51
Figura 3.6 Corte de las probetas 1, 4 y 6, según la norma para realizar el ensayo de tensión.....	54
Figura 4.1 Dimensión de la ZAC en las muestras M2, M3, M5 y M7. ....	58
Figura 4.2 Relación de la zona afectada por el calor y el calor de entrada.....	59
Figura 4.3 Cupones M2 y M5 sometidos a prueba de doblez.....	60
Figura 4.4 Probetas sometidas a ensayo de tensión. ....	61
Figura 4.5 Muestra N°1, fractura justo en el borde de la ZAC. ....	62
Figura 4.6 Muestra N°6, fractura en el metal base.....	63
Figura 4.7 Muestra N° 4, fractura en metal base similar a metal base sin soldar. ....	63
Figura 4.8 Relación entre el esfuerzo y la deformación par diferentes calores de entrada.....	64
Figura 4.9 Imágenes obtenidas por MEB de la zona de fractura, a) Muestra 2 a 1000x, b) Muestra 2 a 2000x, c) Muestra 5 a 1000x y d) Muestra 5 a 2000x ...	66
Figura 4.10 Macrografías de las muestras M1, M4 y M6, bajo un estereoscopio. ....	67
Figura 4.11 Microscopía electrónica de barrido a 500x, 1000x y 2000x, de las muestras a) M1, b) M4 y c) M6. ....	69
Figura 4.12 Ensayo de dureza en muestras M1 (Cuadros rojos), M4 (triángulos verdes) y M6 (círculos negros).....	70
Figura 4.13 Metalografía de diferentes zonas de la M2.....	72

Figura 4.14 Metalografía de M1, M4 y M6 a 50x, donde se aprecian las tres zonas. ....	73
Figura 4.15 Microestructura de la zona de fusión a) imagen de microscopio óptico a 50x, b) imagen de microscopio electrónico de barrido a 3000x.....	74
Figura 4.16 Microestructura martensítica en la ZAC de la muestra M1, a) imagen a 50x, b) imagen a 3000x.....	75
Figura 4.17 Microestructura bainita inferior en la ZAC de la muestra M4, a) imagen a 50x, b) imagen a 3000x.....	76
Figura 4.18 Análisis de electrones microdispersados en carburos encontrados en el metal base.....	77
Figura 4.19 Análisis de electrones microdispersados en el metal post soldadura, donde se muestran ciertos elementos que mejoran las propiedades mecánicas. ....	78

# Índice de tablas

Tabla 2-1 Variables de Proceso - GMAW [4]. .....	26
Tabla 2-2 Composición química del acero B1500HS (% e.p) [12]. .....	39
Tabla 2-3 Composición química de aceros TRIP, TWIP y el material de aporte usado AWS307 [13]. .....	42
Tabla 2-4 Parámetros de soldadura [14]. .....	43
Tabla 3-1 Composición química del acero M1300 (% e.p) .....	47
Tabla 3-2 Resultados de pruebas de esfuerzo vs deformación. ....	49
Tabla 3-3 Microalambre Lincoln y su comparativa con la norma AWS [16]. ....	52
Tabla 3-4 Composición química del micro alambre Lincoln Superarc LA-90(% e.p) [16]. .....	52
Tabla 3-5 Equipos utilizados para el desarrollo de las pruebas de soldabilidad. ....	53
Tabla 3-6 Resumen de parámetros y equipo implementado en las pruebas de soldabilidad .....	55
Tabla 3-7 Cálculo de entrada de calor .....	56
Tabla 4-1 Resumen de ensayo de tensión a cupones de soldadura. ....	62