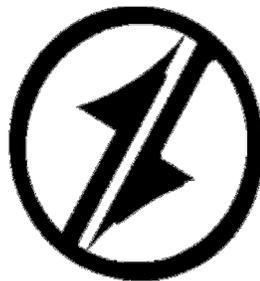


**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**REPARACIÓN DE ACEROS AVANZADOS AHSS UNIDOS MEDIANTE  
PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO.**

**POR**

**JUAN FRANCISCO BUENDIA GUIA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**Octubre 2010**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**REPARACIÓN DE ACEROS AVANZADOS AHSS UNIDOS MEDIANTE  
PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO.**

**POR**

**JUAN FRANCISCO BUENDIA GUIA**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**Octubre 2010**

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **REPARACIÓN DE ACEROS AVANZADOS AHSS UNIDOS MEDIANTE PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO**, realizada por el alumno **JUAN FRANCISCO BUENDIA GUIA**, con número de matrícula **09ES-95** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**MC. Víctor Hugo López Cortez**  
Tutor Académico

---

**Dr. Joaquín del Prado Villasana**  
Tutor en Planta

---

**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**MC. Claudia Aracely González Rodríguez**  
Coordinador de Posgrado

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **JUAN FRANCISCO BUENDIA GUIA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **REPARACIÓN DE ACEROS AVANZADOS AHSS UNIDOS MEDIANTE PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los [días] del mes octubre del año 2010.

---

**Dr. Efraín Almanza Casas**  
Presidente

---

**Dr. Felipe García Vázquez**  
Secretario

---

**MC. Víctor Hugo López Cortez**  
Vocal

# Agradecimientos

**A mis padres y hermanos:** por su apoyo, amor y comprensión incondicional en todos los aspectos de mi vida.

**A mis maestros y asesores:** por compartir sus conocimientos y apoyarme en mi desarrollo personal y profesional.

**A Comimsa:** por la facilitación de instalaciones y personal para la realización de esta monografía.

**A Metalsa:** por todas las facilidades y apoyo otorgado para el desarrollo de esta monografía.

**A Conacyt:** por el apoyo económico para mi desarrollo profesional.

# ÍNDICE

<b>Síntesis</b> .....	1
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	2
<b>1.1 Antecedentes</b> .....	2
<b>1.2. Objetivos</b> .....	3
<b>1.2.1. Objetivo General:</b> .....	3
<b>1.2.2 Objetivos Específicos:</b> .....	3
<b>1.3. Justificación</b> .....	4
<b>1.4. Planteamiento del problema.</b> .....	5
<b>1.5. Aportaciones</b> .....	6
<b>1.6. Alcance</b> .....	7
<b>Capítulo 2 Marco teórico</b> .....	8
<b>2.1. Clasificación de aceros utilizados en partes estructurales en la industria automotriz</b> .....	9
<b>2.1.1 Aceros convencionales (baja resistencia)</b> .....	11
<b>2.1.1.1 Aceros suaves</b> .....	11
<b>2.1.1.2 Aceros libres de intersticios (IF)</b> .....	11
<b>2.1.1.3 Principales usos de los aceros convencionales de baja resistencia.</b> .....	11
<b>2.1.2 Aceros de alta resistencia HSS.</b> .....	12
<b>2.1.2.1 Aceros endurecidos al horno (Bake Hardening BH)</b> .....	12
<b>2.1.2.1.1 Principales usos de los aceros endurecidos al horno.</b> ....	12
<b>2.1.2.2 Aceros isotrópicos (IS):</b> .....	12
<b>2.1.2.3 Aceros Carbono-Manganeso (CM):</b> .....	13
<b>2.1.2.4 Aceros alta resistencia baja aleación (HSLA)</b> .....	13
<b>2.1.2.4.1 Principales usos de los aceros HSLA.</b> .....	14

2.1.2.4.2 Composición química de los aceros HSLA. ....	14
2.1.2.4.3 Estructura típica de un acero HSLA. ....	15
2.1.2.4.4 Conformación de los aceros HSLA. ....	15
2.1.3 Aceros AHSS.....	16
2.1.3.1 Metalurgia, composición química y propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS).....	17
2.1.3.2 Aceros doble fase (DP).....	18
2.1.3.2.1 Composición química de Aceros Doble Base 600 y Propiedades Mecánicas .....	19
2.1.3.3 Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP). ...	21
2.1.3.3.1 Obtención de los Aceros TRIP.....	21
2.1.3.3.2 Composición química de Aceros TRIP 800 y Propiedades mecánicas.....	23
2.1.3.4 Aceros de fase compleja (CP).....	25
2.1.3.5 Aceros martensíticos (MS).....	26
2.1.3.6 Acero Ferrítico-Bainítico (FB). ....	27
2.1.3.7 Aceros TWIP Plasticidad inducida por maclaje por deformación.....	28
2.1.3.8 Aceros formados en caliente (HF). ....	29
2.1.3.9 Aceros post formados tratados térmicamente (PFHT). ....	29
2.2. Aceros AHSS para aplicaciones estructurales en la industria automotriz.....	30
2.2.1 Proceso de soldadura GMAW.....	33
2.2.2 Tipo de junta en estructuras en la industria automotriz.....	36
2.2.3 Metal de aporte utilizado en procesos de ensamble.....	37
2.2.4 Comportamiento de los aceros AHSS probados a esfuerzos de tensión resistentes al corte en la industria automotriz. ....	38
2.2.5 Impacto del proceso de soldadura GMAW en la microestructura de los aceros AHSS doble fase (DP) y plasticidad inducida por transformación (TRIP). ....	42
2.2.5.1 Aceros doble fase. ....	42

2.2.5.1.2 Microestructura y evaluación de la dureza de un acero DP600 mediante el proceso GMAW transferencia de metal en frío CMT. ....	42
2.2.5.1.3 Zona afectada por el calor DP600.....	47
2.2.5.2 Aceros TRIP.....	48
2.2.5.2.1 Microestructura y evaluación de la dureza de un acero TRIP 800 mediante el proceso GMAW transferencia de metal en frío CMT. ....	49
2.3. Criterios de aceptación y defectos en la soldadura en la industria automotriz.....	51
2.3.1 Requerimiento de dimensiones de la soldaduras de filete. ....	51
2.3.2 Defectos más comunes en las uniones soldadas y sus principales causas.....	52
2.3.2.1 Uniones soldadas con falta de penetración de raíz, debido al cambio de morfología de las piezas que conforman el ensamble. ....	53
2.3.2.2 Claros en las uniones soldadas por interrupción de suministro de alambre. ....	53
2.3.2.3 Socavamiento.....	54
2.3.2.3.1 Criterios de aceptación: .....	54
2.3.2.4 Porosidades. ....	55
2.3.2.4.1 Criterios de aceptación. ....	55
2.3.2.5 Agrietamiento:.....	55
2.3.2.5.1 Criterios de aceptación. ....	55
2.4. Reparación de aceros avanzados AHSS.....	56
2.4.1 Reparación típica en un proceso de ensamblaje. ....	60
Capítulo 3. Discusión y análisis de bibliografía. ....	62
Capítulo 4. Caso de estudio.....	65
4.1 Matriz de pruebas .....	66
4.2 Material base utilizado.....	67

4.2.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero DP 600.....	67
4.2.2 Propiedades mecánicas y composición química del acero TRIP 780.....	68
4.3 Equipo utilizado.....	69
4.4 Parámetros utilizados.....	70
4.5 Uniones y probetas.....	70
4.5.1 Probetas de tensión en aceros DP 600 y TRIP 780.....	71
4.6 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 primera soldadura.....	72
4.7 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 primera reparación, segunda soldadura.....	77
4.8 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 Segunda reparación, Tercera soldadura.....	82
4.9 Eficiencia de la unión en aceros avanzados de alta resistencia DP600 y TRIP 780.....	87
4.9.1 Eficiencia en aceros TRIP 780.....	87
4.9.2 Eficiencia en aceros DP600.....	88
4.10 Microestructura en la reparación de aceros avanzados de alta resistencia AHSS aceros TRIP 780 y DP 600.....	89
4.10.1 Microestructura TRIP 780.....	89
4.10.2 Microestructura DP 600.....	90
Capítulo 5 Conclusiones.....	92
5.1 Reparación de aceros TRIP.....	92
5.2 Reparación de aceros DP.....	93
Referencias Bibliográficas.....	95
Figuras y tablas.....	98
Resumen autobiográfico.....	103

# Síntesis

A partir de la introducción de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) en componentes automotrices, es necesario conocer el comportamiento mecánico y metalúrgico de estos materiales durante las prácticas convencionales de soldadura realizadas en un proceso normal de producción, esta monografía está enfocada al proceso de reparación de los defectos producidos por soldadura en producción normal.

Los aceros avanzados de alta resistencia, debido a las diferentes fases que tienen en su microestructura, al ser sometidos a un proceso de soldadura, sufren cambios en sus propiedades mecánicas que afectan principalmente a la zona afectada por el calor. En el proceso de reparación que comúnmente se realiza en producción, existe un recalentamiento en esta zona, afectándola doblemente y mostrando diferente comportamiento de acuerdo al tipo de material.

Este documento cuenta con información acerca de: los tipos de materiales, sus propiedades originales, soldadas y reparadas, además de una reseña del tipo de defectos que comúnmente aparecen en el tipo de uniones realizadas en los componentes estructurales, los procesos de soldadura utilizados para este tipo de uniones y algunos de los criterios de aceptación utilizados por los fabricantes.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes.

La mayoría de los automóviles producidos en serie se fabrican con aceros, representado éste aproximadamente la mitad del peso del automóvil. Este material se ha utilizado al paso del tiempo, debido a que es resistente, fácil de soldar, relativamente barato y tiene muchas otras propiedades para la fabricación de partes automotrices.

Debido a la necesidad de resistencia de algunos de los componentes del automóvil, se han implementado una serie de aceros llamados aceros de alta resistencia HSS, los cuales han sido parte importante de estos elementos estructurales.

Hace algunos años, un consorcio de 35 compañías de acero de todo el mundo llevo a cabo un programa masivo para diseñar, probar y construir un cuerpo de automóvil que fuese ligero, seguro y aplicable, esté cuerpo del automóvil seria diseñado con un nuevo tipo de aceros y grados los cuales hacemos referencia en esta monografía, llamados Aceros Avanzados de Alta resistencia (AHSS por sus siglas en inglés).

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1. Objetivo General:**

Estudio del Estado del arte de los efectos en la microestructura y las propiedades mecánicas que se obtienen mediante la reparación de piezas en producción, mediante el proceso de soldadura GMAW, en aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) haciendo una comparativa del antes y el después del proceso de reparación en: aceros Doble Fase (DP) y aceros de Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP).

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

1. Con los parámetros de soldadura utilizados actualmente en la fabricación de elementos estructurales en la industria automotriz, revisar las propiedades mecánicas como lo son; el esfuerzo de tensión al corte y la microdureza, que se muestran a partir de la reparación en los aceros avanzados de alta resistencia.
2. Establecer la diferencia entre las propiedades mecánicas y la microestructura inicial de un elemento que va a ser sometido a reparación y el resultado de su microestructura al final del proceso de reparación.
3. Determinar las propiedades mecánicas de las microestructuras resultantes de los procesos de reparación por medio de soldadura.

### 1.3. Justificación

Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS), son materiales de alta tecnología producidos mediante ciclos térmicos especializados y composiciones químicas controladas, que por consecuencia forman microestructuras cuyas propiedades mecánicas son alteradas por la exposición del material a elevadas temperaturas, tal como ocurre en los procesos de soldadura.

Actualmente este tipo de materiales de alta tecnología utilizado en la industria automotriz están formados por una combinación de fases suaves y duras, las fases duras son meta estables, esto indica que tiende a volver a fases suaves en equilibrio cuando son elevadas a altas temperaturas. Es por ello que los procesos de reparación por medio de soldadura deben ser controlados para obtener el menor cambio microestructural posible.

El referirse a una reparación en un elemento soldado, es un proceso en el cual una pieza que se produjo, pero que por algún motivo no cumple con los requerimientos de calidad necesarios. Esto puede ser por una variación en el conformado, una falla en el proceso de soldadura, por falta de mantenimiento en los equipos o cualquier variación en el proceso y este cause una soldadura indeseable ya sea por apariencia o funcionalidad. La parte del elemento soldado se somete a la remoción y reposición de la soldadura, para lograr tanto una buena apariencia así como un correcto funcionamiento, así evitando desechar la pieza, ahorrando costos y tiempos en la fabricación de una nueva, para ello es necesario tener la certeza de una buena calidad y funcionamiento del elemento después del proceso de reparación.

## **1.4. Planteamiento del problema.**

Esta monografía surge con la problemática que se puede presentar con la reparación mediante la remoción y reposición de soldadura para piezas estructurales que se utilizan en la industria automotriz, principalmente los chasis. Los elementos al ser reparados, pueden contribuir a la disminución de una gran cantidad de desperdicios en material, con la gran contradicción de los efectos que pueden causar en sus propiedades mecánicas, disminuyendo la calidad de estos y pudiendo causar daños en el producto final.

En el caso en el que se presentara una falla por consecuencia de estas reparaciones, el productor de dichas piezas tendría una gran cantidad de problemas, es por ello la importancia de tener un respaldo que ayude a en un momento dado dar a conocer las consecuencias de la reparación, mostrando los efectos en sus propiedades mecánicas.

Las reparaciones en aceros avanzados de alta resistencia causan efectos en la microestructura debido a la gran cantidad de calor que se le aporta durante el proceso de soldadura, por eso es preciso revisar qué tan importante son los cambios que se muestran en la microestructura y propiedades mecánicas. También es preciso revisar la microestructura antes de la reparación para tener una comparación entre propiedades antes y después de ésta.

## **1.5. Aportaciones.**

El presente trabajo busca concentrar información que permita mostrar las características de los aceros avanzados de alta resistencias AHSS, en el proceso de soldadura, y en los procesos de reparación, mostrando cuales son los defectos en el proceso de soldadura, por qué ocurren y cuáles son los criterios de aceptación de acuerdo a normatividades del cliente. Las cuales están basadas principalmente en los estándares de calidad de la American Welding Society (AWS).

Además de mostrar la eficiencia de las juntas soldadas en producción, la eficiencia de las uniones después de una reparación típica en un proceso de producción mediante la revisión de sus resistencias de esfuerzo de tensión al corte y micro dureza.

## 1.6. Alcance.

En esta monografía se realiza una descripción del estado del arte de los efectos en la microestructura y propiedades mecánicas que resultan en la reparación de piezas automotrices fabricadas con aceros avanzados de alta resistencia. Soldados y reparados mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW (Gas metal Arc Welding por sus siglas en ingles).

Los Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS), son materiales que se utilizan en zonas críticas en la estructura de un automóvil que gracias a su mayor resistencia, se necesitan espesores menores lo cual contribuye a mayor rendimiento de combustible además de una mayor resistencia en las colisiones.

Para comprender el comportamiento de estos aceros al momento de ser reparados, es necesario describir la metalurgia fundamental para tener un entendimiento de los cambios microestructurales que surgen al momento de ser sometidos al calor de los procesos de soldadura, así como el tipo de microestructura que tiene el componente antes de la reparación.

Este trabajo está enfocado a los cambios microestructurales que surjan de la reparación de aceros de doble fase DP600 (Ferrita + Martensita), y aceros de plasticidad inducida por transformación TRIP780 (Ferrita + Martensita + Bainita + Austenita Retenida).

# Capítulo 2

## Marco teórico

Los aceros doble fase (DP) y los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP) pertenecen a la familia de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS).<sup>[1]</sup>

Estos grados de aceros fueron desarrollados ya que su gran resistencia permite espesores más delgados y por lo tanto se pueden obtener vehículos más ligeros proveyendo una alta resistencia a la tensión, con adecuadas características para el estampado y un buen rendimiento para los impactos.<sup>[1]</sup>

Con el incremento del uso de los automóviles modernos, la industria se enfoca a la seguridad y a la eficiencia del combustible, haciendo vehículos amigables con el medio ambiente.<sup>[1]</sup>

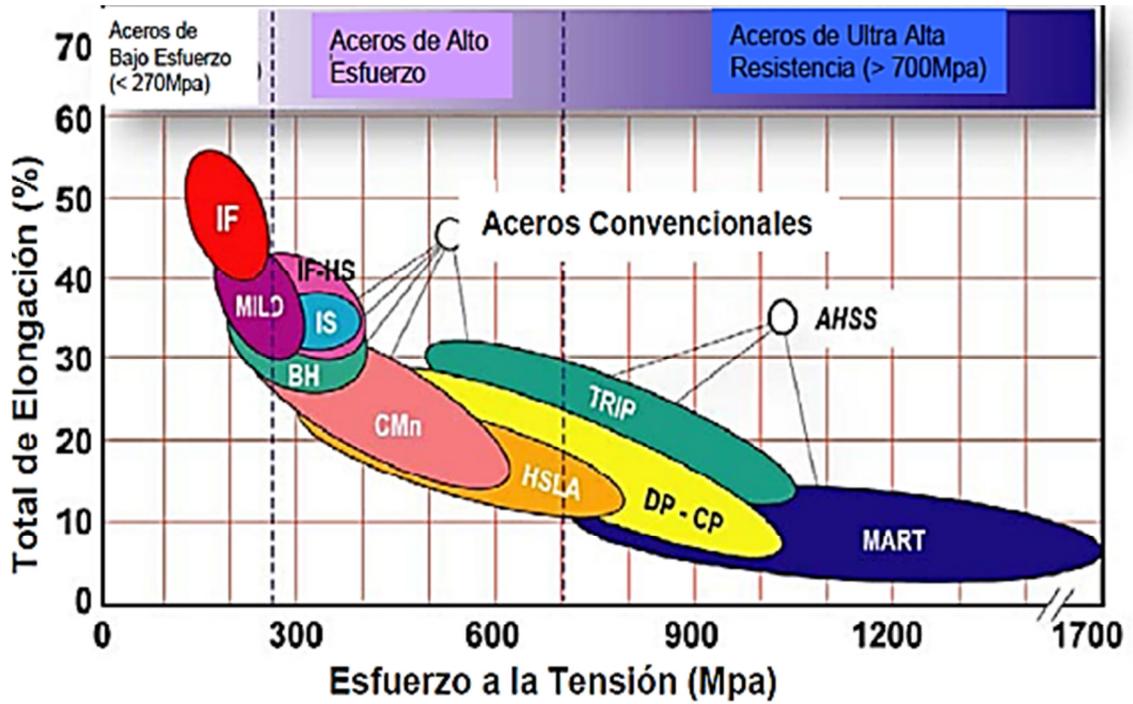
## **2.1. Clasificación de aceros utilizados en partes estructurales en la industria automotriz.**

La industria automotriz clasifica los aceros de diferentes maneras, una de ellas es por la designación metalúrgica. De las designaciones metalúrgicas más comunes se incluyen: Los aceros de baja resistencia (aceros libres de intersticios y aceros suaves). Los aceros de alta resistencia HSS (aceros al carbono-manganeso, aceros endurecidos por calentamiento, aceros de alta resistencia libre de intersticios, aceros de alta resistencia baja aleación y aceros isotrópicos), y los aceros avanzados de alta resistencia AHSS (aceros de doble fase, aceros de plasticidad inducida por transformación, aceros de fase compleja y aceros martensíticos).<sup>[4]</sup>

El segundo método de clasificación para los diseñadores, es por la resistencia de los aceros, por lo tanto, los aceros de alta resistencia HSS y los aceros avanzados de alta resistencia AHSS son los más mencionados para su uso en partes estructurales en la industria automotriz, principalmente los aceros HSLA (High Strength Low Alloy por sus siglas en inglés) refiriéndonos al grupo de aceros HSS, y aceros de doble fase, aceros de plasticidad inducida por transformación y aceros martensíticos los cuales forman parte del grupo de aceros AHSS.<sup>[4]</sup>

El tercer método de la clasificación presenta las propiedades mecánicas o parámetros de formado de los diferentes aceros, como lo son el porcentaje de elongación total, el exponente de endurecimiento por trabajado valor "n", o el radio de expansión de los orificios.<sup>[4]</sup>

En la figura 2.1 se muestra los aceros de acuerdo a su resistencia a la tensión, elongación total y por sus nombres de acuerdo a sus características metalúrgicas.



**Figura 2.1** Aceros de baja resistencia, aceros de alta resistencia HSS y aceros avanzados de alta resistencia indicados en color verde, amarillo y azul.<sup>[15]</sup>

### **2.1.1 Aceros convencionales (baja resistencia).**

El acero convencional es un acero al carbono no aleado, laminado en frío y caliente, con un bajo contenido en carbono. Este bajo contenido en carbono le proporciona unas buenas características para el trabajo de deformación en prensas, pero por el contrario su límite elástico es demasiado bajo, por lo que se necesitan mayores espesores para soportar los esfuerzos a los que se someten las distintas piezas, y además en los paneles exteriores se producen abolladuras con facilidad. <sup>[10]</sup>

Los aceros de bajo carbono, se dividen principalmente en aceros suaves y aceros libres de intersticiales, con contenidos de carbono muy bajos, menores a 0.010% (IF). <sup>[4]</sup>

#### **2.1.1.1 Aceros suaves.**

Los aceros suaves tienen principalmente una estructura ferrítica y tienen una aplicación muy generalizada, lo cual conlleva un muy alto volumen de producción. <sup>[4]</sup>

#### **2.1.1.2 Aceros libres de intersticios (IF).**

Estos aceros con ultra bajo contenido de carbono están diseñados para esfuerzos de cedencia bajos y altos exponentes de endurecimiento por trabajado. <sup>[4]</sup>

#### **2.1.1.3 Principales usos de los aceros convencionales de baja resistencia.**

Su bajo límite elástico lo convierte en un material el cual se puede utilizar en piezas con baja responsabilidad estructural en los vehículos como lo son las aletas, paneles de puertas, puertas traseras, etc. <sup>[10]</sup>

### **2.1.2 Aceros de alta resistencia HSS.**

Los aceros de alta resistencia se clasifican en diferentes tipos de acuerdo a la función del mecanismo de endurecimiento que se utiliza para aumentar su resistencia.<sup>[10]</sup>

#### **2.1.2.1 Aceros endurecidos al horno (Bake Hardening BH).**

Los aceros BH tienen una estructura básica de ferrita la cual esta endurecida por solución sólida; es decir mediante elementos aleantes que distorsionan la red cristalina, dando como lugar este tipo de endurecimiento. Una característica única de estos aceros es la química y el diseño del procesamiento para mantener el carbono en solución durante la producción del acero y después permitir que el carbono salga de solución a partir de un tiempo determinado a temperatura ambiente, incrementándose así el esfuerzo de cedencia de las piezas formadas.<sup>[4]</sup>

Estos aceros han sido elaborados y tratados, para conseguir un aumento significativo del límite elástico durante un tratamiento térmico a baja temperatura. La ganancia en su límite elástico conseguida por el tratamiento de cocción, llamado efecto "Bake Hardening" (BH), es generalmente superior a 40 MPa. El efecto "Bake Hardening" ofrece una mejora en la resistencia a la deformación y una reducción del espesor en los elementos con las mismas propiedades mecánicas.<sup>[4]</sup>

##### **2.1.2.1.1 Principales usos de los aceros endurecidos al horno.**

Los principales usos de los aceros (BH) son en piezas que conforman los paneles exteriores como lo pueden ser las puertas y los techos, así como para la fabricación de algunas piezas estructurales del automóvil como son los bastidores inferiores, refuerzos y travesaños.<sup>[10]</sup>

##### **2.1.2.2 Aceros isotrópicos (IS):**

Los aceros isotrópicos tienen principalmente una estructura básica de ferrita y su característica son las propiedades en todas las direcciones.<sup>[4]</sup>

### **2.1.2.3 Aceros Carbono-Manganeso (CM):**

Los aceros de alta resistencia carbono manganeso, utilizan la solución sólida para el endurecimiento; como ya se mencionó, esto se logra mediante el uso de elementos aleantes que ayuden a distorsionar la red cristalina, debido a la cantidad o la diferencia de tamaños de estos con respecto a la estructura original de la red. <sup>[4]</sup>

### **2.1.2.4 Aceros alta resistencia baja aleación (HSLA).**

Los aceros HSLA son conocidos como aceros de alta resistencia baja aleación y proporcionan una buena relación resistencia/peso, esto quiere decir que podemos tener mayores resistencias en espesores más delgados que los aceros convencionales de bajo carbono. <sup>[2]</sup>

Los aceros HSLA son un grupo de aceros con bajo contenido de carbono que utilizan pequeñas cantidades de elementos aleantes para obtener esfuerzos de fluencia mayores que 275 MPa (40Ksi) en condición de laminados o normalizados. La función principal de los elementos aleantes en estos aceros, es de contribuir al endurecimiento de la ferrita mediante refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por solución sólida. Éste último está ligado ampliamente a los contenidos de la aleación, mientras que los dos efectos anteriores a éste, dependen de los efectos del complejo diseño de la aleación y de los tratamientos termo mecánicos. <sup>[17]</sup>

Los aceros HSLA tienen mejores propiedades mecánicas y a veces mejor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono laminados. Debido a que el esfuerzo de fluencia de los aceros HSLA, se puede obtener con menores contenidos de carbono, la soldabilidad de muchos de ellos es comparable a la de los aceros suaves. <sup>[17]</sup>

Por el hecho de que las aleaciones HSLA son más resistentes estas pueden ser usadas en secciones más delgadas, lo que hace que este tipo de materiales sean particularmente atractivos para componentes de equipo de transportación, donde la reducción del peso es importante para aumentar el rendimiento del combustible. Los aceros HSLA; como ya se mencionó, se obtienen mediante la reducción del tamaño de grano y precipitación del mismo, añadiendo de forma selectiva elementos de aleación como titanio, niobio o cromo que confieren propiedades de dureza. Este tipo de aceros se caracterizan por una buena resistencia a la fatiga, una buena resistencia al choque y una buena capacidad de deformación en frío.<sup>[2]</sup>

#### 2.1.2.4.1 Principales usos de los aceros HSLA.

Estos aceros se destinan sobre todo para piezas interiores de la estructura que requieren una elevada resistencia a la fatiga, como por ejemplo, los refuerzos de la suspensión, o refuerzos interiores. También se pueden encontrar en largueros y travesaños.<sup>[10]</sup>

#### 2.1.2.4.2 Composición química de los aceros HSLA.

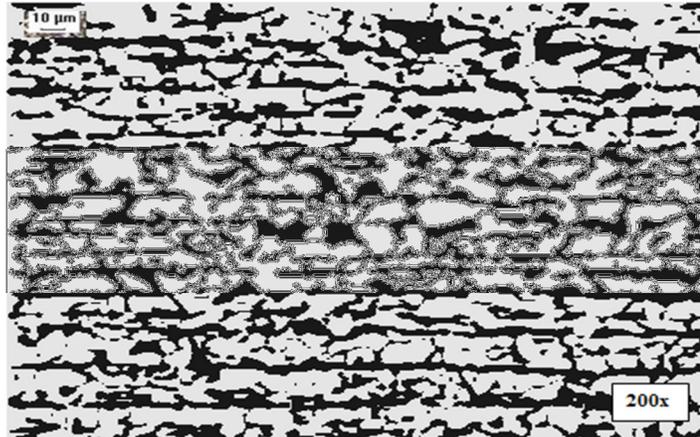
Típicamente los aceros HSLA son aceros de bajo carbono con un máximo de 1.5% de manganeso, reforzado con pequeñas porciones de elementos de aleación como niobio, cobre, vanadio, titanio y algunas veces además tienen un rolado especial y técnicas de enfriamiento controlado, la tabla 2.1 hace referencia a este tipo de aceros.<sup>[2]</sup>

**Tabla 2.1** Composición química de un acero HSLA - Altos Hornos de México.<sup>[24]</sup>

Especificación	Composición Química (% peso)						Límite	Última	% de	Descripción y Uso Final
							Elástico	Tensión	Elongación	
	C	Mn	P	S	Cb	Cu	MPa Mín.	MPa Mín.	2"	
ASTM A-611 Gr. C	0.15	0.6	0.035	0.035	-	0.2	230	330	22	Estructuras resistentes a corrosión atmosférica.
SAE J1392 Gr. 45 X	0.15	1.2	0.03	0.035	0.005	-	310	380	22	
SAE J1392 Gr. 50 Y	0.15	1.35	0.03	0.035	0.005	-	345	450	20	Piezas soporte de alta resistencia para industria automotriz.
ASTM A-607 Gr. 50	0.15	1.35	0.03	0.035	0.005	-	345	450	20	
ASTM A-1008 Gr.50	0.15	1.65	0.04	0.04	0.005	-	345	450	20	

### 2.1.2.4.3 Estructura típica de un acero HSLA.

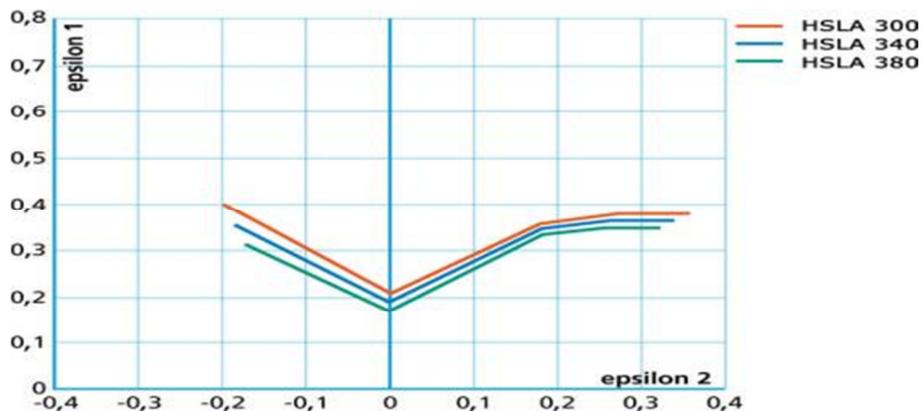
Estos aceros se caracterizan por tener una estructura de grano fino debido a él gran número de microaleantes que funcionan como núcleos para el crecimiento el crecimiento de granos en el proceso de solidificación .<sup>[3]</sup>



**Figura 2.2** Microestructura de un acero HSLA laminado en caliente con una microestructura de ferrita y perlita, atacado con picral al 2% y después con nital 2%, 200x<sup>[28]</sup>

### 2.1.2.4.4 Conformación de los aceros HSLA.

La capacidad de ser conformado disminuye progresivamente a medida que aumenta la resistencia, la utilización de las curvas límites de conformación permite definir los límites dentro de los cuales un material se puede deformar sin estricción (disminución de espesor) de acuerdo a diferentes patrones de deformación, entre mayor sea la posición de la curva, mejor será la conformabilidad del tipo de acero.<sup>[3]</sup>



**Figura 2.3** Curvas límites calculados para familias de aceros HSLA laminadas en frío en la cual nos muestra la deformación máxima permisible en fracción.<sup>[3]</sup>

### 2.1.3 Aceros AHSS.

Hace una década un consorcio de 35 compañías de acero de todo el mundo llevó a cabo un programa masivo de para diseñar, construir y probar una estructura de acero para automóviles ultra ligero ULSAB (Ultra light Steel Auto body por sus siglas en ingles) que fuese ligero, seguro y aplicable.<sup>[4]</sup>

ULSAB era un nuevo tipo de aceros y grados llamados aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) por sus siglas en inglés, son una familia de aceros con una microestructura que da respuesta a la industria del acero en cuanto a la demanda de mejora de materiales, las características de este tipo de aceros las podemos observar en la tabla 2.2.<sup>[4]</sup>

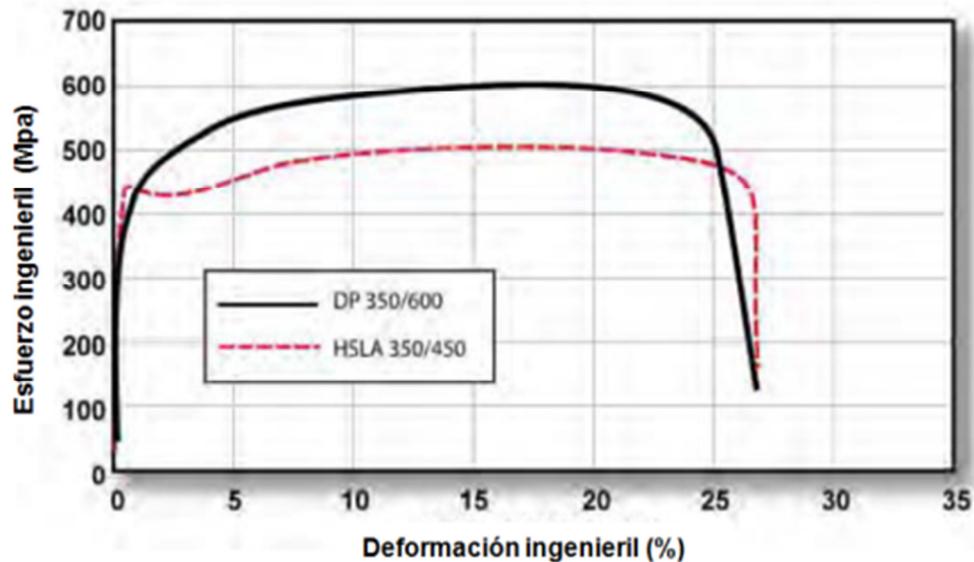
**Tabla 2.2** Ejemplo de las propiedades mecánicas de los aceros diseñados para la ULSAB.<sup>[4]</sup>

CLASIFICACIÓN	LIMITE DE CEDENCIA (MPa)	ULTIMO ESFUERZO A LA TENSIÓN (MPa)	TOTAL DE ELONGCIÓN (%)
DP 300/500	300	500	23-27
DP 350/600	350	600	30-34
TRIP 450/800	450	800	24-30
DP 500/800	500	800	26-32
CP 700/800	700	800	14-20
DP 700/1000	700	1000	10.-15
MS 1250/1520	1250	1250	4.-6

La principal diferencia entre los aceros HSS y los aceros AHSS es la microestructura. Los aceros HSS son de una sola fase ferrítica mientras que los aceros AHSS son principalmente aceros con una microestructura que contiene diferentes fases como los son la ferrita, martensita, bainita y austenita retenida.

Algunos tipos de aceros avanzados de alta resistencia AHSS tienen un mayor endurecimiento, resultado de una capacidad de balance entre la dureza y la ductilidad superior a los aceros convencionales (ver figura 2.4), otros tipos

tienen un ultra esfuerzo a la cedencia y a la tensión mostrando un comportamiento de endurecimiento al calentamiento.<sup>[4]</sup>



**Figura 2.4** Comparación de esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril de un acero DP contra un acero HSLA.<sup>[4]</sup>

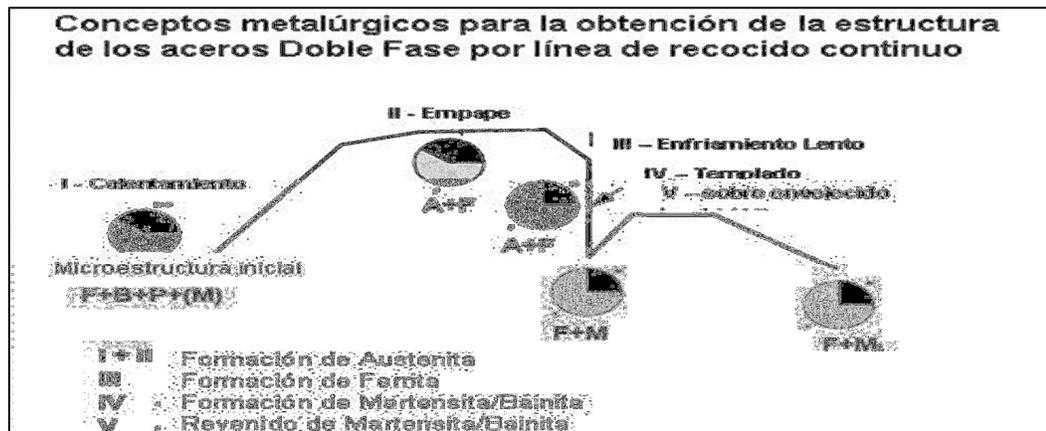
### 2.1.3.1 Metalurgia, composición química y propiedades mecánicas de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS).

Los aceros avanzados de alta resistencia en comparación con los aceros convencionales tienen metalurgias y procesamientos novedosos, es por ello que se describen aquí para proporcionar una comprensión básica de cómo sus notables propiedades mecánicas, evolucionan a partir de su elaboración y sus estructuras únicas, todos los AHSS son producidos por velocidades de enfriamiento controladas desde la fase de ferrita a la fase de austenita más ferrita.<sup>[4]</sup>

### 2.1.3.2 Aceros doble fase (DP).

Los aceros de doble fase consisten, en una matriz de ferrita con una segunda fase de martensita dura en forma de islas, al aumentar el volumen de la fracción de la segunda fase dura, generalmente incrementa la resistencia.<sup>[4]</sup>

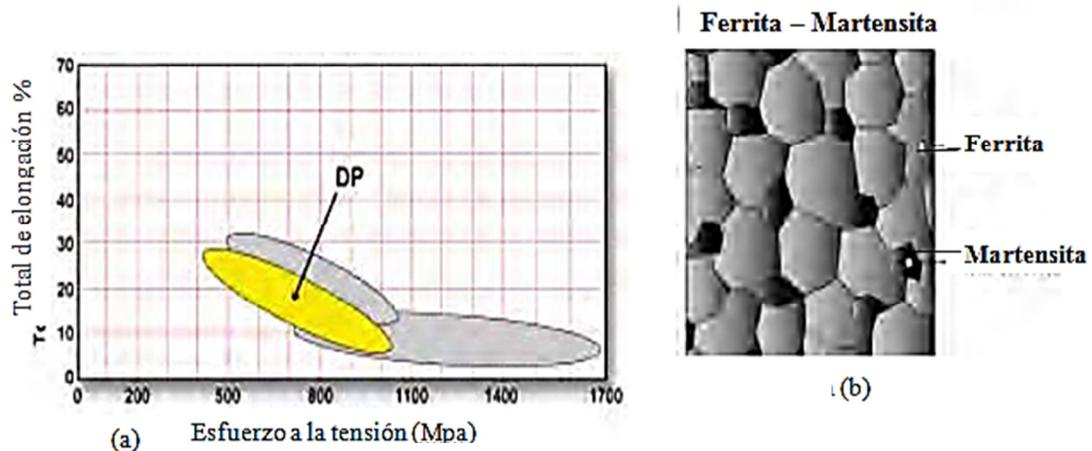
Los aceros Doble fase (ferrita + martensita) son producidos mediante enfriamientos controlados desde la fase austenítica (en productos rolados en caliente) o desde una fase de austenita más ferrita (para recocido continuo, rolado en frío y productos recubiertos en caliente por inmersión). En la figura 2.5 se observa el esquema de obtención de aceros DP por enfriamiento controlado.



**Figura 2.5** Esquema de obtención de Aceros Doble Fase por enfriamiento controlado.<sup>[5]</sup>

La microestructura de los aceros de doble fase ferrita más islas de martensita, donde la fase suave de ferrita, es una fase continua, la cual da a estos aceros una excelente ductilidad, un esquema de la microestructura se puede observar en la figura 2.6. Cuando estos aceros se deforman, el esfuerzo se concentra en la baja resistencia de la ferrita alrededor de las islas de martensita, creando un único endurecimiento por deformación, al igual que otros tipos de aceros avanzados de alta resistencia, los aceros de doble fase también pueden sufrir endurecimiento por calentamiento.<sup>[4]</sup>

En los aceros de doble fase, el carbono permite la formación de martensita en rangos de enfriamiento que incrementan la dureza del acero, como lo son manganeso, cromo, molibdeno, vanadio y níquel adheridos individualmente o en combinación, dan una mayor resistencia y soldabilidad.<sup>[4]</sup>



**Figura 2.6** (a) Representación gráfica de la ubicación de los aceros de doble fase de acuerdo a su esfuerzo- deformación (b) Representación gráfica de una estructura típica de un acero de doble fase.<sup>[4]</sup>

### 2.1.3.2.1 Composición química de Aceros Doble Fase 600 y Propiedades Mecánicas

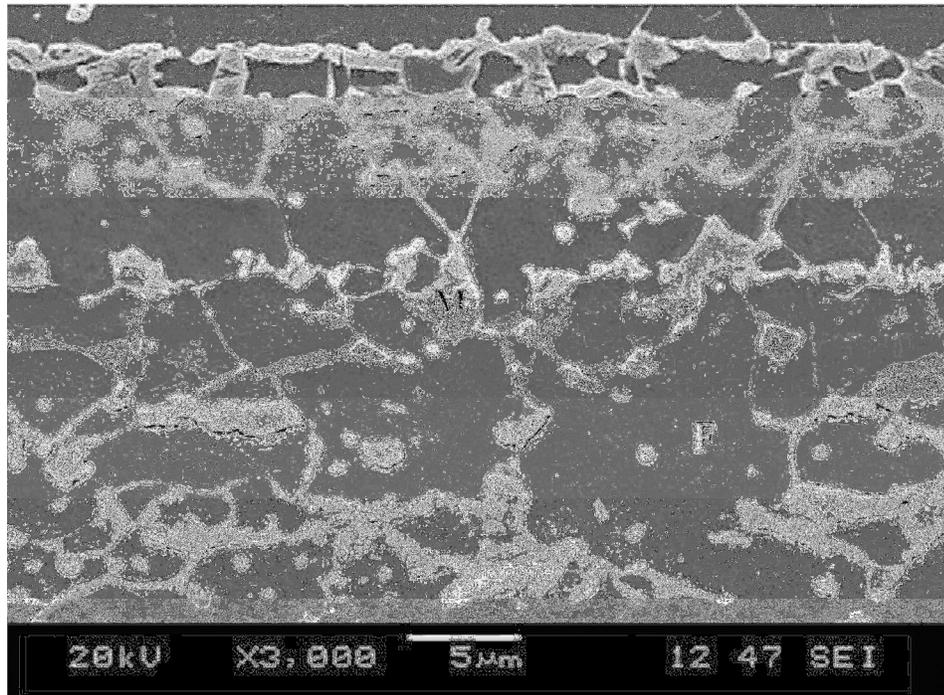
La composición química de los aceros Doble Fase 600 puede tener variaciones de acuerdo al tipo de proceso mediante el cual se obtuvieron las fases, como se mencionó anteriormente Mn, Cr y Mo se añaden al acero para incrementar la templabilidad del material. Así, el proceso de enfriamiento y la templabilidad determinan la fracción volumétrica de las lagunas de austenita que transforman a martensita.<sup>[4]</sup>

**Tabla 2.3** Composición química de un acero DP600 (% e.p.).<sup>[13]</sup>

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

La resistencia de los aceros DP depende principalmente de la cantidad y dureza de la martensita en la estructura, la cual puede variar de 10 a 40% en peso,

dentro de la matriz de ferrita, en la figura 2.7 se muestra la microestructura de un acero DP600 obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido.



**Figura 2.7** Microestructura de un acero DP 600 obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido donde se puede observar la fase de martensita (M) y la fase de ferrita (f).<sup>[7]</sup>

### **2.1.3.3 Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP).**

La microestructura de los aceros TRIP consiste en austenita retenida dentro de una matriz primaria de ferrita, con un volumen mínimo de 5% de esta austenita retenida, fases como lo son martensita y bainita se presentan en cantidades variables.<sup>[4]</sup>

En los aceros TRIP; por lo general, se requieren mantener una temperatura isotérmica e intermedia, lo cual puede producir algunas cantidades de bainita. Los altos contenidos de silicio y carbono de los aceros TRIP también dan como resultado un volumen significativo de austenita retenida en las microestructura finas.<sup>[4]</sup>

Durante la deformación, la dispersión de las segundas fases duras en las ferritas suaves, se crea un alto índice de endurecimiento por deformación, tal como se observa en los aceros doble fase, sin embargo en los aceros TRIP la austenita retenida transforma progresivamente a martensita aumentando su resistencia, incrementando así el rango de endurecimiento por deformación a niveles muy altos.<sup>[4]</sup>

Los rangos de endurecimiento por deformación en los aceros TRIP substancialmente mayores que los aceros convencionales HSS, esto es particularmente útil para los diseñadores requieren aceros de alta dureza.<sup>[4]</sup>

#### **2.1.3.3.1 Obtención de los Aceros TRIP.**

El ciclo térmico aplicado para fabricarlos es similar al usado en los aceros DP. La lámina es calentada rápidamente en la región intercrítica  $A_3$  para formar una mezcla de austenita y ferrita. La mayor diferencia es la introducción de un mantenimiento isotérmico en la región bainítica, (o un enfriamiento lento) para generar bainita y retener austenita en la estructura final. Esto se logra al deprimir la temperatura donde empieza la transformación martensítica por

debajo del cero, al enriquecer en carbono la austenita no transformada, un ejemplo de procesamiento de una acero TRIP se muestra en la figura 2.8.

El enriquecimiento en carbono mediante solamente la formación de ferrita es insuficiente. Por lo tanto, un mayor enriquecimiento en carbono se alcanza mediante la formación de bainita. De esta manera el carbono rechazado desde la ferrita enriquece a la austenita, la cual queda retenida en la microestructura final. [13]

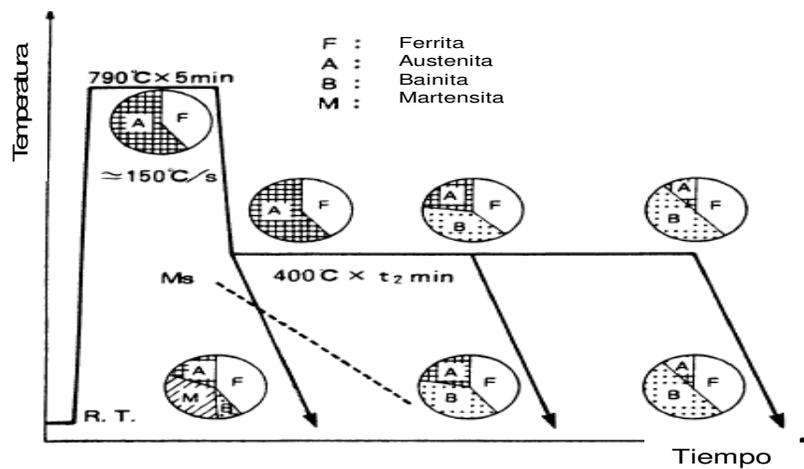


Figura 2.8 Concepto metalúrgico para obtener aceros TRIP [13]

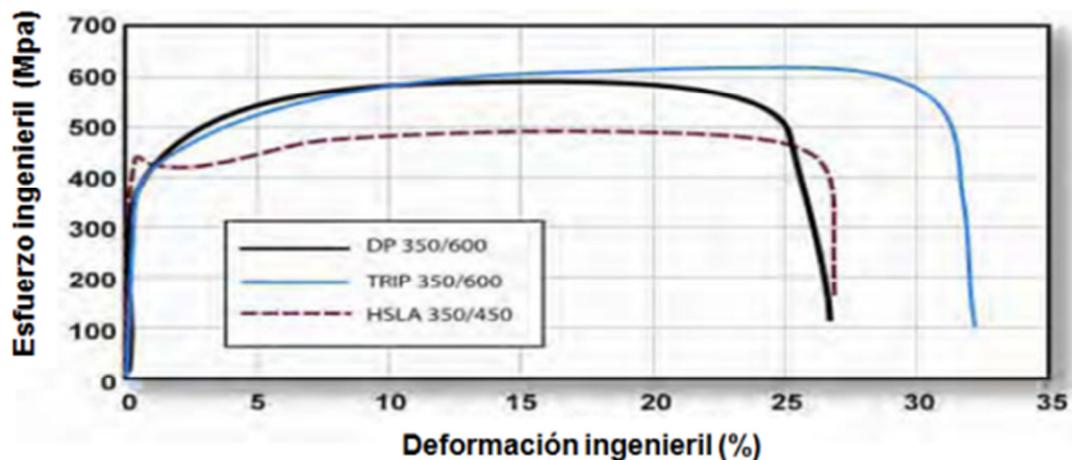


Figura 2.9 Comparación del esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril de los aceros TRIP en comparación con los aceros de doble fase y los aceros HSLA notando sus mejores propiedades mecánicas. [4]

Los aceros TRIP usan mayores cantidades de carbono que los aceros DP para estabilizar la fase de austenita retenida por debajo de la temperatura ambiente, por consiguiente se obtienen mejores propiedades en los aceros TRIP que en aceros DP como se muestra en la figura 2.9, además de que gracias a altos contenidos de silicio y aluminio se acelera la formación de ferrita a bainita, así, estos elementos ayudan a mantener el contenido necesario de carbono dentro de la austenita retenida. La supresión de la precipitación de carburos durante las transformaciones bainíticas puede ser crucial en los aceros TRIP. El silicio y el aluminio son usados para evitar la precipitación de carburos en la región bainítica. <sup>[4]</sup>

El nivel de esfuerzo en el cual la austenita retenida comienza la transformación a martensita, es controlado mediante el ajuste del contenido de carbono, a bajos niveles de carbono, la austenita retenida comienza la transformación casi inmediatamente después de la deformación, incrementándose los rangos de endurecimiento por deformación durante el proceso de estampado. <sup>(4)</sup> A altos contenidos de carbono, la austenita retenida es más estable y empieza la transformación solo a niveles de tensión más allá de los producidos durante el formado, a estos niveles de carbono, la austenita retenida persiste dentro de la parte final, se transforma en martensita durante la deformación posterior. <sup>[4]</sup>

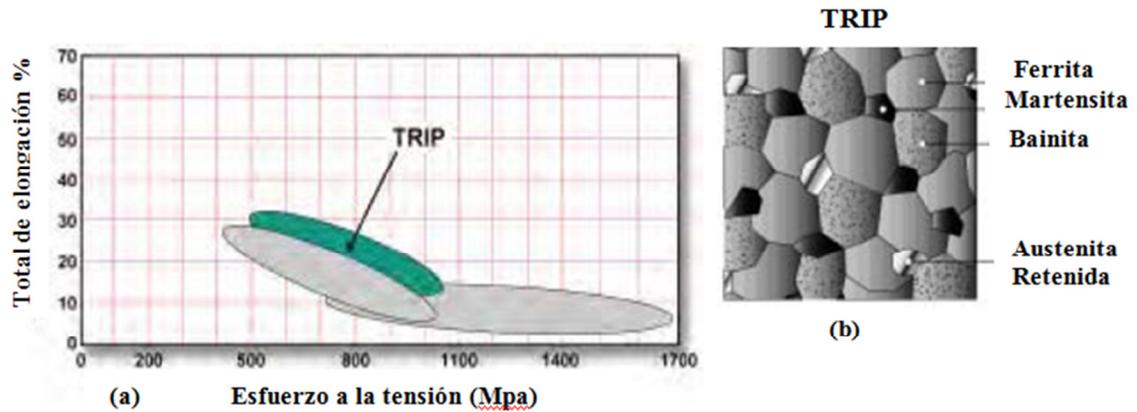
#### **2.1.3.3.2 Composición química de Aceros TRIP 800 y Propiedades mecánicas.**

Los aceros TRIP usualmente contienen mayor cantidad de carbono y silicio y/o aluminio que los aceros DP, a fin de promover su microestructura multifase. Como se mencionó anteriormente el Si y Al se añaden no solo para incrementar el endurecimiento por solución sólida, sino principalmente para prevenir la precipitación de carburos durante la transformación bainítica.

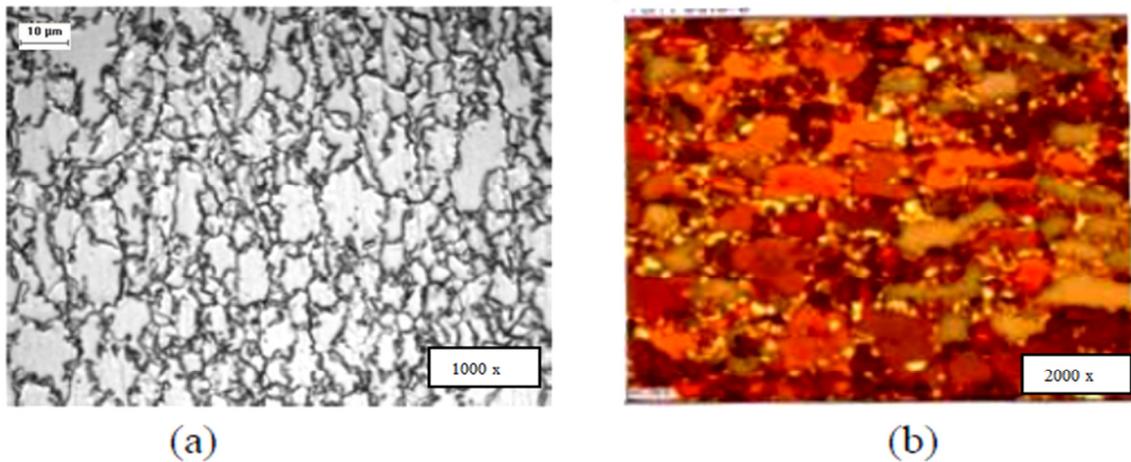
**Tabla 2.4** Composición química de un acero TRIP 800 (% e.p.). <sup>[13]</sup>

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

Los aceros TRIP pueden ser diseñados o adaptados para obtener una excelente formabilidad para fabricaciones complejas. Los aceros TRIP exhiben un endurecimiento por deformación en las colisiones automovilísticas mostrando una excelente absorción de energía, el esquema y la microestructura de este tipo de material se muestra en las figuras 2.10 y 2.11. <sup>[4]</sup>



**Figura 2.10** (a) Representación gráfica de la ubicación de los aceros de TRIP de acuerdo a su esfuerzo- deformación (b) Representación gráfica de una estructura típica de un acero TRIP. <sup>[4]</sup>



**Figura 2.11** Microestructura típica de un acero TRIP 1000x (a) Atacada con nital. (b) Atacada con LePera 2000x. <sup>[25]</sup>

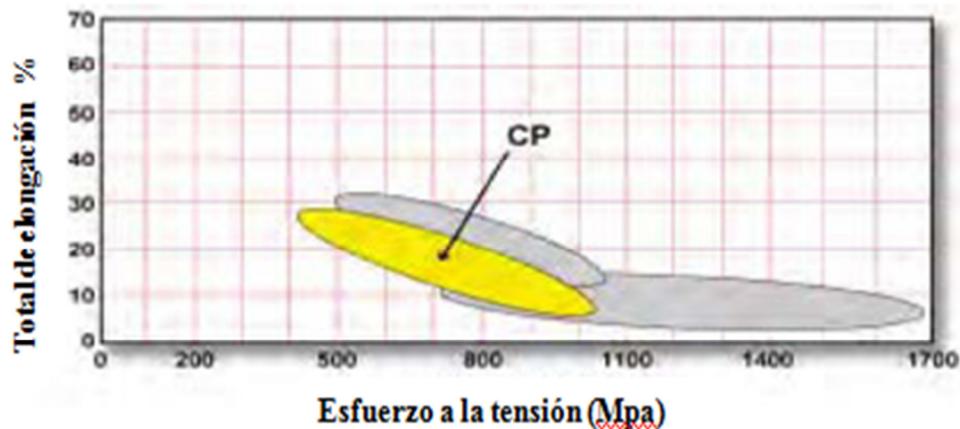
### 2.1.3.4 Aceros de fase compleja (CP).

Los aceros de fase compleja tipifican la transición de un acero con una muy alta resistencia última a la tensión.

La microestructura de los aceros de fase compleja contienen pequeñas cantidades de martensita, austenita y perlita dentro de una matriz ferrita/bainita, existe un refinamiento de grano extremo creado por la recristalización retardada o por la precipitación de elementos microaleantes como lo son el Ti y Nb.

En comparación con los aceros doble fase (DP), los aceros de fase compleja (CP), muestran significativamente una alta resistencia a la cedencia, al igual que una alta resistencia a la tensión que va desde los 800 MPa. Los aceros de fase compleja (CP) se caracterizan por tener una alta absorción de energía y una capacidad de deformación residual alta.<sup>[4]</sup>

En el esquema de la figura 2.12. Se muestra en la gráfica esfuerzo deformación la localización de las propiedades de este material.



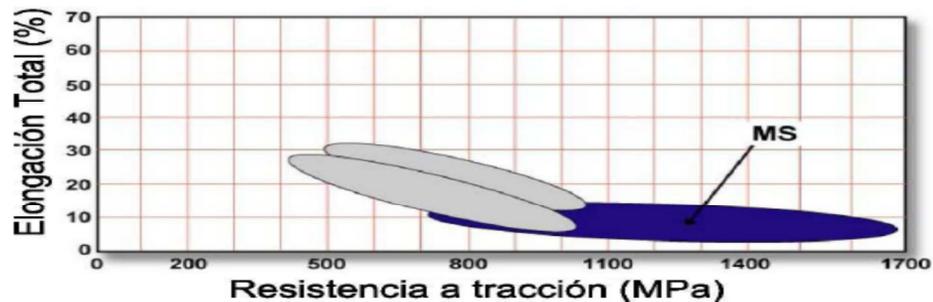
**Figura 2.12** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de CP de acuerdo a su esfuerzo-deformación.<sup>[4]</sup>

### 2.1.3.5 Aceros martensíticos (MS).

Para crear los aceros martensíticos la austenita que existe durante el rolado en caliente o el recocido es transformado casi en su totalidad en martensita durante un enfriamiento rápido.<sup>[4]</sup>

Los aceros martensíticos se caracterizan por tener una matriz de martensita que contiene pequeñas cantidades de ferrita o bainita. Dentro de los aceros con varias fases los aceros martensíticos (MS) muestran el nivel más alto de resistencia a la tensión, esta estructura puede ser desarrollada mediante tratamientos térmicos. Los aceros martensíticos pueden proveer esfuerzos últimos a la tensión de 1700 MPa. como se muestra en la figura 2.13. Los aceros martensíticos a menudo se les da un post tratamiento térmico, para mejorar su ductilidad y así proveer una ductilidad adecuada incluso en resistencias muy altas.<sup>[4]</sup>

La adición de carbono en los aceros martensíticos incrementa la dureza y refuerza la martensita. Manganeso, silicio, cromo, molibdeno, boro, vanadio y níquel son comúnmente usados en varias combinaciones para incrementar la dureza. Los aceros martensíticos son producidos a partir de la fase de austenita dando un enfriamiento rápido para transformar la mayoría de la austenita a martensita. Los aceros de fase compleja (CP) también siguen un patrón similar de enfriamiento, pero la química de los aceros martensíticos (MS) es ajustada para producir menos austenita retenida y formar precipitaciones finas para fortalecer las fase de martensita y bainita.<sup>[4]</sup>



**Figura 2.13** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de MS de acuerdo a su esfuerzo- deformación.<sup>[4]</sup>

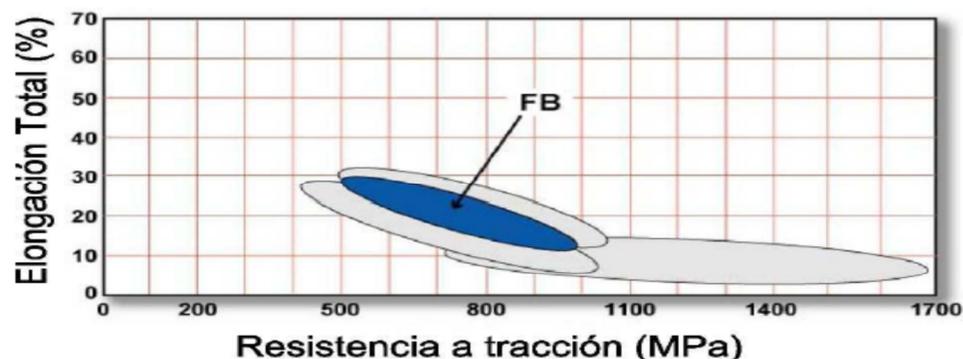
### 2.1.3.6 Acero Ferrítico-Bainítico (FB).

Los aceros FB son utilizados para cumplir requisitos muy específicos de los clientes; como lo puede ser una alta expansión de los orificios en aceros, así como para mejorar la capacidad de estiramiento de los bordes. Los aceros Ferríticos-Bainíticos tienen una estructura fina de ferrita y bainita, el fortalecimiento se obtiene tanto por el refinamiento de grano y por el endurecimiento de la segunda fase con bainita. Los aceros FB están disponibles como productos laminados en caliente. [4]

La principal ventaja de los aceros FB sobre los aceros HSLA y los aceros DP es la capacidad que tienen estos para el estiramiento, comparado con los aceros HSLA los aceros FB tienen un mayor exponente de endurecimiento por deformación y un incremento de elongación total.

Los aceros FB tienen una buena soldabilidad, además de que estos aceros se caracterizan por tener un buen rendimiento a los impactos y buenas propiedades a la fatiga. [4]

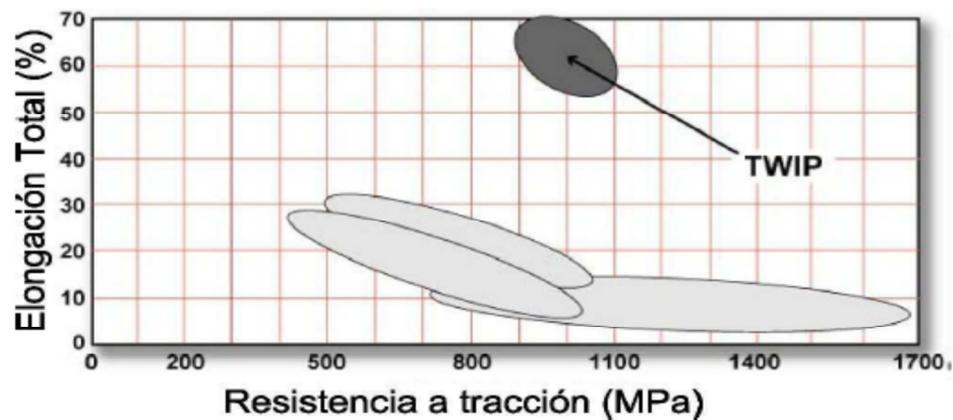
Un esquema de localización en cuanto a sus propiedades mecánicas se muestra en la figura 2.14



**Figura 2.14** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de FB de acuerdo a su esfuerzo- deformación. [4]

### 2.1.3.7 Aceros TWIP Plasticidad inducida por maclaje por deformación.

Estos aceros tienen altos porcentajes de manganeso (17- 24%) lo cual causa que los aceros sean completamente austeníticos a temperatura ambiente. Esta característica es el principal modo de plasticidad inducida por maclaje, generadas durante la deformación. Las maclas causan un incremento instantáneo (valor  $n$ ), así es como la microestructura llega a ser muy fina. El resultado del maclaje se manifiesta dándole resistencia al acero. Los aceros TWIP combinan una extrema resistencia con una alta formabilidad. El valor  $n$  incrementa para un valor de 0.4 a un esfuerzo ingenieril aproximado de 30 % y entonces permanece constante hasta una elongación total alrededor del 50 %. La resistencia a la tensión es más alta que 1000 MPa., como se muestra en la figura 2.15. <sup>[4]</sup>



**Figura 2.15** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de TWIP de acuerdo a su esfuerzo- deformación. <sup>[4]</sup>

### **2.1.3.8 Aceros formados en caliente (HF).**

La implementación de la aplicación de la prensa de endurecimiento y la utilización de aceros endurecidos son alternativas prometedoras para optimizar las partes con geometrías complejas. Los aceros basados en boro formados en caliente (entre 0.02% a 0.05% de boro) se han estado usando desde la década de los 90's en la construcción de carrocerías. Se debe mantener una temperatura mínima de 850°C durante el proceso de formación (austenización) seguida de una velocidad de enfriamiento superior a los 50°C por segundo para así asegurar las propiedades mecánicas deseadas. <sup>[4]</sup>

Existen dos tipos de prensa de endurecimiento o de aplicación de formado en caliente disponibles en la actualidad.

1-Formado en caliente directo.

2-Formado en caliente indirecto.

Durante el formado en caliente directo la deformación se hace en un rango de alta temperatura austenítica seguida de un enfriamiento rápido.

Durante el formado en caliente indirecto, se le da un preformado a la pieza a temperatura ambiente y al final del proceso de formado, se calienta y se enfría rápidamente. <sup>[4]</sup>

### **2.1.3.9 Aceros post formados tratados térmicamente (PFHT).**

Este es un método para desarrollar aceros de alta resistencia. El principal problema en la aplicación de los aceros de alta resistencia ha sido mantener la geometría de las partes durante y después de un proceso de tratamiento térmico. Sujetando la pieza y luego calentando e inmediatamente enfriando parece ser una solución para la aplicación en producción.

Comparado con los aceros HSS los aceros AHSS además de ofrecer una mayor resistencia con mejor formabilidad, mayor energía de absorción y mejor resistencia en menores espesores. <sup>[4]</sup>

## **2.2. Aceros AHSS para aplicaciones estructurales en la industria automotriz.**

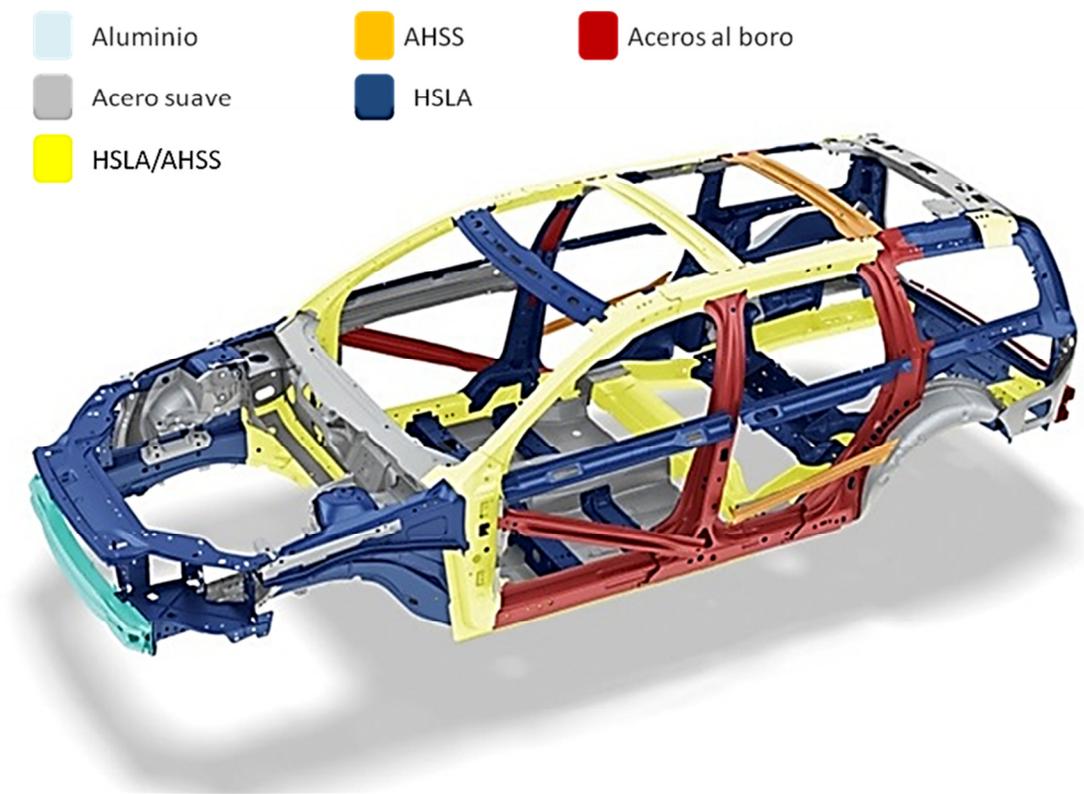
Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) se han estado estudiando para desarrollar la comprensión fundamental y la capacidad de predicción en los efectos de la soldadura y el comportamiento estructural de los elementos formados por aceros AHSS en las uniones soldadas en la industria automotriz, así como investigar la soldabilidad de los aceros AHSS conforme a los parámetros que se aplican en torno a la producción de automóviles.<sup>[6]</sup>

En la actualidad, la industria automotriz ha ido avanzando significativamente en cuanto a los materiales utilizados, en años pasados las estructuras de los autos eran principalmente de aceros de bajo carbono. En recientes años ha habido una lenta tendencia al uso de aceros de alta resistencia tales como los HSLA. Hoy en día la utilización de nuevos materiales como lo son los AHSS se está desarrollando<sup>[18]</sup>.

El principal uso de los aceros DP, como consecuencia de sus altas propiedades mecánicas y su potencial de aligeramiento entorno al 15%, en comparación con los aceros convencionales, se usan en piezas con alto grado de responsabilidad estructural como son estribo, el montante A, correderas de asientos, cimbras de techo. Así mismo, los aceros TRIP se adaptan sobre todo a piezas de estructura y seguridad, debido a su fuerte capacidad de absorción de energía y buenas propiedades mecánicas, como son largueros, travesaños, refuerzos “pilar B”.

En la figura 2.16 se puede observar como parte de los aceros HSLA puede ser sustituida por aceros AHSS, esto debido a que existen ciertas similitudes en cuanto a las propiedades mecánicas dependiendo del tipo y del grado del acero<sup>[26]</sup>, si bien es cierto que los acero AHSS nos proveen de una mayor resistencia

por lo que se pueden utilizar menores espesores. El costo de estos aceros avanzados está por encima de los aceros HSLA. Sin embargo en estudios realizados se puede observar que el costo puede ser absorbido gracias a que se necesitan menores espesores es decir un menor volumen de material, así como una menor fabricación de piezas para la conformación de la estructura, manteniendo siempre el mismo soporte estructural gracias a las altas propiedades mecánicas, lo cual conlleva a una menor cantidad de uniones conformadas y por lo tanto la longitud de soldaduras realizadas es menor.

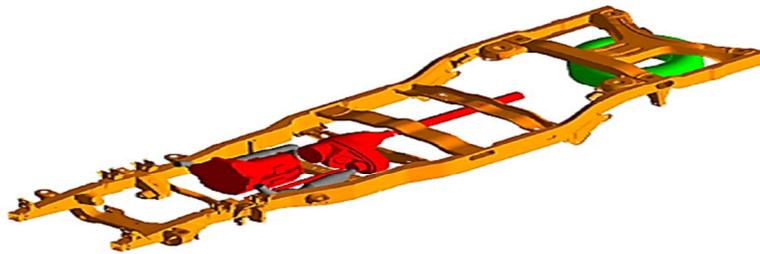


**Figura 2.16** Uso de los diferentes tipos de aceros en la estructura de un automóvil. <sup>[26]</sup>

Un estudio realizado por la Auto/Steel Partnership (A/SP) compara una estructura de un chasis con aceros convencionales y otro en aceros avanzados; se obtuvieron los siguientes datos mostrados en las tablas 2.5 y 2.6, siempre manteniendo el soporte estructural necesario con el menor número de piezas. [18]

**Tabla 2.5** Especificación de total de piezas, peso y soldadura en chasis de acero convencional. [18]

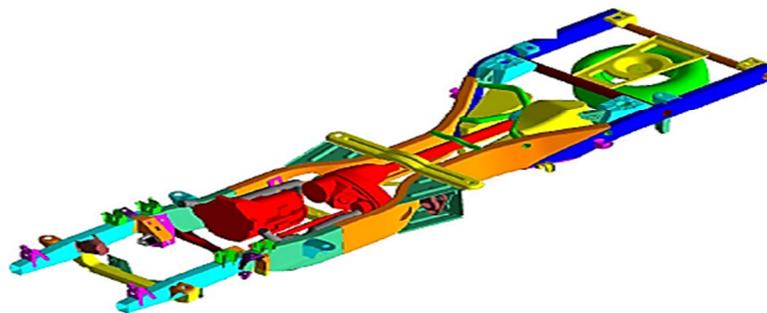
CHASIS Aceros convencionales ( bajo carbono)			
Total de piezas	Peso (Kg)	Longitud total de soldaduras	Rango de espesores(mm)
88	226	51000 mm	2.5-5



**Figura 2.17** Chasis estructural de una camioneta utilitaria con aceros convencionales. [18]

**Tabla 2.6** Especificación de total de piezas, peso y soldadura en chasis en Acero HSS, AHSS. [18]

CHASIS LIGERO Aceros convencionales, HSS y AHSS			
Total de piezas	Peso (Kg)	Longitud total de soldaduras	Rango de espesores(mm)
68	174	24000 mm	4.2-4



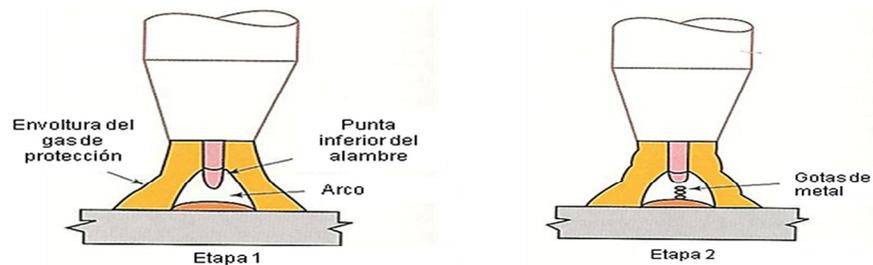
**Figura 2.18** Chasis estructural de una camioneta utilitaria aceros HSS, AHSS y Aceros convencionales. [18]

La diferencia entre los pesos, número de componentes formados y las longitudes de soldadura, son una ventaja en el proceso de producción. [18]

### 2.2.1 Proceso de soldadura GMAW.

El proceso de soldadura de arco con protección de gas (GMAW) es el proceso de soldadura más comúnmente utilizado para estructuras soldadas con calibres altos y para el ensamble de elementos estructurales en la industria automotriz. GMAW es un método utilizado en la industria automotriz por su versatilidad en cuanto a su automatización, además de ser el proceso más rápido en el tipo de uniones utilizadas en el ensamble de elementos estructurales en la industria automotriz. [6]

Los parámetros utilizados en los procesos de soldadura por el método GMAW varían de acuerdo a las especificaciones de cada compañía y sus necesidades en cuanto a las características de la soldadura y propiedades mecánicas, aun así en cuanto al método de transferencia más utilizado es la transferencia tipo spray o por aspersion, la principal característica de este tipo de transferencia es que se obtiene una buena penetración, además de que gracias a ser una transferencia con un flujo altamente direccional, las pequeñas gotas de soldadura vencen la barrera de la gravedad logrando soldar en cualquier posición, a diferencia de los otros dos tipos de transferencia en el cual la transferencia de corto circuito tiene muy poca penetración y la transferencia globular además de un excesivo chisporroteo, solo se puede usar en posición plana. (8) Otra de las ventajas de este tipo de transferencia en el proceso GMAW es la poca salpicadura presentada durante el proceso, debido a que el tamaño de la gota de soldadura es menor a la longitud del arco por lo cual se logra no producir cortos circuitos evitando así la explosión de las gotas de soldadura. [8]



**Figura 2.19** esquema de una transferencia tipo spray o por aspersion.

En la actualidad se han desarrollado nuevas tecnologías en cuanto a máquinas de soldar como la tecnología transferencia de metal en frío (CMT por sus siglas en inglés), el cual da un menor aporte de calor gracias a su sistema, el metal de aporte avanza y se retira automáticamente en cuanto se produce el corto circuito, produciendo la transferencia del metal prácticamente sin corriente y con un mínimo de salpicaduras esto gracias a que en el movimiento de retorno del metal de aporte soporta el desprendimiento de la gota durante el corto circuito. El proceso es mostrado a continuación en la figura 2.20.<sup>[19]</sup>



**Material se dirige a la zona de fusión**



**El arco se apaga cuando el material se sumerge en el baño de fusión.**



**Existe un movimiento de retorno del hilo, soporta el desprendimiento de la gota durante el corto circuito**



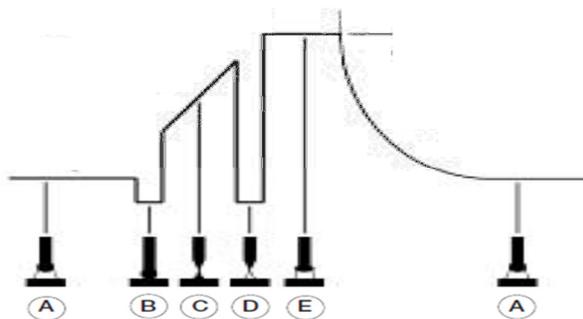
**El movimiento del hilo se invierte y el proceso comienza de nuevo.**

**Figura 2.20** Proceso de soldadura con tecnología CMT. <sup>[19]</sup>

También existen diferentes tecnologías como la de transferencia de tensión en la superficie (STT por sus siglas en inglés), la cual controla el calor de entrada y las salpicaduras, a diferencia de las máquinas convencionales esta no tiene controles para voltaje. Este utiliza controles de corriente, los cuales ajustan la velocidad de alimentación del alambre cuando existan cambios en las longitudes de arco, por lo cual no hay cambios en cuanto al calor de entrada, evitando así el sobrecalentamiento del alambre reduciendo la emisión de gases y el chisporroteo, además de poder usar como gas protector CO<sub>2</sub>, ahorrando en cuanto al consumo de gases de protección más caros. <sup>[20]</sup>.

Este equipo en su proceso lleva cabo la secuencia mostrada en la figura 2.21:

- a) STT produce una bola fundida uniforme en la punta del cordón de soldadura y se mantiene así hasta estar cerca de la superficie.
- b) Cuando la bola fundida toca el charco, la corriente es reducida al nivel más bajo, permitiendo que esta moje dentro del charco.
- c) Automáticamente una forma de onda de precisión (pinch current) se aplica, durante este tiempo un circuito especial determina que el corto está a punto de romperse y reduce la corriente para evitar chisporroteo.
- d) El circuito se restablece a al nivel de corriente más bajo.
- e) Los circuitos del STT restablecen el arco y automáticamente se aplica un pico de corriente el cual es la longitud de arco adecuado seguido del pico de corriente los circuitos cambian a la corriente de inicio. <sup>[20]</sup>.



**Figura 2.21** Esquema del proceso STT. <sup>[20]</sup>.

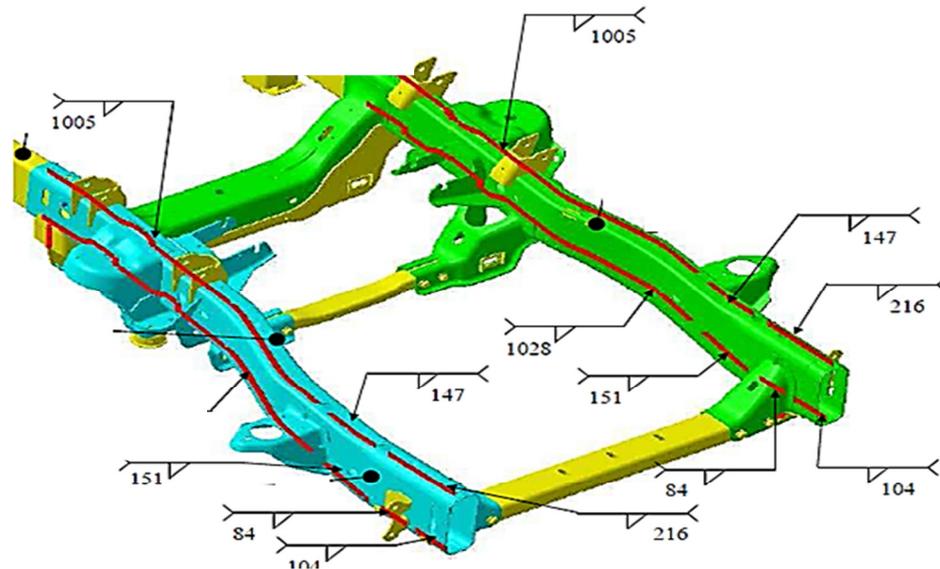
### 2.2.2 Tipo de junta en estructuras en la industria automotriz.

El tipo de junta más utilizado en la industria automotriz es el tipo traslape mostrada en la figura 2.22, siendo esta la más utilizada en elementos estructurales soldados con proceso GMAW con sistema robotizado. [6]

Las uniones a traslape son usadas en la industria automotriz debido al cargamento asimétrico y al momento de flexión adicional asociados a este tipo de uniones, el esfuerzo de la unión a traslape es más bajo que la unión a tope. [6]



**Figura 2.22** Junta típica de un elemento estructural para la industria automotriz [6]



**Figura 2.23** Esquema de uniones soldadas mediante el proceso GMAW para un chasis estructural.

### 2.2.3 Metal de aporte utilizado en procesos de ensamble.

El metal de aporte más comúnmente utilizado en la industria automotriz es el ER70S-3 y ER70S-6, esta denominación está basada en la especificación AWS A5.18 con el nombre de: especificación de electrodos para aceros al carbono y alambre para soldadura de arco con protección de gas y se pueden observar sus propiedades mecánicas y composición química en las tablas 2.7 y 2.8. <sup>[21]</sup>

Este metal de aporte puede presentar menor resistencia que algunos aceros AHSS, es decir que la resistencia a la tensión en el metal de aporte es menor que en el metal base. Sin embargo en pruebas realizadas se ha observado que en ensayos de tensión en una junta a traslape no existen fallas en el metal de soldadura. La mayor parte del tiempo se ha observado que las fallas ocurren en el metal base o en las zonas afectadas por el calor adyacente al metal base, este metal de aporte es utilizado para soldaduras de un solo paso y soldaduras para múltiples pasadas. <sup>[6]</sup>

**Tabla 2.7** Composición química ER70S-3 y ER70S-6 información AWS A.18 <sup>[21]</sup>.

<b>Composición Química ER70S-3 (% e.p.)</b>												
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
0.06-0.15	0.9-1.4	0.45-0.75	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.5	--	--	--
<b>Composición Química ER70S-6 (% e.p.)</b>												
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Zr	Al
0.06-0.15	1.4-1.85	0.80-1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.03	0.5	--	--	--

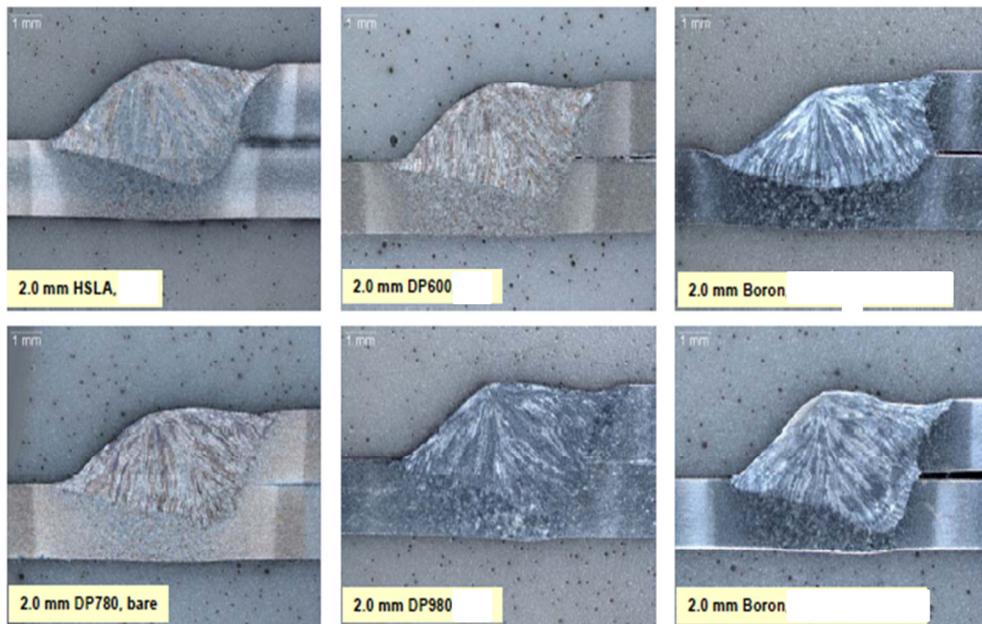
**Tabla 2.8** Propiedades mecánicas ER70S-3 y ER70S-6 información AWS A.18 <sup>[21]</sup>.

<b>Propiedades mecánicas ER70S-3 y ER70S6</b>	<b>Cantidad</b>
Mínimo esfuerzo a la tensión (MPa.)	480
Mínimo esfuerzo de cedencia (MPa.)	400
Mínimo porcentaje de elongación (%)	22

## 2.2.4 Comportamiento de los aceros AHSS probados a esfuerzos de tensión resistentes al corte en la industria automotriz.

Como se mencionaba anteriormente; las uniones en las cuales, a pesar que el metal de aporte tiene menores propiedades mecánicas que los aceros avanzados, en ensayos de tensión al corte, las fracturas se localizan en la zona afectada por el calor y el metal base, esto se debe al hecho de que la fuerza estructural de la junta a traslape no solo depende de la resistencia del metal de aporte, sino también de la geometría de la soldadura que influye en la distribución de esfuerzos en la región soldada.<sup>[6]</sup>

Con el fin de evaluar las diferencias microestructural en la región de soldadura de los diferentes aceros AHSS, Zhili Feng [6] del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, en algunos estudios realizaron pruebas de esfuerzo de tensión resistente al corte (Tensile Shear Strength) con los materiales mostrados en la figura 2.24.<sup>[6]</sup>



**Figura 2.24** materiales AHSS sometidos a pruebas de tensión.<sup>[6]</sup>

En estos estudios, las soldaduras realizadas se basaron en parámetros representativos en prácticas actuales en la industria automotriz. La velocidad de soldadura que controla la productividad, se fijó en 50 in/min, la corriente y voltaje se manejaron a 230 Amperes y 24 Voltios respectivamente ajustando el gas de protección y las posiciones adecuadas para lograr una transferencia por aspersion. [6]

Se mantuvo un perfil de la soldadura lo más consistente posible para no tener variaciones de esfuerzos debido a diferencias de la geométricas. [6]

En la figura 2.25 se muestran los resultados de los ensayos a tensión de 11 diferentes tipos de metales incluyendo metales DP600, DP780 y DP900 que son aceros AHSS de interés para este trabajo, para cada tipo de acero se proporciona el último esfuerzo de tensión tanto para la junta soldada como para el metal base antes de la aplicación de la soldadura.

Hay que tener en cuenta que para cada metal base se hizo una prueba de tensión y en los cuales los resultados fueron mayores a los especificados por el fabricante. [6]

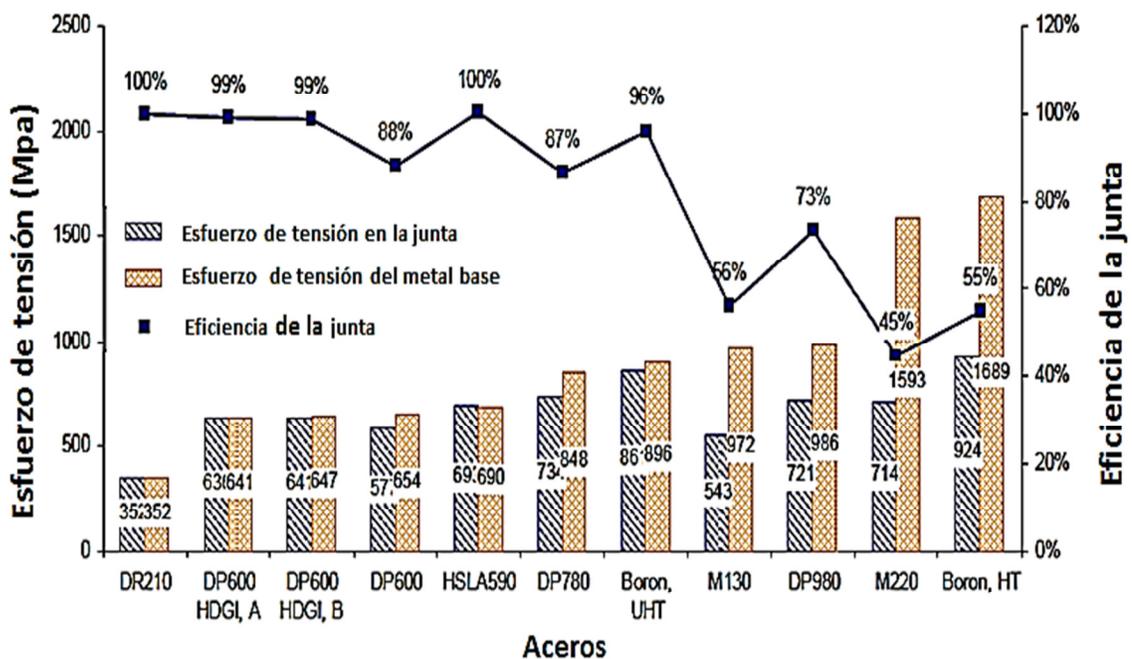
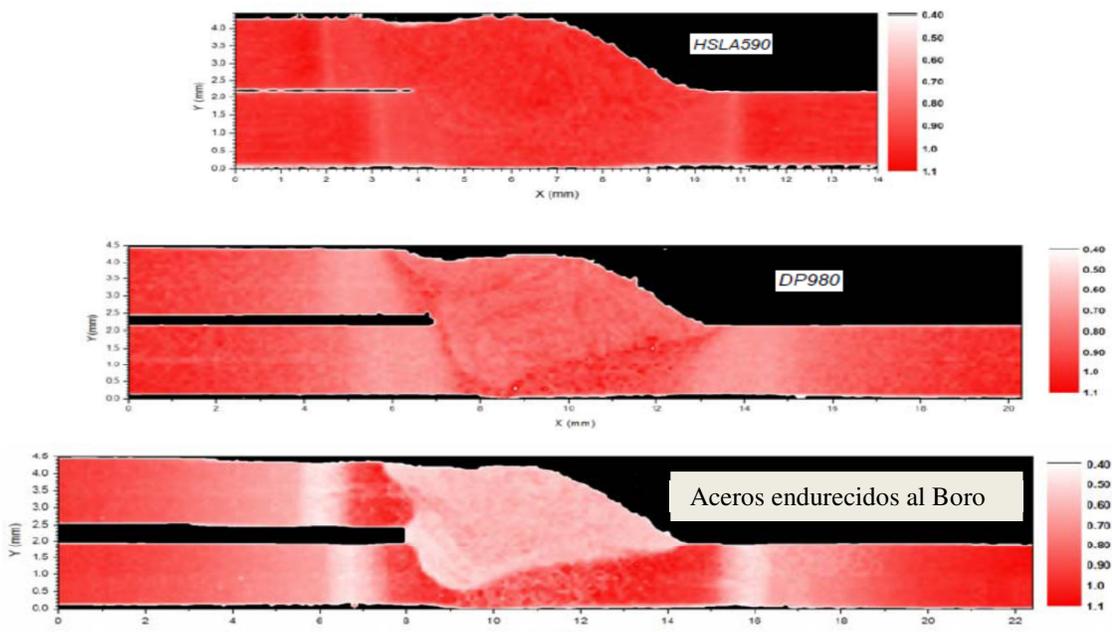


Figura 2.25 En esta gráfica donde se muestra la eficiencia de la junta. [6]

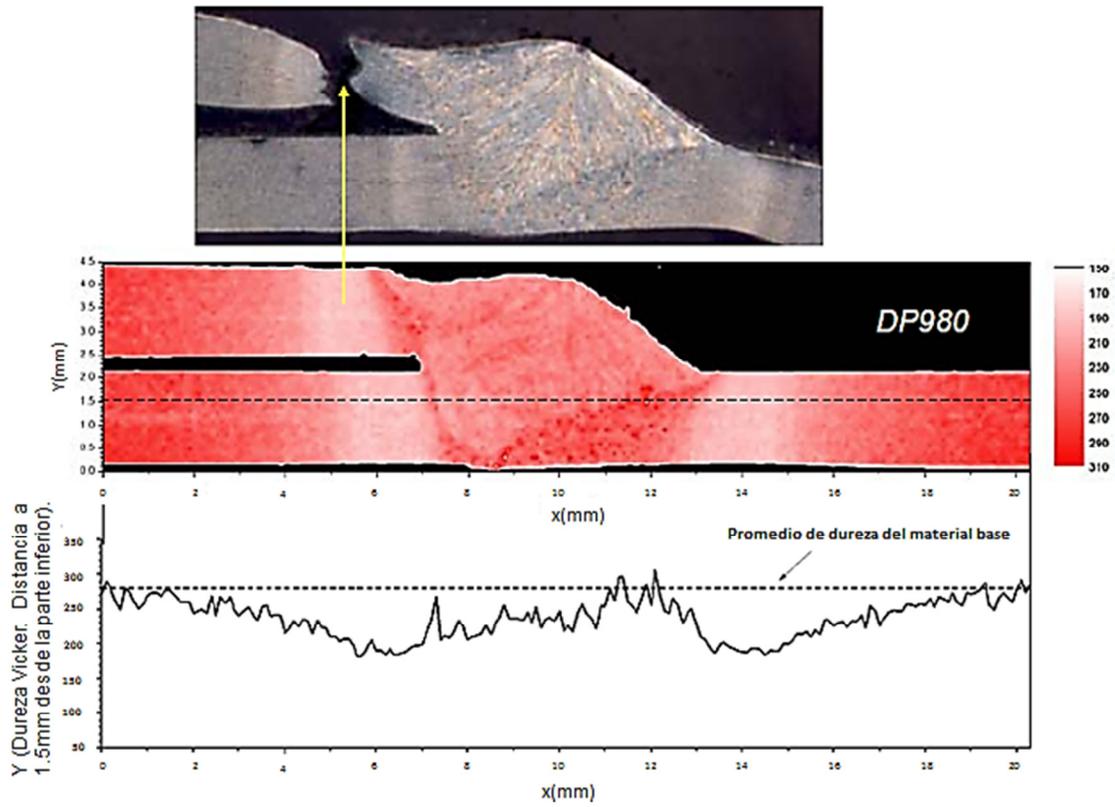
En los resultados obtenidos se observó que conforme aumenta la resistencia del metal base aumenta la resistencia de la junta, pero esto se limita hasta materiales con un esfuerzo de tensiones menores a 896 MPa, esto debido a la zona de ablandamiento y a la concentración de esfuerzos en la junta, después de este valor la eficiencia de la junta decrece teniendo valores de esfuerzo de tensión menores a los esfuerzos de tensión del material base. [6]

En la figura 2.26 mostrada a continuación se observa la diferencia de durezas entre el acero, la soldadura y las zonas afectadas por el calor. La escala varía del color rojo 1 que es la resistencia del metal base y baja o sube de tonalidad de acuerdo a la dureza, todo esto realizado en por Zhili Feng [6] del Laboratorio Nacional de Oak Ridge.

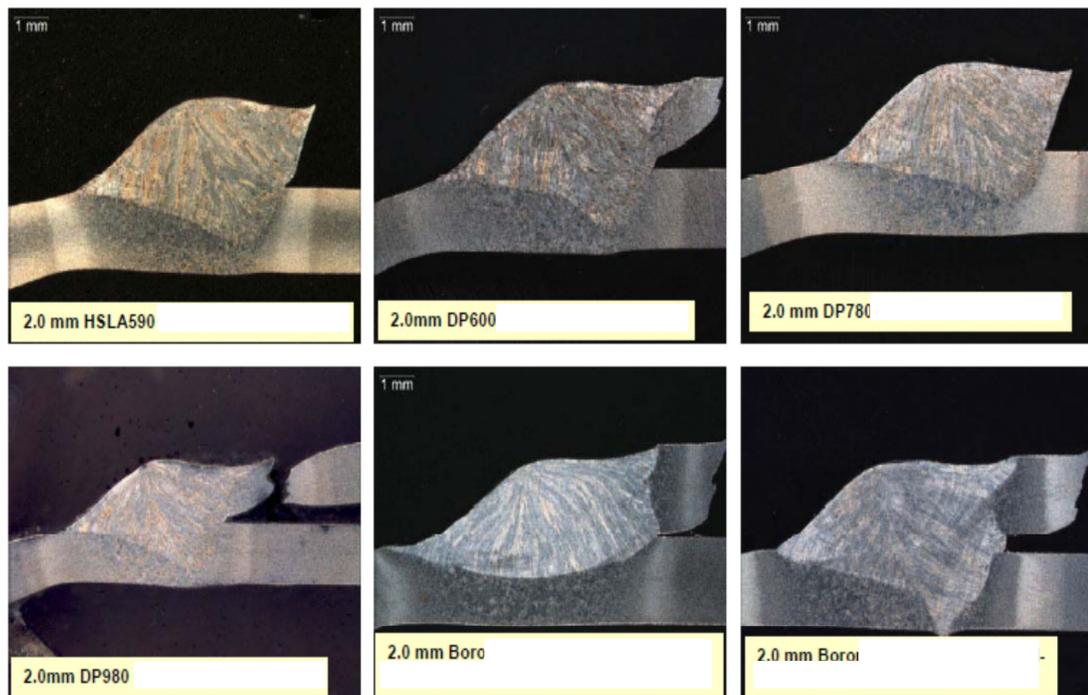


**Figura 2.26** Diferencia de durezas entre la zona afectada por el calor, metal base y metal de soldadura siendo 1 el color original de la dureza del metal base y a mayor color más dureza a menor color zonas blandas. (6)

Como se puede observar a continuación, en el acero DP 980 la fractura ocurre en una zona de ablandamiento cercana a la zona de fusión. Donde la dureza se encuentra por debajo de los 200 HV mientras que la dureza promedio del material DP980 es aproximadamente de 280 HV. [6]



**Figura 2.27** Relación de la dureza y la fractura en una prueba de resistencia de tensión al corte en un acero DP980 donde fractura en la zona afectada por el calor. <sup>[6]</sup>



**Figura 2.28** Zona de ruptura en diferentes aceros AHSS. <sup>[6]</sup>

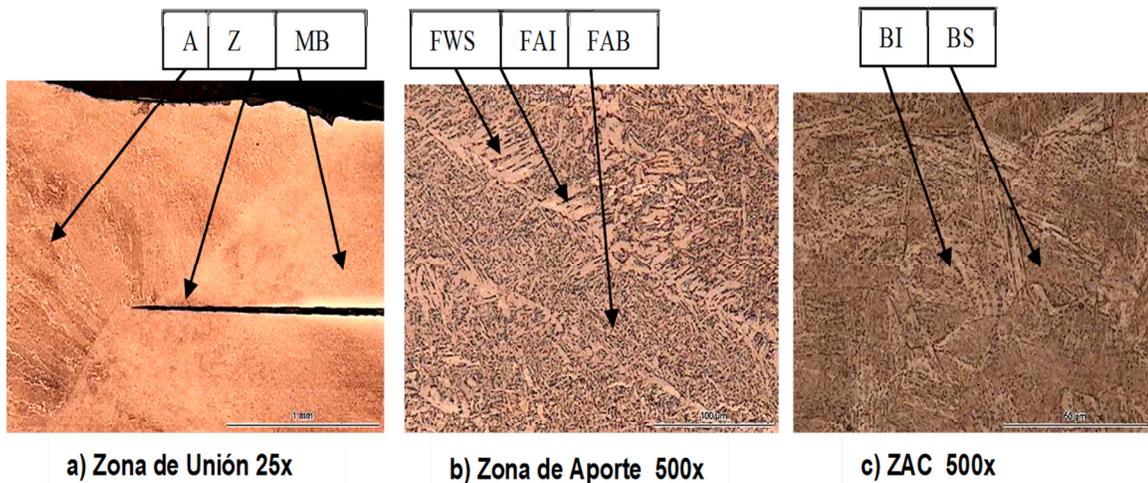
## **2.2.5 Impacto del proceso de soldadura GMAW en la microestructura de los aceros AHSS doble fase (DP) y plasticidad inducida por transformación (TRIP).<sup>[12]</sup>**

### **2.2.5.1 Aceros doble fase.**

Debido, a la importancia de la optimización de procesos en la industria, se han realizado estudios con modelaciones matemáticas, donde se compararon las diferentes velocidades de enfriamiento de acuerdo a los diversos procesos de soldadura en aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), donde las velocidades de enfriamiento más altas fueron: en el proceso de soldadura de puntos por resistencia (RSW), seguidas de la soldadura por rayo láser (LBW) y por último la soldadura que se utiliza en el ensamble de piezas estructurales GMAW,<sup>[11]</sup> a pesar de que el proceso GMAW tiene velocidades más lentas en cuanto a su enfriamiento, se pudiera llegar obtener estructuras no deseables en sus zonas afectadas por el calor, afectando el rendimiento de las uniones.

#### **2.2.5.1.2 Microestructura y evaluación de la dureza de un acero DP600 mediante el proceso GMAW transferencia de metal en frío CMT.**

La profesora Volpone del instituto italiano de la soldadura, realizó un estudio utilizando el proceso GMAW con el sistema Cold Metal Transfer (transferencia de metal en frío) en aceros DP grado 600 y se analizaron las diferentes zonas de la soldadura como los son: la zonas de fusión, la zona del metal de aporte y la zona afectada por el calor que son las partes más críticas en la unión debido a la formación de las diferentes fases y cambios microestructurales sufridos debido al calor de entrada y a la diferentes velocidades de enfriamiento. En la figura 2.29 como ya se mencionó anteriormente se pueden observar las partes más críticas de la soldadura así como las características microestructurales, las cuales afectan directamente a las propiedades mecánicas de la unión<sup>[12]</sup>.



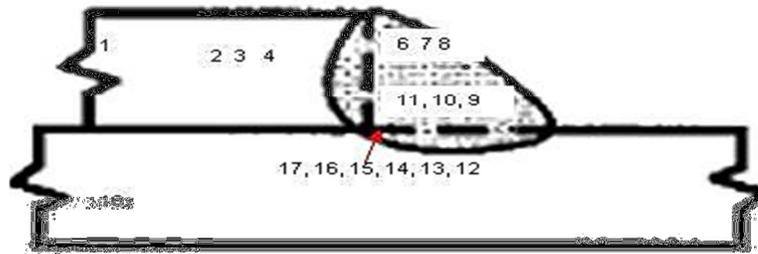
**Figura 2.29** Aspecto microestructural de DP 600 soldado con GMAW: CMT; (a) Zona de unión de las dos placas, evidenciando zona de aporte (A), ZAC (Z) y metal base (MB); (b) Zona de aporte, mostrando Ferrita Widmanstätten secundaria (FWS), bainas de Ferrita alotriomórfica (inter granular, FAI) y ferrita acicular bainítica (FAB); (c) ZAC, mostrando bainita inferior (BI) y bainita superior (BS). Atacado con  $\text{HNO}_3$  2% (Nital)+  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (Le Pera). Parámetros utilizados: 128 Amper, 14 V, 600 mm/min. Calor de entrada 4551. 68 J/in. <sup>[12]</sup>

En cuanto a las fases microestructurales presentes en la zona afectada por el calor, se puede observar bainita inferior (BI) y bainita superior con alineación de carburos (BS), lo cual evidencia un enfriamiento con transformaciones de fase del tipo reconstructivo. En estos casos se puede aplicar el concepto de para-equilibrio, es decir que no existe redistribución de hierro o átomos sustitucionales en la intercara entre las fases, y solamente puede difundir el carbono intersticial, generando la formación de bainitas. <sup>[12]</sup>

En los ensayos de dureza realizados se detectó que la mayor dureza se encuentra en la ZAC, con una magnitud de 314  $\text{HV}_{0.1}$ , como se muestra en la tabla 2.9 y en el esquema la distribución de durezas figura 2.30.

**Tabla 2.9** Durezas en DP600.

GMAW DP1																		
Identaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
HV <sub>0,1</sub>	165	216	202	227	256	212	215	240	207	304	290	243	276	285	314	213	309	176
Distancia $\mu\text{m}$		675	566	667	452	615	787		320	849		374	783	978	1590	1109		

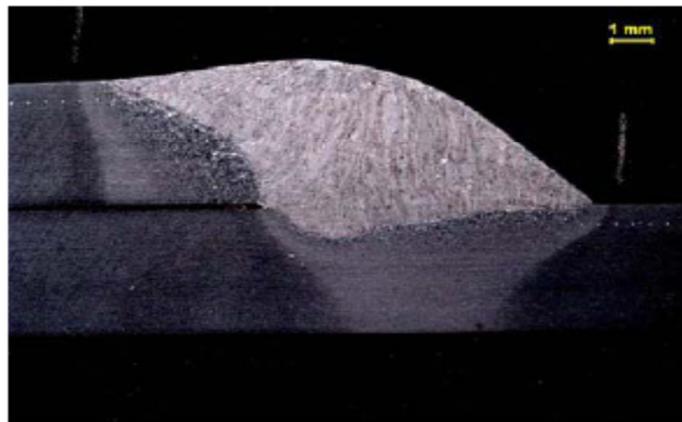
**Figura 2.30** Distribución de durezas por proceso GMAW de acero DP 600 <sup>[12]</sup>

Por otro lado, en las figura 2.31 y 2.33 se observan dos especímenes con el mismo espesor de placa (3.4mm), los cuales fueron soldados con parámetros de soldadura mostrados en las tablas 2.10 y 2.11 respectivamente, que difieren en lo que respecta a su tipo de corriente (corriente directa o corriente alterna), su voltaje y amperaje.

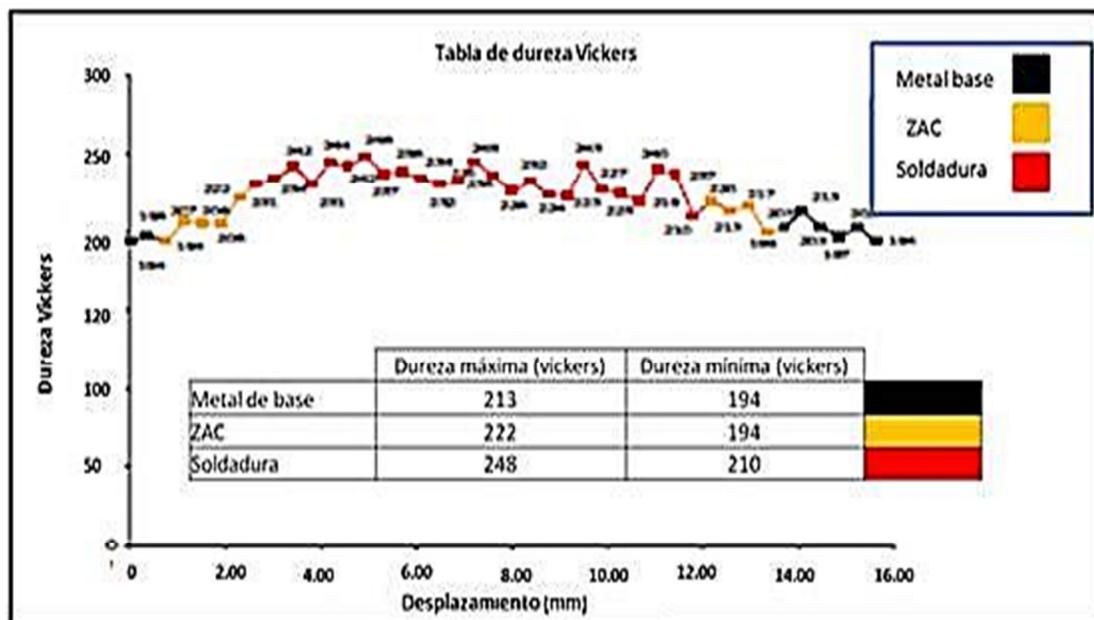
Uno de las principales puntos que se pueden observar a continuación es que la dureza en la zonas afectadas por el calor y el metal base son menores que en el metal de soldadura, más sin embargo, existe una diferencia notable en el perfil de durezas de acuerdo al tipo de corriente, amperaje y voltaje aplicado, esto debido a que estas variables afectan directamente en la microestructura debido a la diferencia en el calor de entrada proporcionado como se muestra en las figuras 2.32 y 2.34. <sup>[9]</sup>

**Tabla 2.10** Características de soldadura de una unión de un DP 600 de 3.4 mm de grosor utilizando corriente directa (CD) y un tipo de alambre ER70S-3. <sup>[9]</sup>

Características	Unidad	Cantidad
Espesor de las placas	mm	3.4
Tipo de corriente	tipo	CD
Velocidad de avance	in/min	30
Tipo de alambre	tipo	ER70S-3
Corriente	amperes	240
Voltaje	voltios	28
Protección de gas	%	90 Ar-10 CO <sub>2</sub>



**Figura 2.31** Macro ataque en acero DP 600 utilizando corriente directa. <sup>[9]</sup>



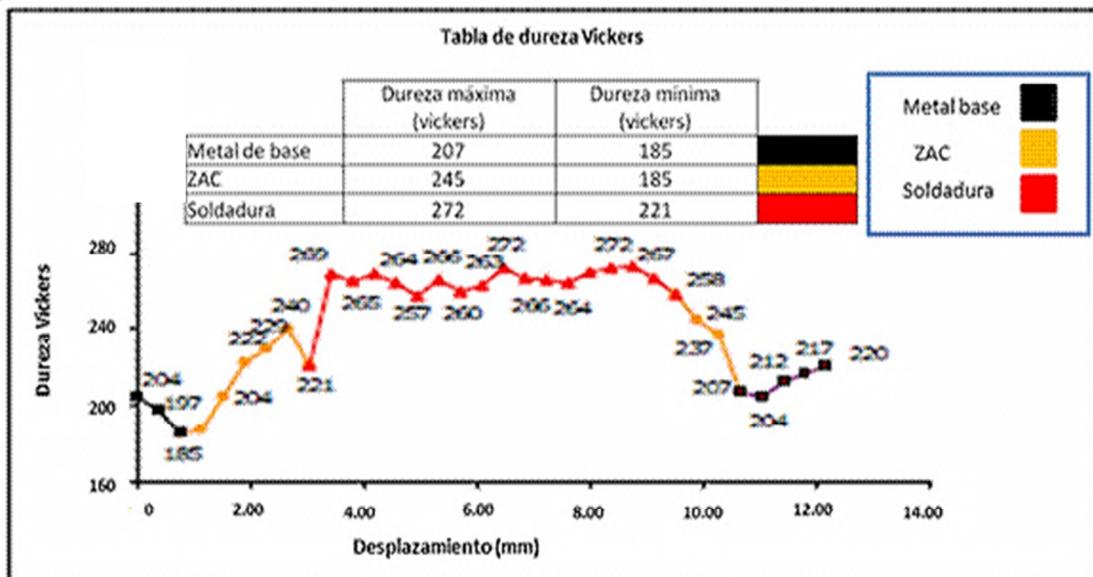
**Figura 2.32** Resultados de durezas de la unión realizada en espécimen DP 600. <sup>[9]</sup>

**Tabla 2.11** Características de soldadura de una unión de un DP 600 de 3.4 mm de espesor utilizando corriente alterna (CA) y un tipo de alambre ER70S-3. <sup>[9]</sup>

Características	Unidad	Cantidad
Espesor de las placas	mm	3.4
Tipo de corriente	tipo	CA
Velocidad de avance	in/min	30
Tipo de alambre	tipo	ER70S-3
Corriente	amperes	195
Voltaje	voltios	22
Protección de gas	%	90 Ar-10 CO <sub>2</sub>



**Figura 2.33** Macro ataque de acero DP 600 usando corriente alterna <sup>[9]</sup>

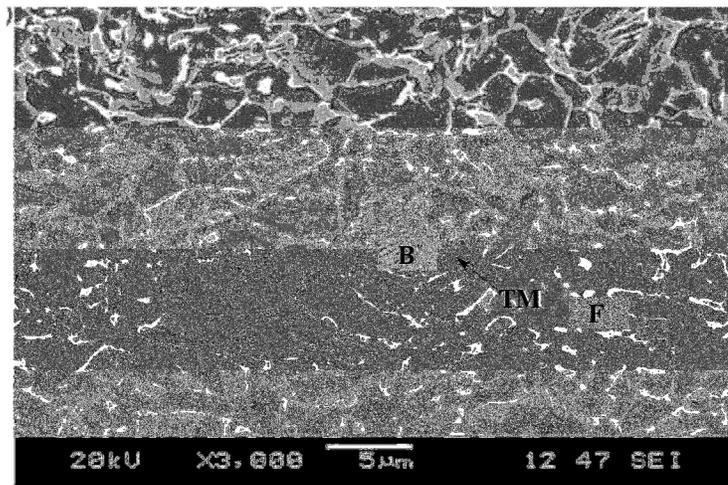


**Figura 2.34** resultados de durezas de la unión realizada en espécimen DP 600. <sup>(9)</sup>

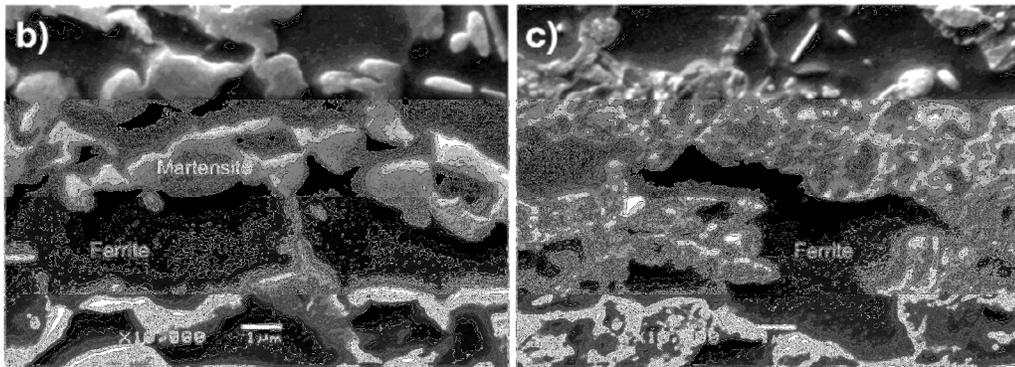
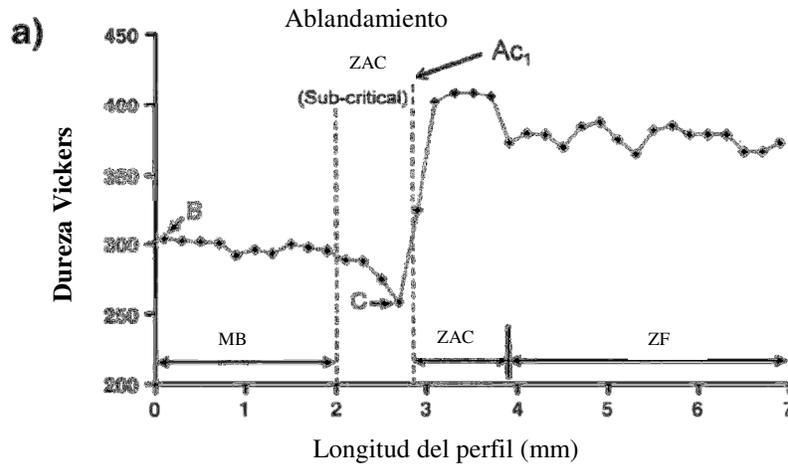
Se puede observar, que en la soldadura donde se aplicó un menor calor de entrada (tabla 2.11), se obtuvieron durezas más altas (ver figura 2.34), esto nos indica que al aplicar menor calor de entrada la velocidad de enfriamiento es más rápida siempre y cuando el espesor de la placa y el tipo de material sean el mismo, esto hace que se formen fases más duras en la zona afectada por el calor y el metal de soldadura.

### 2.2.5.1.3 Zona afectada por el calor DP600.

En un estudio realizado en la universidad de Waterloo por Baltazar Hernández [23] utilizando el proceso de laser diodo en aceros DP600 en una junta a tope, se examinaron las diferentes zonas, en la zona de fusión se observó que existía principalmente martensita con algunas placas de ferrita y bainita, esto debido al rápido enfriamiento en el charco de soldadura debido a este tipo de proceso, la zona afectada por el calor se divide en dos, la zona más cercana a la zona de fusión y la zona más cercana al metal base, en la zona cercana de la zona de fusión, se encontró principalmente martensita, sin embargo en la zona afectada por el calor adyacente al metal base se observó una baja en la dureza, esta zona es la zona de ablandamiento, la cual se debe al revenido de la martensita preexistente en el metal base, además de encontrar bainita y algo de austenita retenida preexistente.<sup>[23]</sup>



**Figura 2.35** Microestructura mediante SEM en la zona de ablandamiento, donde se puede observar la formación de bainita (B), martensita revenida (TM) y ferrita (F).<sup>[7]</sup>



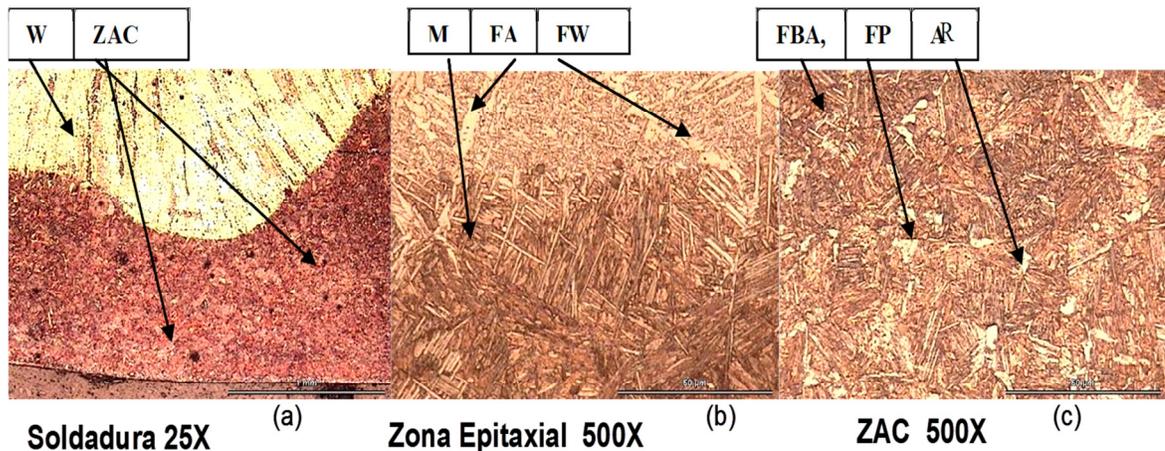
**Figura 2.36** a) Perfil de durezas donde se muestra la zona de ablandamiento en una unión por medio de láser, b) Microestructura del metal base DP600 observada mediante SEM c) Martensita revenida del metal base observada mediante SEM <sup>[23]</sup>

### 2.2.5.2 Aceros TRIP.

Se han realizado pocas investigaciones del comportamiento de los aceros TRIP al ser sometidos a procesos de soldadura, lo que sí se sabe es que el comportamiento de las uniones soldadas, depende de la composición química del acero, contrario al comportamiento de formado, el cual depende principalmente de la microestructura y la condición superficial del material <sup>[26]</sup>. El alto contenido de carbono equivalente de los aceros de grado TRIP, comparado con los aceros estructurales, resulta en un alto potencial de endurecimiento después de la soldadura. Adicionalmente, el comportamiento de fractura es atípico, esto se vio después de realizar pruebas destructivas. <sup>[13]</sup>

### 2.2.5.2.1 Microestructura y evaluación de la dureza de un acero TRIP 800 mediante el proceso GMAW transferencia de metal en frío CMT.

Al igual que en los aceros DP600, se realizaron soldaduras utilizando el proceso GMAW con el sistema de transferencia de metal en frío en aceros TRIP grado 800 y se analizaron las diferentes zonas de la soldadura como los son: la zonas de fusión, la zona del metal de aporte y la zona afectada por el calor que al igual que en los aceros DP600 son las partes más críticas en la unión debido a la formación de las diferentes fases y cambios microestructurales debidos al calor de entrada y a la diferentes velocidades de enfriamiento.



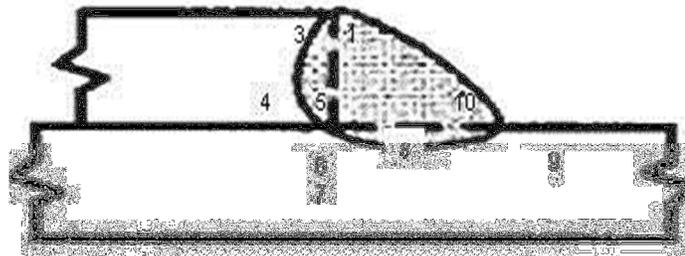
**Figura 2.37** La foto (a) muestra la afectación en todo el espesor de la placa inferior, la letra W representa la zona de soldadura y las siglas ZAC se refieren a la zona afectada por el calor. Las fotos (b) y (c) presentan la zona epitaxial y la ZAC, respectivamente, en la fotografía (b) se muestra el crecimiento de agujas de martensita (M) y ferrita intragranular en zona de aporte (FA y FW), en la fotografía (c) martensita con ferrita bainítico acicular (FBA), ferrita poligonal (FP) y posiblemente austenita retenida (AR) en la ZAC. Atacado con  $\text{HNO}_3$  2% (Nital)+  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (Le Pera). Parámetros: 118 Amper, 14.3 Volts y 800 mm/min. Calor de entrada: 3214.50. J/in. <sup>[12]</sup>

En cuanto a la las fases presentes bajo el proceso de GMAW en aceros TRIP, se detectó que todo el espesor de la placa fue afectado térmicamente, como se muestra en la 2.37, en la foto (b) se aprecia la zona epitaxial con ferrita bainítica acicular (FBA) con ferrita alotriomórfica (FA) y Widmanstätten (FW); en la zona afectado por el calor, se encontró ferrita bainítica acicular (FBA), ferrita

poligonal (FP) y posiblemente austenita retenida (AR), como se muestra en la foto (c). La dureza mayor encontrada fue de 485 HV<sub>0,1</sub>, justo en la ZAC de la placa superior. (Figura 2.38 y Tabla 2.12).

**Tabla 2.12** valores de microdureza para soldadura en aceros TRIP por GMAW.

GMAW TRIP										
Identaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV <sub>0,1</sub>	287	430	485	390	206	243	461	460	430	390
Distancia μm	763	597	201		458	993	272			



**Figura 2.38** Distribución de durezas por proceso GMAW de acero TRIP 800 <sup>[12]</sup>

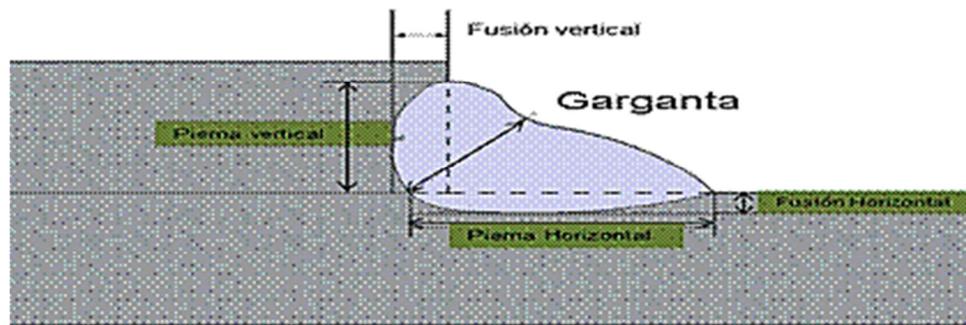
## 2.3. Criterios de aceptación y defectos en la soldadura en la industria automotriz.

En la actualidad, la industria automotriz tiene uno de los mayores estándares de calidad en cuanto a sus productos, esto debido a la gran competencia de esta rama en el mercado. También es importante tomar en cuenta que la calidad está relacionada directamente con el rendimiento y la seguridad del vehículo, es por eso; que en cuanto a soldadura, las diferentes marcas tienen sus estándares de calidad que están basados principalmente en el estándar AWS 8.8M “Especificaciones para la calidad de soldadura en la industria automotriz- soldadura por arco en aceros”, la cual nos habla de los requerimientos mínimos necesarios para la calidad de la soldadura en componentes automotrices. La especificación D8.8 abarca aceros DP y HSLA además de aceros al carbono y aceros que tengan un bajo contenido de carbono equivalente, los cuales generalmente no requieren ningún precalentamiento ni post tratamiento térmico.

### 2.3.1 Requerimiento de dimensiones de las soldaduras de filete.

La longitud de las piernas de la soldadura de filete y la garganta debe de cumplir con las siguientes dimensiones.

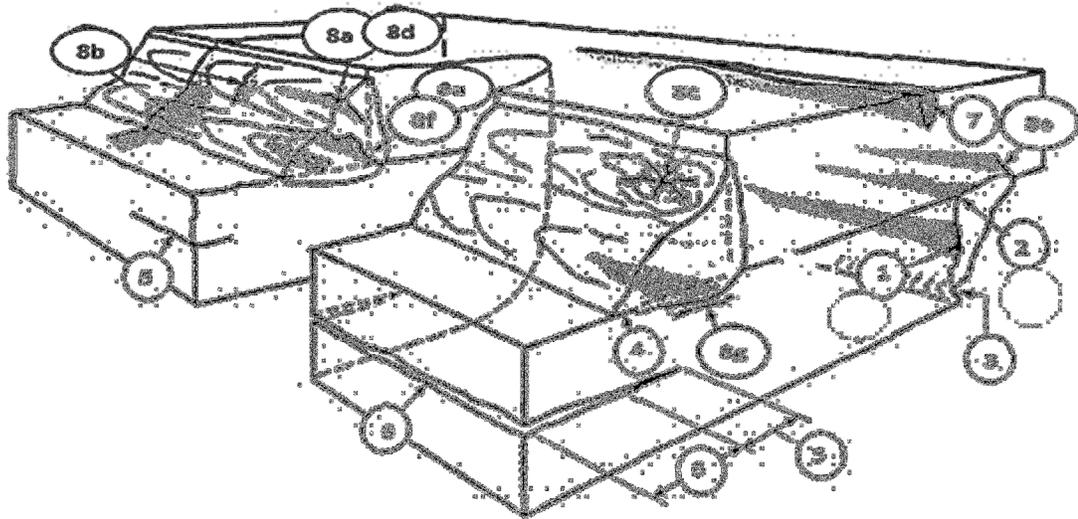
- 1.- El mínimo de tamaño de las piernas debe ser igual o mayor del 90% del material más delgado.
- 2.- La garganta de la soldadura no debe ser menor del 60% del material soldado más delgado.



**Figura 2.39** requerimientos de pierna y garganta en la soldadura.

### 2.3.2 Defectos más comunes en las uniones soldadas y sus principales causas.

Los defectos más comunes en la soldadura, en los procesos de ensamble en partes estructurales en juntas a traslape se pueden observar en la figura 2.40 como lo menciona la AWS B1.10.



**Figura 2.40** Defectos comunes en soldaduras de doble filete. <sup>[22]</sup>

De acuerdo a los números mostrados en la figura estos son los defectos:

- 1.-Fusión incompleta la cual se encuentra entre la zona del metal base y el metal de soldadura.
- 2.-Penetración incompleta del metal de soldadura en el metal base principalmente en la raíz de la unión.
- 3.-Socavado en el metal base debido al excesivo al calor de entrada.
- 4.-Traslape o superposición del metal de soldadura sobre el metal base, este defecto se observa principalmente en el pie de la soldadura.
- 5.-Laminación, es un defecto de fabricación del metal base que generalmente se encuentra en la mitad de la sección del espesor de este.
- 6.-La Delaminación, exposición de la laminación del metal base en la superficie.
- 7.-Defectos de laminación superficiales en el metal base, estos pueden causar grietas si la soldadura es aplicada en este tipo de defectos.

8.- Grietas, existen diferentes tipos como lo son: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) cráter, (d) garganta, (e) pie, (f) raíz y (g) zona afectada por el calor. <sup>(22)</sup>

Además de las discontinuidades ya mencionadas existen otros tipos las cuales se asocian directamente al proceso de fabricación, de los que se pueden mencionar algunos a continuación.

### **2.3.2.1 Uniones soldadas con falta de penetración de raíz, debido al cambio de morfología de las piezas que conforman el ensamble.**

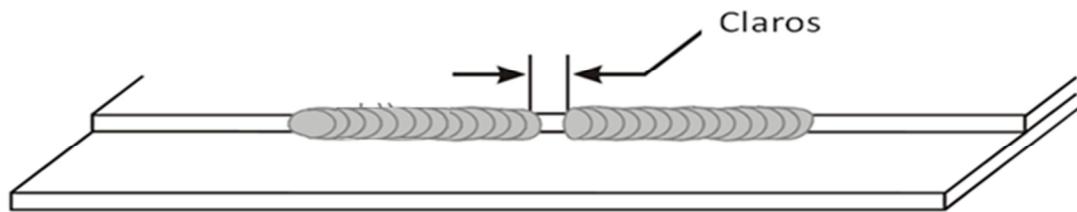
En la implementación de los nuevos materiales AHSS, se encuentran que el conformado de los aceros de alta resistencia, es una de las principales problemáticas, debido a que los nuevos aceros avanzados de alta resistencia poseen unas características mecánicas diferentes a las convencionales, que se traducen en un desconocimiento por parte de algunas empresas a la hora de trabajar con ellos.

La elección del material a utilizar para los distintos procesos puede generar problemas, como es el caso de los materiales utilizados para prensa de doblado o punzadoras, esto debido a que al aumentar la resistencia del acero a conformar, la resistencia del acero de los instrumentales para realizar el conformado también debe aumentar, para impedir un desgaste excesivo y así evitar cambiar la morfología de las piezas, debido a que en el proceso de ensamble, los robots soldadores están programados para dirigirse a la raíz, cualquier cambio en la morfología de las piezas puede afectar en realizar la soldadura en el punto preciso.

### **2.3.2.2 Claros en las uniones soldadas por interrupción de suministro de alambre.**

El conducto del electrodo y su forro se conectan a una ménsula adyacente a los rodillos de alimentación del motor que suministra el electrodo. El conducto sustenta, protege y dirige el electrodo desde los rodillos de alimentación hasta la pistola y la punta de contacto. Se necesita una

alimentación ininterrumpida del electrodo para asegurar un arco estable. Es preciso evitar que el electrodo se doble o se pandee. Si el electrodo no está bien sustentado en todos los puntos, entre los rodillos y la punta de contacto, tendera a atascarse, esto provocara que el suministro de alambre sea interrumpido induciendo a formar claros en la unión, así como también el desgaste de los rodillos y mala calidad del alambre, esto comúnmente por falta de mantenimiento y revisión de la calidad.



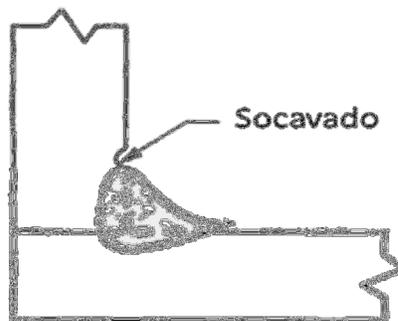
**Figura 2.41** Esquema de definición de un claro. <sup>[27]</sup>

### 2.3.2.3 Socavamiento.

En los procesos de producción cualquier aumento en la velocidad de desplazamiento, voltaje o corriente así como un mal ángulo de la pistola puede causar un problema de socavamiento, esto comúnmente ocurre por errores en la programación de los robots encargados del proceso de soldadura. <sup>[8]</sup>

#### 2.3.2.3.1 Criterios de aceptación:

En soldaduras menores a 12 pulgadas no debe de existir socavamiento y en soldaduras mayores a 12 pulgadas el espesor de la placa no debe de tener más del 20% de socavación.



**Figura 2.42** Aspecto de un socavado.

### 2.3.2.4 Porosidades.

Comúnmente la porosidad en los proceso de soldadura, es por la falta de cobertura del gas de protección, la cual puede ser ocasionada por una falta de limpieza en la boquilla de gas, o insuficiente flujo de gas de protección, posibles corrientes de aire en la zona donde se realiza la soldadura, una distancia entre la boquilla de trabajo y la pieza de trabajo excesiva o una superficie en la pieza de trabajo contaminada. [8]

#### 2.3.2.4.1 Criterios de aceptación.

- 1) La suma de los diámetros de los poros en una superficie de 25 mm no debe de exceder 6.4 mm.
- 2) El máximo diámetro de los poros no debe de exceder 1.6 mm. [14]

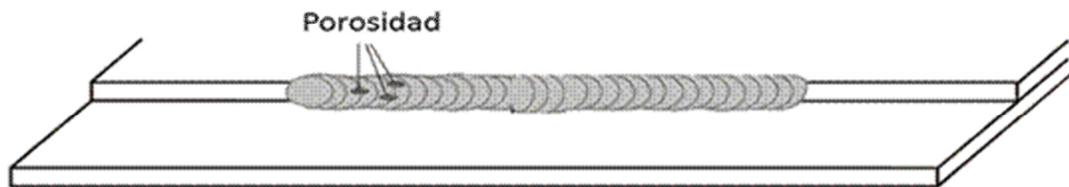


Figura 2.43 Porosidad. (27)

### 2.3.2.5 Agrietamiento:

El agrietamiento puede ocurrir por diversas razones, como puede ser un cordón de soldadura demasiado pequeño lo cual se puede corregir con una velocidad de avance menor. Excesivo aporte de calor en la pieza de trabajo, esto se evita reduciendo los valores de voltaje, amperaje o aumentando la velocidad de avance. Se necesita revisar también si hay que precalentar el material o darle un tratamiento térmico para evitar un endurecimiento excesivo en la zona afectada por el calor o excesivos esfuerzos residuales. [8]

#### 2.3.2.5.1 Criterios de aceptación.

Las grietas no son permitidas, no importa el tipo de grieta ni su localización. [14]

## 2.4. Reparación de aceros avanzados AHSS.

Con la utilización de estos nuevos aceros, una de las preguntas más cuestionadas es si estos aceros pueden ser reparados o recalentados en sus zonas soldadas, según el Instituto internacional del Hierro y el Acero, estos aceros pueden ser reparados mediante el proceso GMAW en los aceros DP, MART Y TRIP ya conservan propiedades mecánicas aceptables en las zonas reparadas.<sup>[15]</sup>

Las recomendaciones para el calentamiento de los aceros avanzados son muy específicas, de acuerdo al Instituto internacional del Hierro y el Acero el calentamiento no debe de usarse para el proceso de enderezado en este tipo de materiales, la temperatura necesaria para enderezar el acero dañado causa degradación de las propiedades mecánicas.<sup>[15]</sup>

Debido a que los procesos de reparación son necesarios en la industria automotriz, tanto para la recuperación de piezas en un proceso de ensamble como para la reparación de piezas fuera de especificación, y con la finalidad de ahorrar costos y tiempos la industria, se han realizado pruebas para ver el comportamiento mecánico de estos elementos, siguiendo un proceso de simulación de reparación mediante flama de calentamiento y soldadura:

Los materiales que se consideraron fueron los siguientes: HSLA 340, DP600, DP780 y TRIP 600

Debido a que un metal tiene diferentes propiedades mecánicas en su forma original que cuando ya está formado y pintado, se consideró que en el proceso de formado el material se deforma un 8% y en el proceso de pintura el material se calienta a una temperatura de 170°C por 20 minutos.

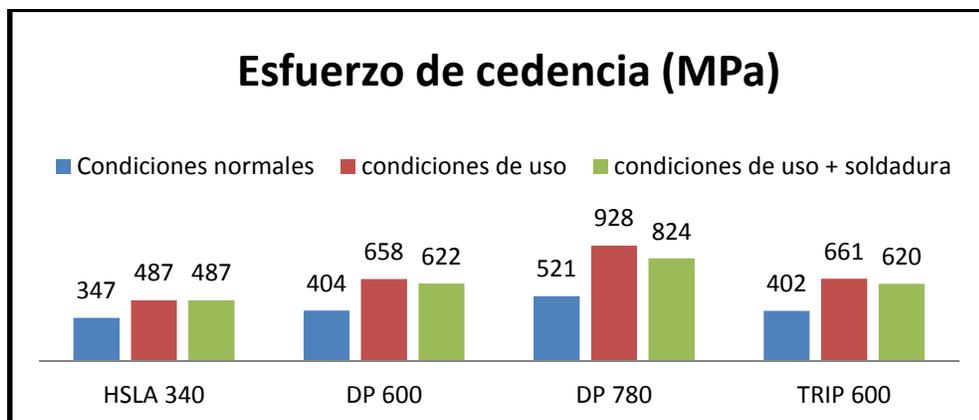
Con las características de deformación y calentamiento ya mencionadas se trataron placas de los materiales HSLA 340, DP600, DP780 y TRIP 600 realizándose pruebas a tensión en dos diferentes condiciones.<sup>[16]</sup>

**La primera condición.** Acero con sus propiedades mecánicas originales, el cual se calentó a 170°C por 20 minutos, enseguida se realizó un cordón de soldadura mediante el proceso GMAW en forma transversal al cupón, el cual se realizó siguiendo las normas ASTM tanto para la fabricación del cupón como para su prueba a la tensión.<sup>[16]</sup>

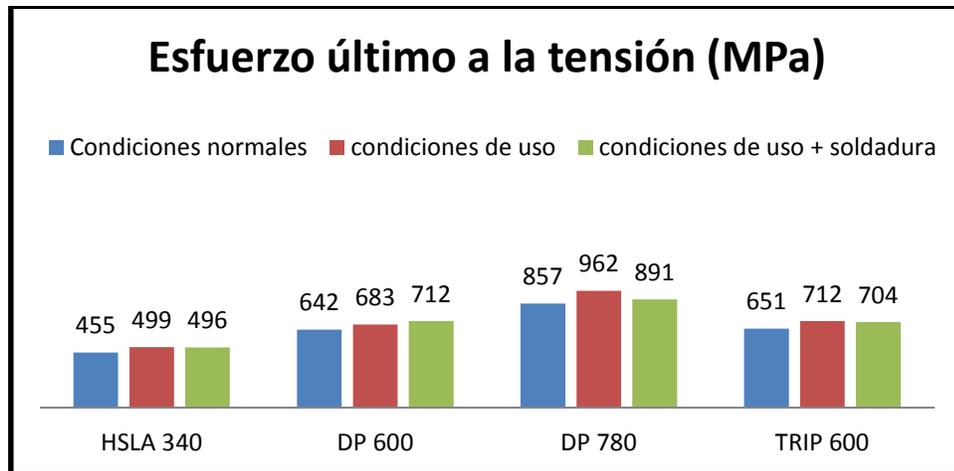
**La segunda condición.** Acero con sus propiedades mecánicas originales, el cual se calentó a 170°C por 20 minutos, enseguida se le aplicó un calentamiento de 650 grados centígrados por 90 segundos y después un cordón de soldadura mediante el proceso GMAW en forma transversal al cupón el cual se realizó siguiendo las normas ASTM tanto para la fabricación del cupón como para su prueba a la tensión.<sup>[16]</sup>

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de tensión como lo son: el esfuerzo último a la tensión, el esfuerzo de cedencia y la elongación total en porcentaje.

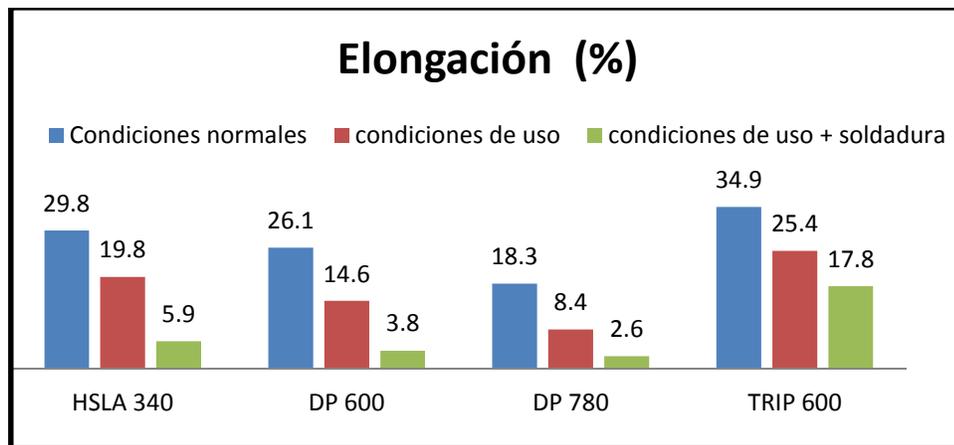
### Primera condición



**Figura 2.44** Esfuerzo de cedencia de diferentes materiales a diferentes condiciones <sup>(16)</sup>.



**Figura 2.45** Esfuerzo último a la tensión de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>(16)</sup>



**Figura 2.46** Porcentaje de elongación de diferentes materiales a diferentes condiciones. <sup>(16)</sup>

En la primera condición, el esfuerzo de cedencia y el esfuerzo ultimo de tensión, se mantuvieron por encima de los esfuerzos registrados en el metal base, además en el material TRIP se mostró un porcentaje de elongación razonable lo cual nos dice que el proceso de soldadura nos arroja en sus estudios preliminares resultados alentadores. <sup>[6]</sup>

## Segunda condición

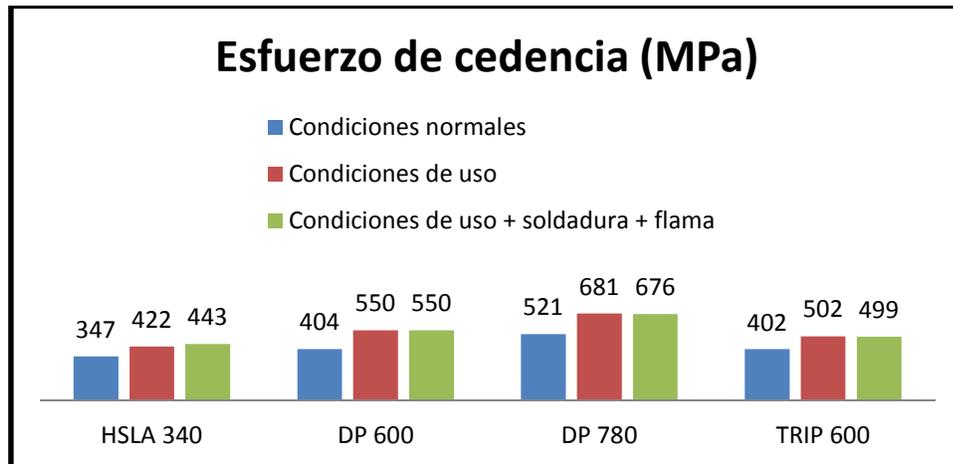


Figura 2.47 Esfuerzo de cedencia de diferentes materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

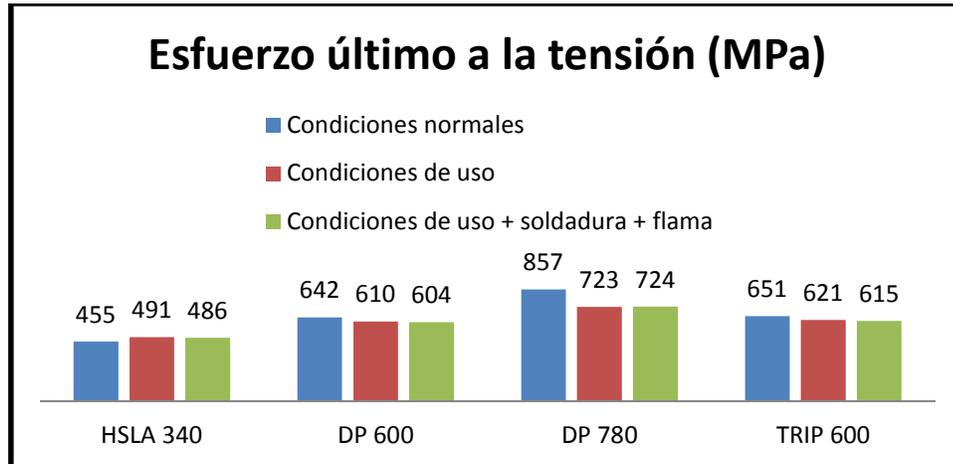


Figura 2.48 Esfuerzo último a la tensión de diferentes materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

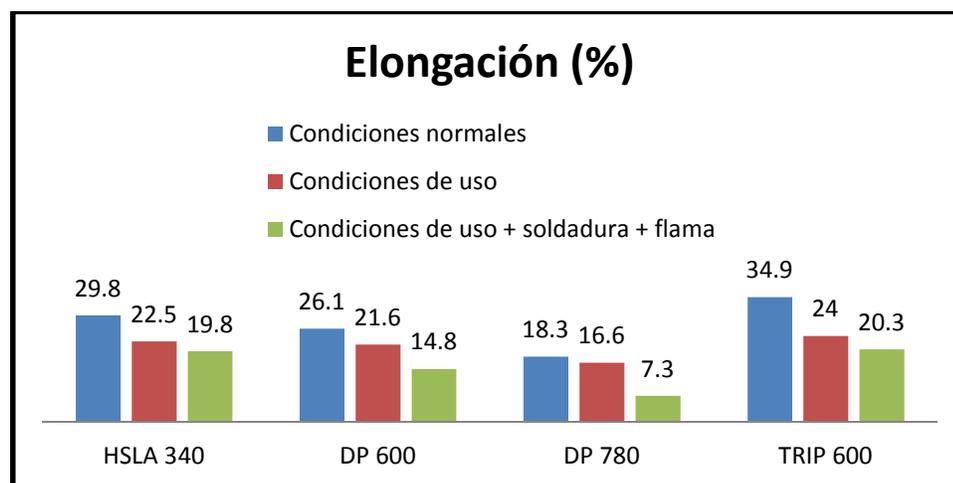


Figura 2.49 Porcentaje de elongación de diferentes materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

En la segunda condición, donde se utilizó una flama para enderezamiento de 650 °C por 90 segundos, se registraron esfuerzos últimos a la tensión menores, pero con un porcentaje mayor de elongación que los aceros que no fueron sometidos al calentamiento para enderezado. <sup>[16]</sup>

Los resultados de esta investigación que sugieren que no se recomienda enderezar con calor los aceros avanzados de alta resistencia AHSS, siendo la principal razón su disminución en el esfuerzo último a la tensión. <sup>[16]</sup>

Este estudio se hace referencia a la reparación de aceros avanzados después de uso, el cual la GM recomienda que estos aceros no se sometan a procesos de reparación por medio de calentamiento.

#### **2.4.1 Reparación típica en un proceso de ensamblaje.**

Un proceso de reparación en una línea de ensamblaje, es un proceso realizado manualmente, si bien con los mismos parámetros de producción con robot, los procesos de reparación manuales son menos precisos ya que estos dependen principalmente de la habilidad del soldador, los procesos de reparación se llevan a cabo, debido a los defectos que aparecen en producción por las casusas antes mencionadas, los cuales se detectan tiempo antes del proceso de reparación y cuando se llega a la estación del reparación del defecto de soldadura ya localizado, es desbastado manualmente con una pulidora y vuelto a soldar en ese mismo momento, la reparación en sí, es un proceso rápido y sencillo, el cual se lleva a cabo con regularidad para no eliminar piezas dentro de un proceso de producción.

Las herramientas utilizadas generalmente en un proceso de reparación con pulidores, turbinas con discos abrasivos y máquinas de soldar mediante proceso GMAW el cual es el mismo utilizado en la producción de estas piezas, en la figura 2.50 se muestran el equipo básico utilizado en una estación de reparación.

En un proceso de reparación de este tipo, los elementos sufren un recalentamiento, el cual puede afectar el rendimiento de las uniones de los elementos estructurales, es por ello preciso saber cuál es el comportamiento mecánico de estos elementos para mantener tanto la integridad estructural de la pieza como la calidad del producto.



**Figura 2.50** Equipo básico para reparación en el proceso de ensamblaje.

## **Capítulo 3.**

### **Discusión y análisis de bibliografía.**

Debido a la necesidad de ahorro de energía y al uso de materiales más resistentes para mantener una mayor seguridad y reducción de peso en elementos estructurales, se comienza el desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia, los cuales es posible utilizar con espesores de material más delgados, logrando que los motores necesiten menos potencia para lograr el mismo rendimiento sin sacrificar seguridad.

Este tipo de aceros avanzados, se han clasificado de acuerdo al tipo de microestructura, propiedades mecánicas y parámetros de formabilidad, con el fin de tener una amplia variedad de acuerdo a la necesidad estructural de los diferentes componentes del automóvil.

Para elementos estructurales en los vehículos como lo son; los chasis, es importante conocer las propiedades de la junta entre este tipo de aceros, la cual debe cumplir ciertas especificaciones de acuerdo a las necesidades y controles de calidad del fabricante, En un proceso de producción, la falta de mantenimiento ya sea en el formado de la pieza o en el proceso de soldadura, del elemento, y que no cumpla con las características que el cliente requiere, es necesario un proceso de reparación en línea.

Uno de las principales cuestiones de la falta de información acerca de este tipo de reparaciones, se debe a la incertidumbre de los efectos en la calidad del producto cuando se lleva a cabo una reparación.

Debido al espesor de lámina utilizada en elementos estructurales en la industria automotriz, el método más utilizado es el proceso GMAW, ya que es fácilmente adaptable a un proceso de producción en línea, no requiere de limpieza entre pasos, es posible soldar en diferentes posiciones y además de ser un método muy rápido y barato.

Este proceso ha tenido avances muy importantes consiguiendo la menor afectación térmica en el metal soldado, debido a que los aceros avanzados sufren efectos térmicos por sus diferentes fases, por tal motivo es importante realizar más estudios acerca de nuevos procesos utilizados en este tipo de materiales.

La doble fase consiste en una matriz de ferrita con una segunda fase de martensita dura en forma de islas, este tipo de materiales al ser soldados reportan una zona de ablandamiento en la zona afectada por el calor adyacente al metal de soldadura, en esta zona ocurren la mayoría de las fracturas en el material, este ablandamiento se reporta como un revenido de la martensita original en el material base bajando sus propiedades.

La microestructura de los aceros TRIP consiste en austenita retenida dentro de una matriz primaria de ferrita, con un volumen mínimo de 5% de esta austenita retenida, fases como lo son martensita y bainita se presentan en cantidades variables, al ser soldados estos materiales hay un endurecimiento en la zona afectada por el calor formándose una estructura de bainita y martensita.

Debido a que no existe información acerca del proceso de reparación en línea de producción, en la revisión bibliográfica se encontró que las propiedades mecánicas disminuyen conforme se recalienta la estructura de los metales AHSS esto se halló en un estudio realizado por el centro reparación de colisiones de la GM en conjunto con el instituto americano del hierro y el acero, donde el objetivo no es soldar doblemente en el mismo lugar, si no soldar y recalentar por medio de llama para enderezamiento y revisar las propiedades mecánicas, esto con el fin de simular la reparación de este tipo de materiales después de una colisión.

Unas de las formas para evitar llevar a cabo el proceso de reparación en línea, es precisamente el mantenimiento que se debe de llevar al proceso de producción, incluyendo el proceso de conformado y el mantenimiento de los elementos que conforman el equipo de soldadura (líneas de conducción de electrodo, boquillas, tobera, rodillos en el alimentador, electrodos, etc...) además de una buena programación y mantenimiento de los robots.

## **Capítulo 4.**

### **Caso de estudio.**

En el presente caso de estudio se realizó un comparativo entre la microestructura y las propiedades mecánicas (microdureza y esfuerzo de tensión al corte), antes y después del proceso de reparación, principalmente de los aceros de doble fase grado 600 (DP 600) y los aceros de plasticidad inducida por transformación grado 780 (TRIP 780), unidos mediante soldadura robótica aplicando el proceso GMAW y reparando mediante la remoción y reposición de la soldadura. El proceso de remoción fue realizado con discos abrasivos y pulidores, que es técnica convencional de realizar este proceso de reparación para eliminar los defectos superficiales de la soldadura. El proceso de reposición de la soldadura fue mediante el proceso GMAW manual, con los mismos parámetros utilizados que en la soldadura con robot, incluso la velocidad de avance promedio es igual a la del robot, justo como es realizado en un proceso de reparación convencional para la eliminación de defectos superficiales en la soldadura.

Se creó una matriz de pruebas con las que se trabajó como objetivo del caso de estudio para esta monografía.

## 4.1 Matriz de pruebas

**Tabla 4.1** Matriz de experimentación (describe el número de probetas y pruebas a realizar).

<b>Instrucción:</b> pruebas mecánicas(microdureza, tensión) y metalografía			
Probetas del material sin soldadura			
Material base	DP600	TRIP780	Probetas
	<b>X</b>	<b>X</b>	2
<b>Primera soldadura.</b>			
<b>Instrucción:</b> Pruebas mecánicas(microdureza, tensión) y metalografía			
Soldadura mediante robot			
Material	DP600	TRIP780	Probetas
DP600	<b>X</b>		3
TRIP780		<b>X</b>	3
<b>Re-trabajo</b>			
<b>Instrucción:</b> Pruebas mecánicas(microdureza, tensión) y metalografía			
Soldadura Manual			
Material	DP600	TRIP780	Probetas
DP600	<b>X</b>		3
TRIP780		<b>X</b>	3
<b>Segundo Re-trabajo</b>			
<b>Instrucción:</b> Pruebas mecánicas(microdureza, tensión) y metalografía			
Soldadura Manual			
Material	DP600	TRIP780	Probetas
DP600	<b>X</b>		3
TRIP780		<b>X</b>	3
	<b>Total de probetas</b>		<b>20</b>

Como se muestra en la tabla 4.1 las soldaduras con robot son mediante el proceso de soldadura GMAW con los parámetros estándares de producción, se le realizó pruebas de tensión a corte, microdureza y metalografías, todo esto para revisar y comparar los efectos de la reparación en las propiedades de la unión.

## 4.2 Material base utilizado.

Los materiales base utilizados fueron los aceros DP 600 y un acero TRIP 780.

### 4.2.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero DP600.

De la ficha técnica del proveedor del acero se revisó su composición química y propiedades mecánicas la cual nos da las siguientes características:

**Tabla 4.2** Comparación entre el análisis químico del fabricante y Comimsa del acero DP600.

Composición química fabricante (% e.p.)												
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%AL	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Nb	%Ti
0.078	1.018	0,039	0,006	0,141	0,047	0,011	0,422	0,019	0,001	0,0039	0,001	0,002
Composición química Comimsa (% e.p.)												
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%Nb	%Ti		
0.06	0.98	0.032	<0.002	0.12	0.008	0.41	<0.04	<0.03	<0.004	0.008		

**Tabla 4.3** Resultados de prueba de tensión del material base, acero DP600.

Pruebas mecánicas del material base ASTM E8 Acero DP600								
Espesor (mm)	Ancho (mm)	L-inicial	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	Carga fluencia (kgf)	Esfuerzo máximo tensión (MPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Alargamiento (%)
		L-final						
3	12.79	50.8	38.37	2520	1832	644	468	25
		63.52						

#### 4.2.2 Propiedades mecánicas y composición química del acero TRIP 780.

De la ficha técnica del proveedor del acero se revisó su composición química y propiedades mecánicas la cual nos da las siguientes características:

**Tabla 4.4** Comparación entre el análisis químico del fabricante y Comimsa del acero TRIP780.

<b>Composición química fabricante (% e.p.)</b>											
%C	%Mn	%P	%S	%Si							
0.1	2.05	0.1	0.01	2.17							
<b>Composición química Comimsa (% e.p.)</b>											
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%Nb	%Ti	
0.1	1.98	<0.002	<0.002	2.35	0.012	<0.06	<0.04	<0.03	<0.004	0.01	

**Tabla 4.5** Resultados de prueba de tensión del material base, acero TRIP 780.

<b>Pruebas mecánicas del material base ASTM E8 Acero TRIP 780</b>								
Espesor (mm)	Ancho (mm)	L-inicial	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	Carga fluencia (kgf)	Esfuerzo máximo tensión (MPa)	Esfuerzo fluencia (MPa)	Alargamiento (%)
		L-final						
2.79	12.51	50.8	34.9	3040	2320	854	652	20
		61.11						

### 4.3 Equipo utilizado.

El equipo de soldar utilizada fue una máquina con las características descritas en la tabla 4.6, esta máquina se utilizó tanto en la soldadura aplicada robóticamente, así como en el proceso de reparación realizado manualmente, todo esto bajo el proceso de GMAW con los parámetros mencionados en la tabla 4.7.

**Tabla 4.6** Características del equipo de soldadura.

<b>Ficha técnica del equipo utilizado</b>	
Características técnicas	GLC 553 MC3
Tensión de red	3x 400V/ 47A / 32,5 kVA
Tensión en vacío	70 Voltios
Margen de soldadura	40A/12V - 550A/44,5 V
Potencia al 60% conex. (10 min)	550 A a 41,5 V
Potencia al 100% conex.	500 A a 39 V
Velocidad de transporte del alambre	0 .. 30 m/min
Tipo de protección	IP23
Tipo de refrigeración	F
Clase de aislamiento	F
Dimensiones de la fuente	1190x530x930
Dimensiones del accionamiento	610x380x355
Peso de la fuente	220 kg
Peso del accionamiento del alambre	22 kg

El robot utilizado en el proceso de soldadura es mostrado en la imagen de la figura 4.1.



**Figura 4.1** Fotografía del tipo y modelo del robot utilizado.

## 4.4 Parámetros utilizados

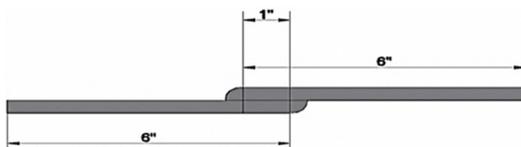
Los parámetros utilizados en las uniones de las placas, son parámetros que se utilizan comúnmente para materiales HSLA de espesores similares en proceso de producción con las siguientes características:

**Tabla 4.7** Parámetros utilizados para la soldadura de los cupones.

Parámetros de soldadura mediante proceso GMAW									
Pases de soldadura	Metal de aporte		Corriente		Vel. de alimentación del alambre (m/min)	Voltaje (V)	Vel. avance In/min	Combinación de gas	flujo de gas
	Clase AWS	Ø In	Tipo y Polaridad	Amp.					
1	ER70S-3	0.052	Inversa E.P.	235-255	8	23.6	40	80% Ar-20%CO2	55CFH

## 4.5 Uniones y probetas.

Las uniones utilizadas fueron placas a traslape con soldadura de filete por ambos lados, cada placa mide 12 pulgadas en dirección paralela al cordón de soldadura y 6 pulgadas en dirección perpendicular como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3 , el tipo de unión de traslape de las probetas fue seleccionado en base al diseño y al flujo de esfuerzos asociados en los componentes, así como el resultado de las necesidades de proporción de los componentes unidos, como son refuerzos, largueros externos e internos, brackets, etc.



**Figura 4.2** Dimensiones de placa y traslape.



**Figura 4.3** Ilustración representativa de la vista superior de la placa.

#### 4.5.1 Probetas de tensión en aceros DP 600 y TRIP 780.

De los cupones de soldadura se hicieron tres pruebas de tensión, las probetas se extrajeron en tiras de aproximadamente 0.75”.

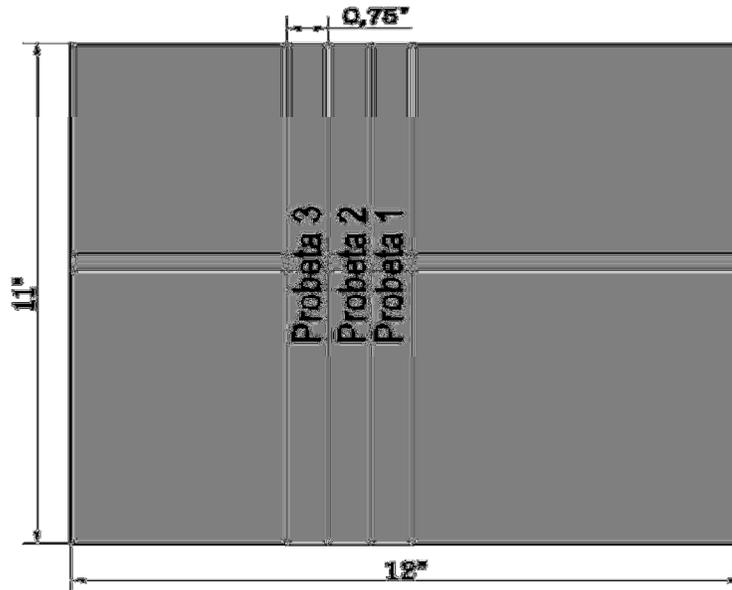


Figura 4.4 Muestras de donde se extrajeron las probetas de tensión.

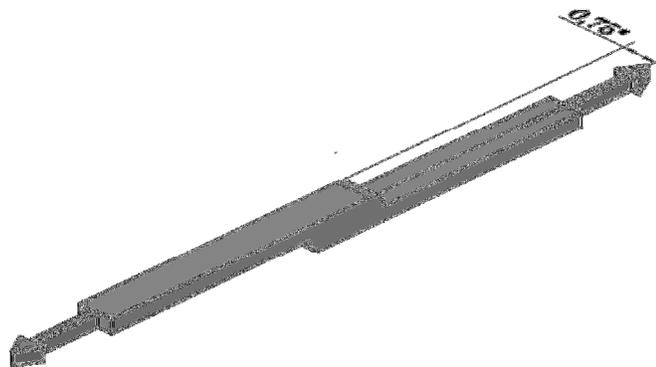


Figura 4.5 Forma en que se realizó el ensayo de tensión.

## 4.6 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 Primera soldadura.

En las pruebas realizadas, se comparó el esfuerzo último a la tensión (UTS) de las probetas soldadas por primera vez contra el último esfuerzo de tensión del metal base, así definiendo un porcentaje de eficiencia de la unión soldada, donde el 100% es la misma resistencia del metal base y de la unión soldada.

**Tabla 4.8** tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje primera soldadura.

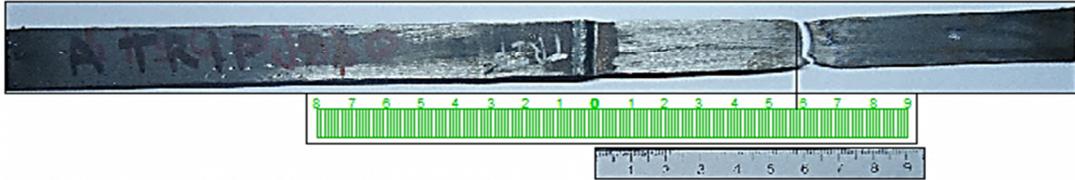
	Id	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo máximo tensión (MPa)	Eficiencia (%)
Probeta 1	TRIP 780	2.79	15.4	42.97	4130	943	110
	DP 600	3	16.2	48.60	3000	605	94
Probeta 2	TRIP 780	2.79	17.1	47.71	4360	896	105
	DP 600	3	18.1	54.30	3360	607	94
Probeta 3	TRIP 780	2.79	18.9	52.73	4570	850	100
	DP 600	3	17.7	53.10	3290	608	94

En los resultados obtenidos se pueden observar, como la eficiencia de la junta en los aceros TRIP 780 es igual o mayor al 100% con respecto a la resistencia del metal base (780 MPa), esto nos indica que se obtienen buenas propiedades en la unión después de la primera soldadura. En los aceros DP600 se obtuvieron eficiencias de la junta de un 94% con respecto al metal base, sin embargo, la resistencia en la junta en todos los caso resulto mayor que el esfuerzo ultimo a la tensión de la especificación del metal base (600 MPa).

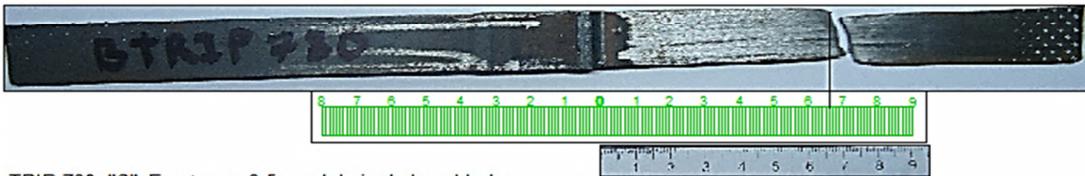
La zona de fractura para el caso de los aceros TRIP, ocurrió en el metal base lejos de la soldadura y de la zona afectada por el calor como se muestra en la figura 4.6, mientras que en los aceros DP ocurrió cerca de la zona afectada por el calor de 2 a 2.5 mm de distancia del pie de la soldadura como se muestra en la figura 4.9.

## TRIP 780 Primera soldadura

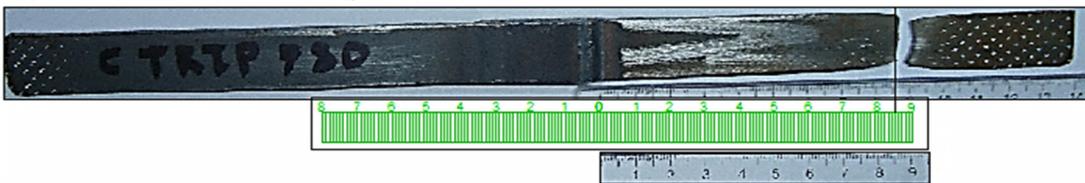
TRIP 780 "A" Fractura a 5.8 cm del pie de la soldadura.



TRIP 780 "B" Fractura a 6.6 cm del pie de la soldadura.



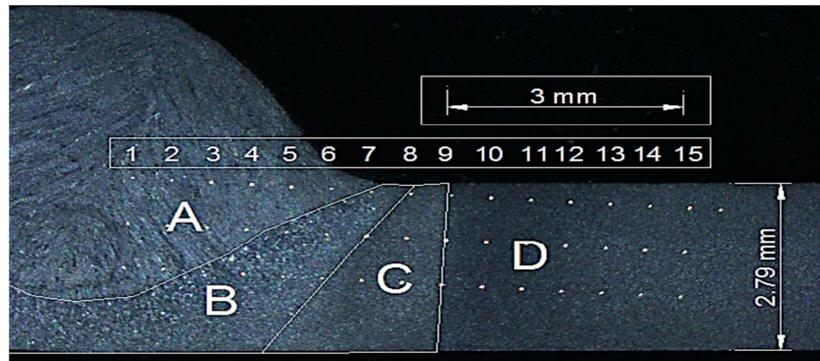
TRIP 780 "C" Fractura a 8.5 cm del pie de la soldadura.



**Figura 4.6** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 primera soldadura.

En el análisis del microdureza del metal base se obtuvo un promedio de 254 Números de Dureza Vickers (NDV), mientras que en la zona de unión (metal de aporte, ZAC y la zona adyacente a la ZAC) se obtuvo una promedio de microdureza de 289 NDV, esto es por lo cual la fractura se localizó lejos de la zona de unión en el metal base.

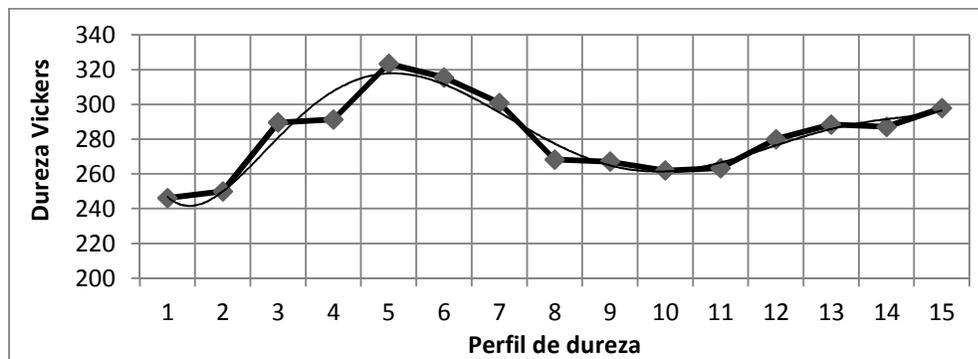
La medición de microdurezas fue dividida en zonas (ver fig. 4.7), para obtener una mejor idea del comportamiento del metal con respecto a la distancia con la zona de fusión. En la zona "A" se obtuvo una microdureza promedio de 252 NDV, que es la zona de fusión, la zona "B" que es la zona afectada por el calor adyacente a la zona de fusión, se obtuvieron microdurezas con un promedio de 355 NDV, en la zona "C" que es la zona del metal base adyacente a la ZAC se obtuvo un promedio de 268 NDV y la zona "D" más alejada de la ZAC, obtuvo un promedio 280 NDV.



**Figura 4.7** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780.

**Tabla 4.9** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas TRIP 780.

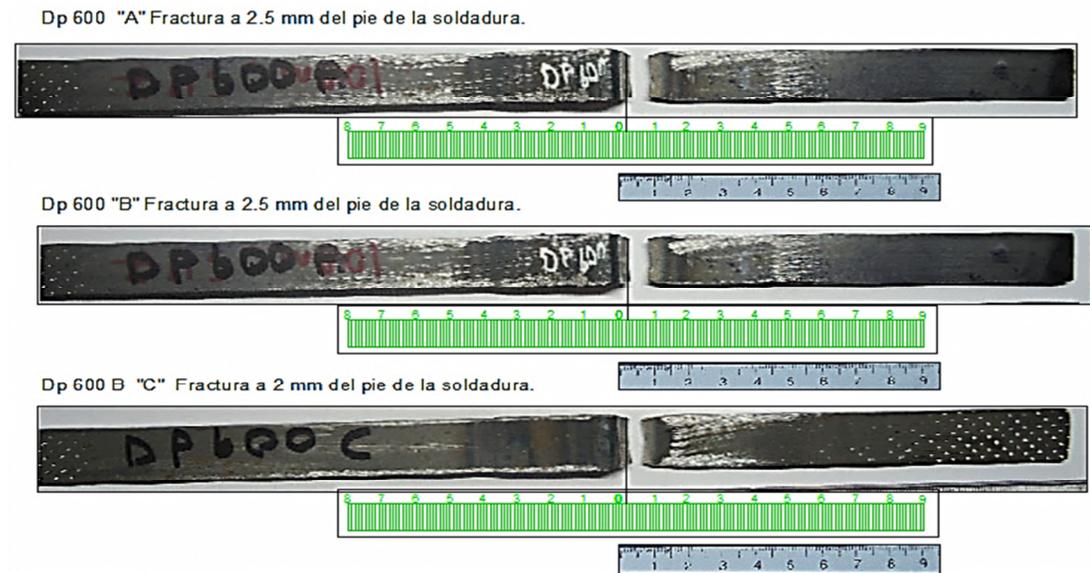
Zona de unión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	252	
B	355	
C	268	
D	280	
Promedio (Zu)	<b>289</b>	
Metal Base	<b>254</b>	X



**Figura 4.8** Grafica de microdureza promedio TRIP 780.

Como se puede observar en la tabla de microdurezas, el promedio en las zonas "A", "C" y "D" tienen valores con diferencias de no más de 30 Vickers; sin embargo la zona "B" contiene microdurezas con diferencias de 70 a 100 Vickers con respecto a las zonas "A", "C" Y "D". Es importante señalar que en el caso de los aceros TRIP 780 soldados por primera vez, las fracturas ocurrieron fuera de la zona de unión.

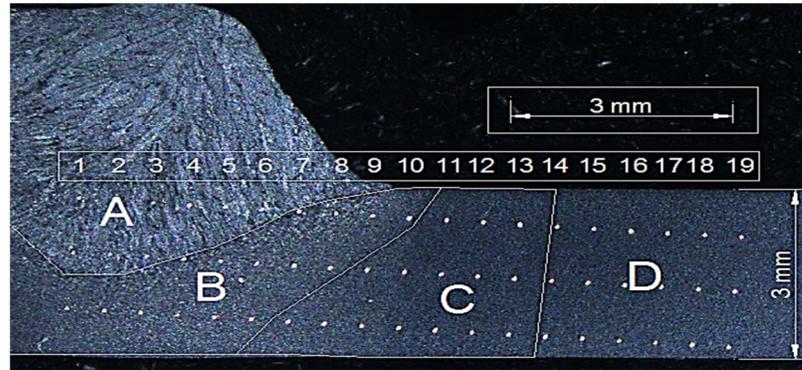
## DP600 Primera soldadura



**Figura 4.9** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 primera soldadura.

En el análisis de microdureza el metal base tiene un promedio de 205 Números de Dureza Vickers (NDV) mientras que en la zona de unión (metal de aporte, zona afectada por el calor y zona adyacente a la zona afectada por el calor), se obtuvo un promedio de 195 NDV, lo cual nos sugiere que la disminución de la microdureza en esta área es una de las posibles causas por la cual la falla ocurre en la zona de unión.

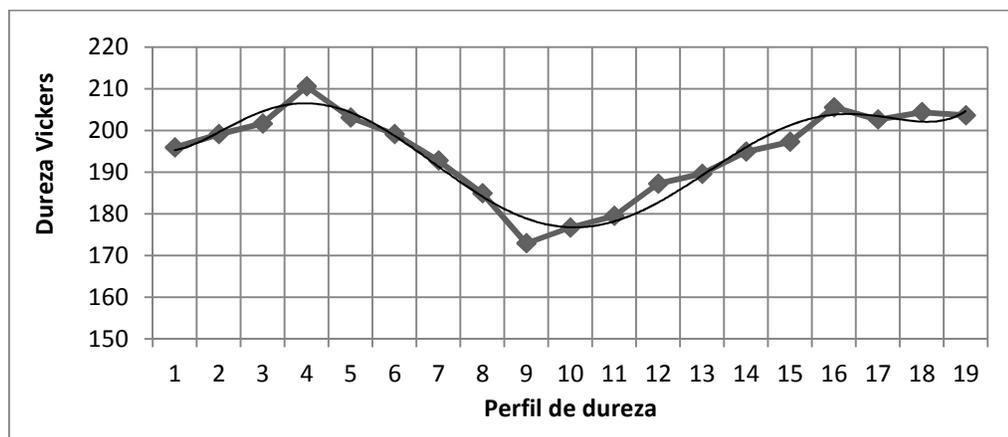
En la división de durezas por zonas en el acero DP 600, la zona "A" tuvo un promedio de microdurezas de 193 NDV lo cual, es una dureza muy por debajo de la dureza de la misma zona en los aceros TRIP 780, eso nos da una idea que la mezcla metalúrgica entre el metal de aporte ER70S-3 y el metal base soldado nos dan microdurezas completamente diferentes, la zona "B" mostro un promedio de 200 NDV, la zona "C" nos da un promedio de 183 NDV siendo esta la zona la más crítica y donde ocurre la falla, en la zona "D" la microdureza promedio es de 203 NDV donde se puede ver que la dureza aumenta considerablemente.



**Figura 4.10** Diferentes zonas de microdureza en aceros DP 600.

**Tabla 4.10** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas DP600.

Zona de unión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	193	
B	200	
C	183	X
D	203	
Promedio (ZU)	<b>195</b>	
Metal Base	<b>205</b>	



**Figura 4.11** Gráfica de microdureza promedio DP600.

En la gráfica de dureza promedio se puede observar en el centro, una zona de menor dureza, esta zona es conocida como la zona de ablandamiento.

#### 4.7 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 Primera reparación, segunda soldadura.

Después de realizar la aplicación de soldadura a los cupones (por primera vez) se les retiro la soldadura por medios mecánicos (Pulidor y discos abrasivos), y se soldó manualmente con los mismos parámetros, se realizaron las mismas pruebas efectuadas a la primera soldadura, de igual manera se tomó la eficiencia de la junta siendo 100% la resistencia del metal base.

En los aceros TRIP 780 de las tres probetas dos obtuvieron una eficiencia de un 99% mientras que una de ellas de un 93% los cual da una eficiencia promedio de un 97% la cual es muy aceptable considerando los esfuerzos últimos a la tensión de todas ellas, las cuales están por encima del esfuerzo ultimo a la tensión de la especificación del material base (780 MPa). Mientras que los aceros DP600 obtuvieron eficiencia de 75% y 77% estando muy por debajo de los esfuerzos últimos a la tensión mínimos requeridos para este tipo de acero.

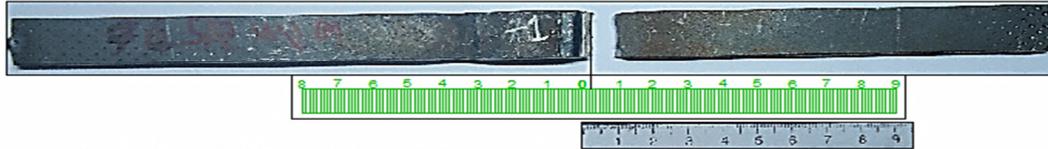
**Tabla 4.11** Tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje segunda soldadura.

	Id	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo máximo tensión (MPa)	Eficiencia (%)
Probeta 1	TRIP 780 1 REP.	2.79	17.5	48.83	4200	844	99
	DP 600 1 REP.	3	17.1	51.30	2520	482	75
Probeta 2	TRIP 780 1 REP.	2.79	18	50.22	4080	797	93
	DP 600 1 REP.	3	17.9	53.70	2640	482	75
Probeta 3	TRIP 780 1 REP.	2.79	18	50.22	4310	842	99
	DP 600 1 REP.	3	18.2	54.60	2770	498	77

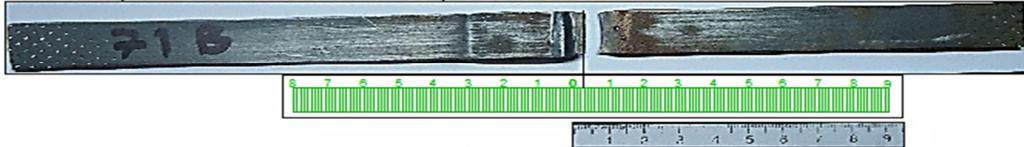
A diferencia de la primera soldadura, la zona de fractura en los aceros TRIP 780 ya no fue en el metal base, en este caso se localizó en la zona de unión, cerca de la zona afectada por el calor de 2.5 a 3.5 mm de distancia del pie de la soldadura como se muestra en la figura 4.12, mientras que en los aceros DP la zona de fractura se localizó en el pie de la soldadura como se puede observar en la figura 4.15.

### TRIP 780-1 Primer reparación (segunda soldadura).

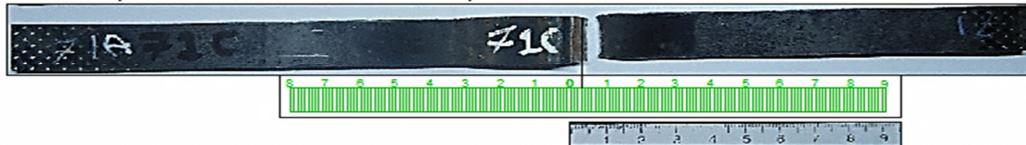
TRIP 780 Rep-1 "A" Fractura a 2.5 mm del pie de la soldadura.



TRIP 780 Rep-1 "B" Fractura a 3 mm del pie de la soldadura.



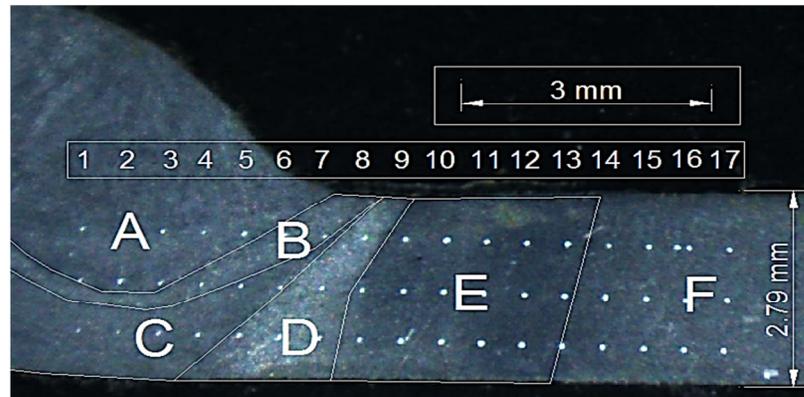
TRIP 780 Rep-1 "C" Fractura a 3.5 mm del pie de la soldadura.



**Figura 4.12** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 segunda soldadura.

En la medición de la microdureza del metal base, se obtuvo un promedio de 254 Números de Dureza Vickers (NDV) mientras que en la zona de unión (metal de aporte, zona afectada por el calor y zona adyacente a la zona afectada por el calor) fue de 277 NDV como se muestra en la tabla 4.12, a diferencia de la primera soldadura donde se obtuvo una promedio de microdureza de 289 NDV como se puede observar en la tabla 4.9.

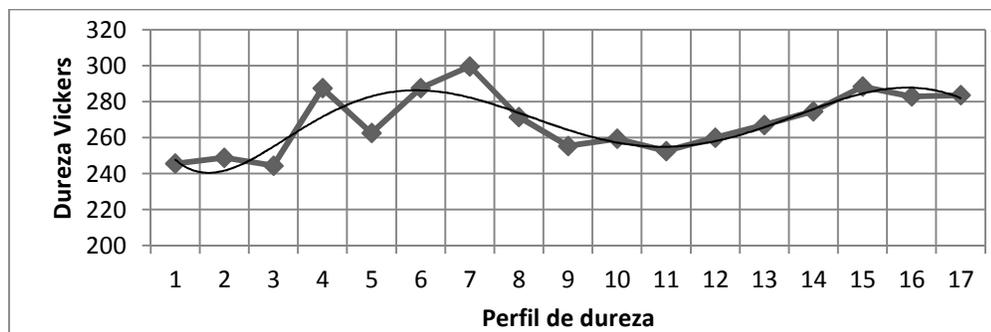
En el análisis por zonas, se obtuvo lo siguiente: En la zona "A" un promedio de 231 NDV que es la zona de la soldadura y donde se obtuvo menores durezas que la primera soldadura en la zona equivalente a esta, donde el promedio fue de 252 NDV. En la zona "B" que es la zona adyacente al metal de soldadura se obtuvieron de igual manera microdurezas con un promedio de 335 NDV, la zona "C" que es la zona antes adyacente al metal de soldadura ahora recalentada por segunda vez se obtuvo un promedio de 278 NDV, en la zona "D", una zona adyacente a la zona afectada por el calor aumenta en su promedio de 282 NDV, enseguida de ello aparece la zona "E" que es una zona de ablandamiento, donde la microdureza promedio baja hasta los 257 NDV y enseguida de ello sube en la zona "F" donde el promedio llega a los 281 NDV.



**Figura 4.13** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780 segunda soldadura.

**Tabla 4.12** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas TRIP 780 segunda soldadura.

Zona de unión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	231	
B	335	
C	278	
D	282	
E	257	X
F	281	
Promedio (Zu)	<b>277</b>	
Metal Base	<b>254</b>	

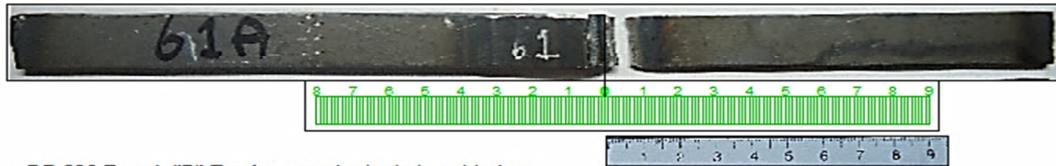


**Figura 4.14** Gráfica de microdureza promedio TRIP 780 segunda soldadura.

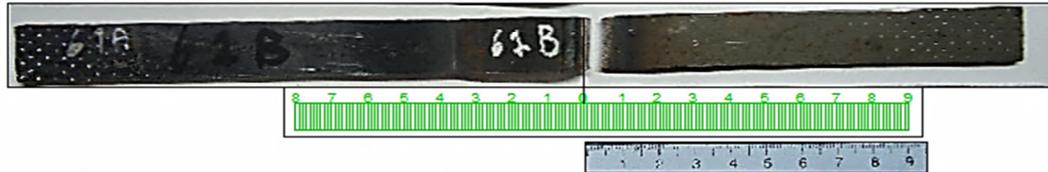
Como se puede observar en la tabla de dureza promedio de la figura 4.14, existe una zona blanda en medio al centro de la gráfica, En esta zona de menor microdureza es donde se presenta la fractura en los ensayos de esfuerzo de tensión al corte, mostrando una zona de fractura consistente.

### DP 600-1 Primer reparación (segunda soldadura).

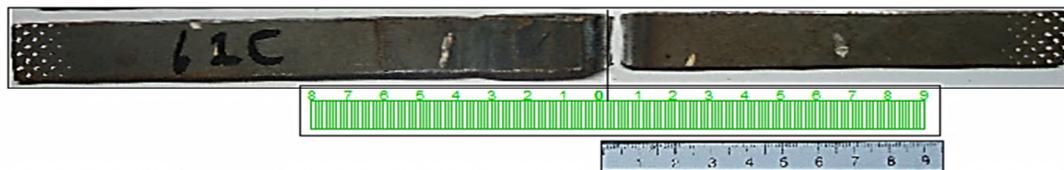
DP 600 Rep-1 "A" Fractura en el pie de la soldadura.



DP 600 Rep-1 "B" Fractura en el pie de la soldadura.



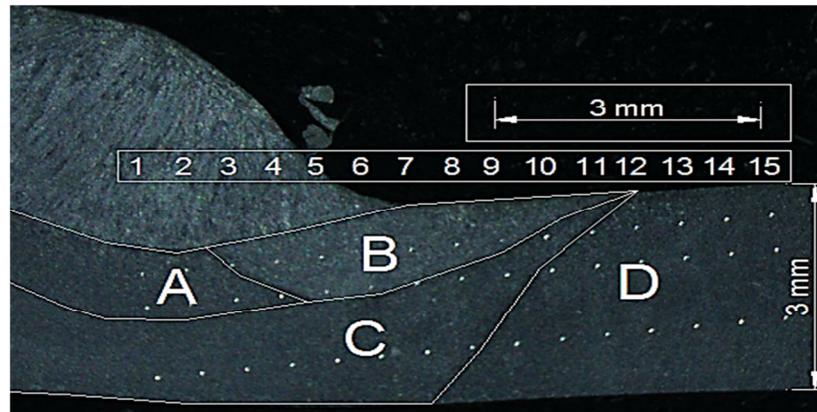
DP 600 B Rep-1 "C" Fractura en el pie de la soldadura.



**Figura 4.15** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 segunda soldadura.

En la medición la microdureza el metal base tiene un promedio de 205 Números de Dureza Vickers (NDV) mientras que en la zona de unión (metal de aporte, zona afectada por el calor y zona adyacente a la zona afectada por el calor) se obtuvo un promedio de microdurezas de 174 NDV (ver tabla 4.13) en comparación de los 195 NDV (ver tabla 4.10) que resultaron en la primera soldadura, esta diferencia en NVD podría ser una de las posibles causas por la cual la falla ocurre en la zona de unión.

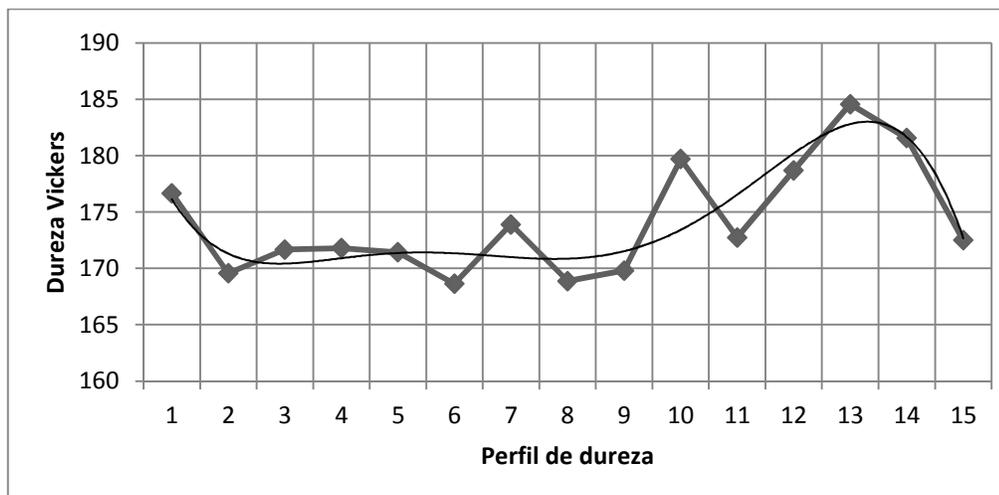
En las microdurezas por zonas en el acero DP 600 con una reparación, doble soldadura, se obtuvieron en la zona "A" un promedio de 172 NDV, que es la zona que se encuentra por debajo de la zona de fusión, en la zona "B" con una microdureza de 176 NDV esta zona contiene metal fundido, la zona "C" tiene un promedio de microdureza de 170 NDV y la zona "D" que es la zona más alejada de la zona de fusión tiene un promedio de 176 NDV, como se puede observar además de la zona "A" que se encuentra por debajo de la zona de fusión y es donde se encuentra el espesor más grande, la zona "B" y "C" tienen los promedios de microdureza más bajos es por ello una posible fractura en estas zonas.



**Figura 4.16** Diferentes zonas de microdureza en aceros DP 600 segunda soldadura.

**Tabla 4.13** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas DP600 segunda soldadura.

Zona de unión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	172	
B	176	X
C	170	X
D	176	
Promedio (Zu)	<b>173</b>	
MB	<b>205</b>	



**Figura 4.17** Gráfica de microdureza promedio DP600 segunda soldadura.

#### 4.8 Resultados de las pruebas mecánicas en aceros TRIP 780 y DP 600 Segunda reparación, Tercera soldadura.

Después de realizar la primera reparación, lo cupones fueron sometidos a una segunda remoción y reposición de soldadura, se hicieron las mismas pruebas mecánicas, además de la medición de la eficiencia de la junta, tomando como referencia la resistencia del metal base.

En los aceros TRIP 780 de las tres probetas se obtuvieron eficiencias de un 95%, 87% y 94% respectivamente, teniendo así una eficiencia promedio de un 92%, la cual es aceptable, si considerando que el esfuerzo último a la tensión de dos de ellas están por encima del esfuerzo último a la tensión de la especificación del material base (780 MPa). Mientras que los aceros DP600 se obtuvieron eficiencia de 79% y 81% estando muy por debajo del esfuerzo último a la tensión mínimos requeridos para este tipo de acero (600 MPa), sin embargo se obtuvieron mejores resultados que en la primera reparación.

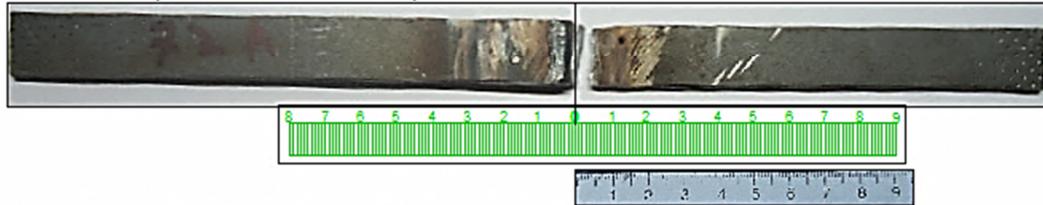
**Tabla 4.14** Tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje tercera soldadura.

	Id	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo máximo tensión (MPa)	Eficiencia (%)
Probeta 1	TRIP 780 2 REP.	2.79	18	50.22	4140	808	95
	DP 600 2 REP.	3	17.1	51.30	2680	512	80
Probeta 2	TRIP 780 2 REP.	2.79	18	50.22	3790	740	87
	DP 600 2 REP.	3	17.1	51.30	2730	522	81
Probeta 3	TRIP 780 2 REP.	2.79	17.8	49.66	4060	802	94
	DP 600 2 REP.	3	16.9	50.70	2630	509	79

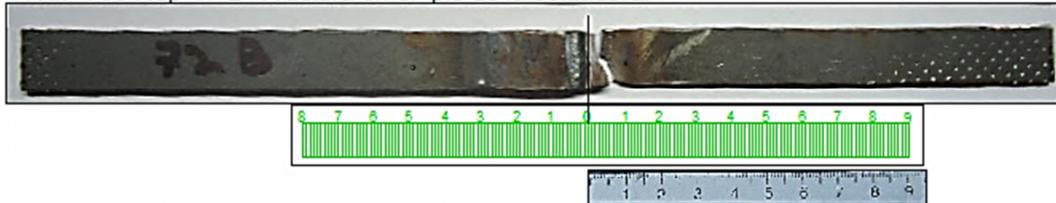
A diferencia de la segunda soldadura, la zona de fractura en los aceros TRIP 780 ya no fue en el metal base, en este caso se localizó en el pie de la soldadura, mientras que en los aceros DP la zona de fractura se localizó al igual que en la segunda soldadura en el pie de la soldadura como se muestran en las figuras 4.18 y 4.21 respectivamente.

### TRIP 780-2 Segunda reparación (tercera soldadura).

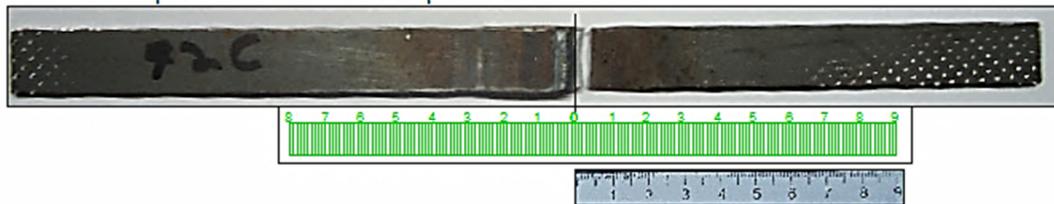
TRIP 780 Rep-1 "A" Fractura en el pie de la soldadura.



TRIP 780 Rep-1 "B" Fractura en el pie de la soldadura.



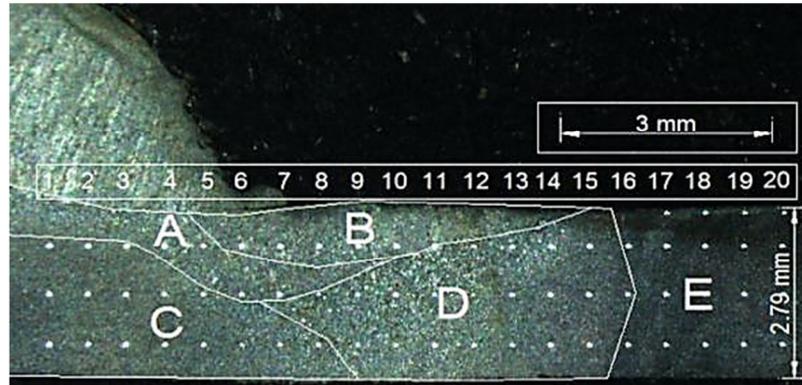
TRIP 780 Rep-1 "C" Fractura en el pie de la soldadura.



**Figura 4.18** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 tercera soldadura.

En el análisis del microdureza del metal base en aceros TRIP se obtuvo un promedio de 254 Números de Dureza Vickers (NDV), mientras que en la zona de unión (metal de aporte, zona afectada por el calor y zona adyacente a la zona afectada por el calor) fue de 212 NDV (ver tabla 4.15) muy por debajo de la primera y segunda soldadura que fueron 289 NDV y 277 NDV respectivamente.

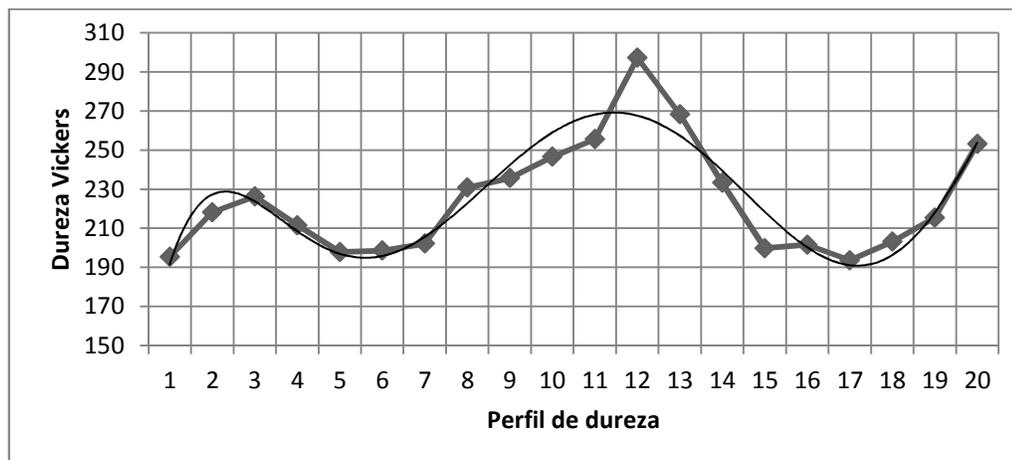
En la dureza por zonas, la zona "A" registró una dureza promedio de 195 NVD, en la zona "B" se registró una dureza promedio de 181 NVD, siendo estas dos las zonas más críticas debido a su baja dureza, en la zona "C" el registro de dureza promedio fue de 216 NDV, la zona "D" fue la zona más dura con un promedio de microdurezas de 261 NVD, y la zona "E" que es la zona más alejada con un promedio de microdurezas de 209 NVD.



**Figura 4.19** Gráfica de microdureza promedio TRIP 780 tercera soldadura.

**Tabla 4.15** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas TRIP 780 tercera soldadura.

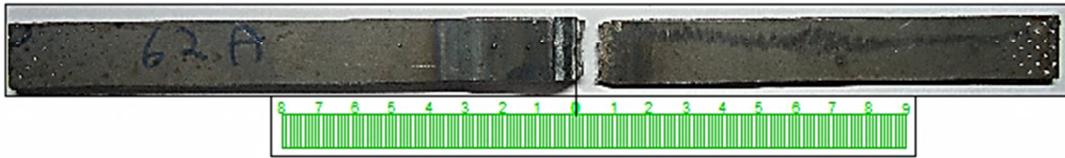
Zona de unión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	195	X
B	181	X
C	216	
D	261	
E	209	
Promedio (Zu)	<b>212</b>	
MB	<b>254</b>	



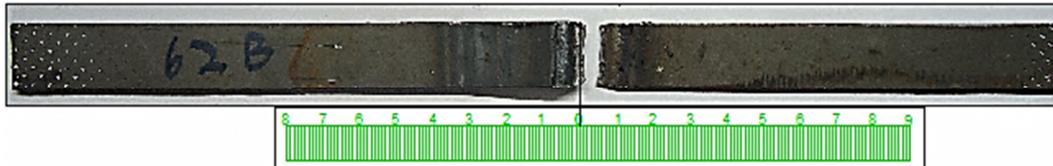
**Figura 4.20** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780 tercera soldadura.

### DP 600-2 Segunda reparación (tercera soldadura).

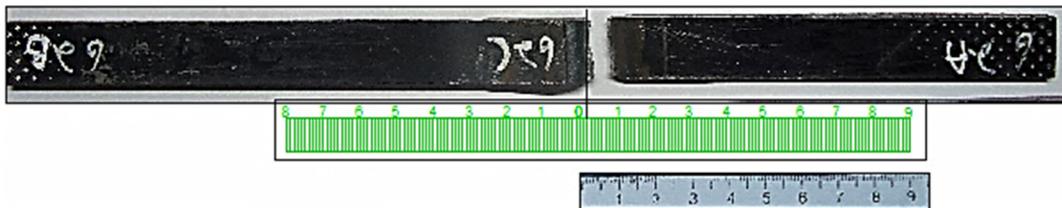
Dp 600 Rep-2 "A" Fractura en el pie de la soldadura.



Dp 600 Rep-2 "B" Fractura en el pie de la soldadura.



Dp 600 B Rep-2 "C" Fractura en el pie de la soldadura.



**Figura 4.21** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 tercera soldadura.

En la medición de la microdureza el metal base tiene un promedio de 205 Números de Dureza Vickers (NDV) mientras que en la zona de unión (metal de aporte, zona afectada por el calor y zona adyacente a la zona afectada por el calor) se obtuvo una promedio de microdureza de 210 NDV resultado con una mayor dureza promedio que en la primera y segunda reparación (ver tablas 4.10 y 4.13) más sin embargo en los resultados de tensión los resultados fueron inferiores que en la primera aplicación de soldadura pero más que en la segunda aplicación de soldadura.

En cuanto a la dureza por zonas se encontró que en la zona "A", se obtuvo un promedio de 219 NDV, la zona "B"; que es la zona adyacente al metal de soldadura, se encontró una dureza promedio de 220 NDV y en la zona "C" que se encontró una dureza promedio de 190 NDV, que es la zona más blanda y donde se encuentra la zona de fractura.

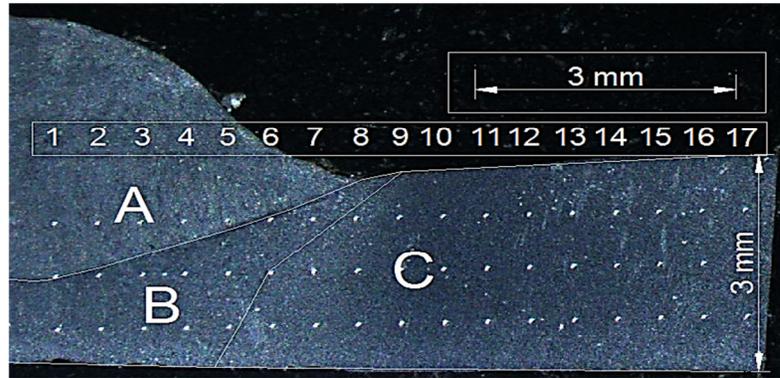


Figura 4.22 Grafica de microdureza promedio DP600 segunda soldadura.

Tabla 4.16 Tabla de microdurezas de las diferentes zonas DP600 tercera soldadura

Zona de fusión (Zu)	Microdureza Promedio en Números de Dureza Vickers (NDV)	Zona de Fractura
A	219	
B	220	
C	190	X
Promedio (Zu)	210	
MB	205	

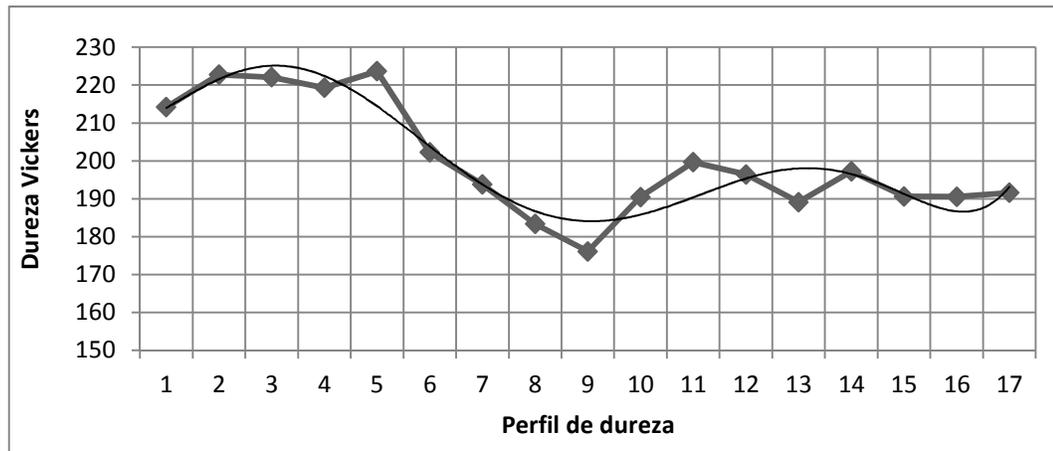


Figura 4.23 Diferentes zonas de microdureza en aceros DP 600 tercera soldadura.

## 4.9 Eficiencia de la unión en aceros avanzados de alta resistencia DP600 y TRIP 780.

La eficiencia de la unión se realizó aplicando la siguiente formula, la cual fue ha sido empleada en otras investigaciones como la de Zhili Feng [6] del Laboratorio Nacional de Oak Ridge:

$$\text{Eficiencia \%} = \frac{\text{Último esfuerzo a la tensión (probeta)}}{\text{Último esfuerzo a la tensión (metal base)}} \times 100 \text{ [6]}$$

### 4.9.1 Eficiencia en aceros TRIP 780.

Como se puede observar a continuación en la Figura 4.24, y conforme se llevaron a cabo las reparaciones, la eficiencia de la junta va disminuyendo, sin embargo gracias a que la resistencia del metal base está por encima de su especificación por aproximadamente 70 MPa., los valores de resistencia a la tensión son mayores al especificado por el metal base (780 MPa).

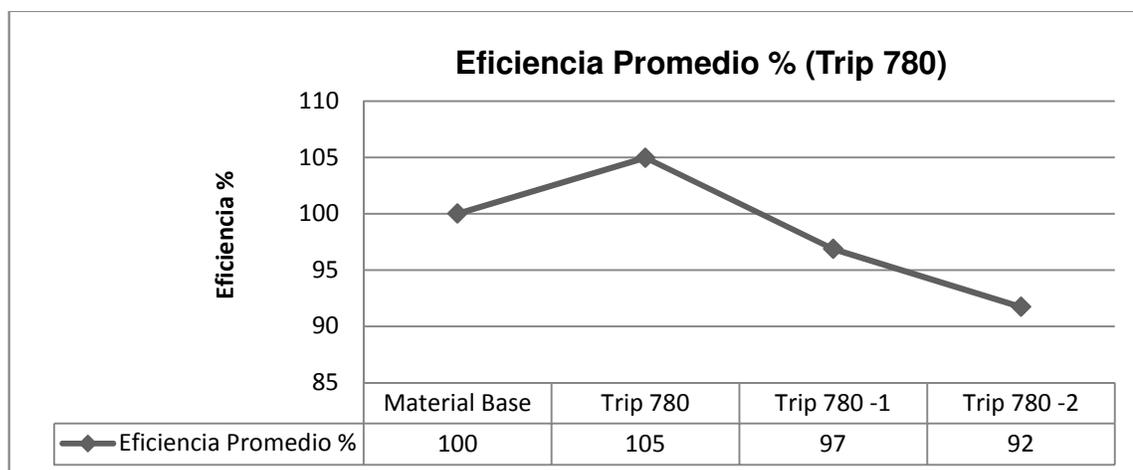
#### Nomenclatura de la gráfica.

Material base: 100%.

TRIP 780: Eficiencia promedio de la unión soldado una vez.

TRIP 780-1: Eficiencia promedio de la unión con una reparación.

TRIP 780-2: Eficiencia promedio de la unión con dos reparaciones.



**Figura 4.24** Eficiencia de la unión en aceros TRIP 780.

#### 4.9.2 Eficiencia en aceros DP600.

La medición de la eficiencia de la unión en los aceros DP 600 muestra una disminución considerable desde la primera vez que se suelda, esto debido a los cambios microestructurales ocurridos por la entrada de calor del proceso utilizado en estos aceros, la eficiencia en su primer soldadura a pesar de que es menor que la resistencia del metal base es mayor que la especificación del material, sin embargo al reparar (remover y reponer soldadura) la eficiencia de la unión disminuye considerablemente.

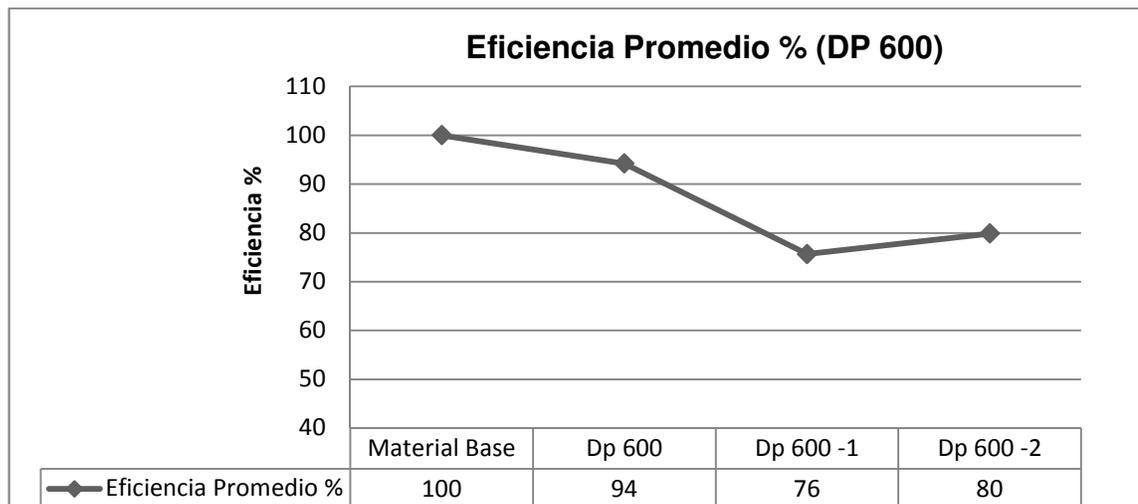
#### Nomenclatura de la gráfica.

Material base: Esfuerzo ultimo a la tensión del metal base.

DP 600: Esfuerzo último a la tensión del metal base soldado una vez.

DP 600 -1: Esfuerzo último a la tensión del metal base con una reparación.

DP 600 -2: Esfuerzo último a la tensión del metal base con dos reparaciones.

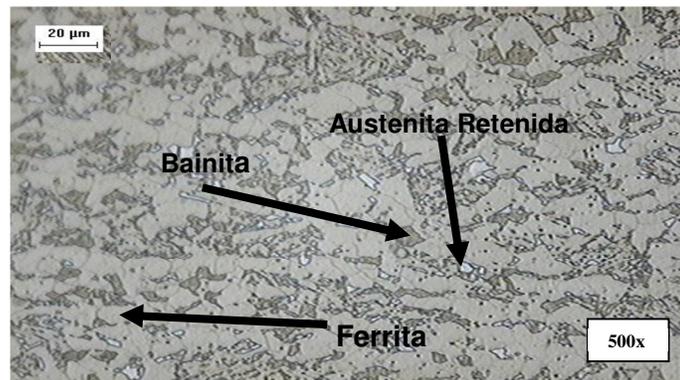


**Figura 4.25** Eficiencia de la unión en aceros TRIP 780.

## 4.10 Microestructura en la reparación de aceros avanzados de alta resistencia AHSS aceros TRIP 780 y DP 600.

### 4.10.1 Microestructura TRIP 780.

La microestructura como se indica en estos tipos de aceros, es una estructura la cual cuenta con diferentes fases, la estructura principal de los aceros TRIP consiste en una fase ferrítica, con cantidades variables de bainita y austenita retenida como se muestra en la figura 4.26.



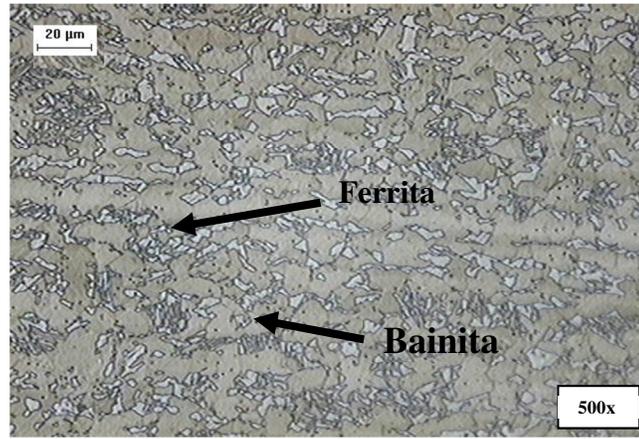
**Figura 4.26** Metal base acero TRIP 780 a 500x.

Al ser calentada la estructura en los aceros TRIP debido a la aplicación de soldadura, la zona afectada por el calor adyacente al metal base, debido a la rápida velocidad de enfriamiento y a la composición química de estos materiales, se forman una estructura bainítica la cual presenta mayores durezas en comparación con el resto de las zonas, esto se puede observar en la figura 4.27.



**Figura 4.27** Zona afectada por el calor adyacente a la zona de fusión TRIP 780 a 500x.

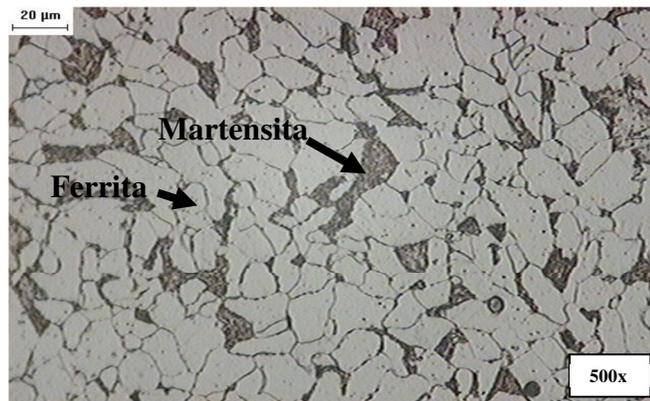
La zona más blanda en este tipo de aceros, es la zona afectada por el calor adyacente al metal base, donde se observa un crecimiento de la fase ferrítica, además de bainita como se muestra en la figura 4.28



**Figura 4.28** Zona afectada por el calor adyacente al metal base TRIP 780 a 500x.

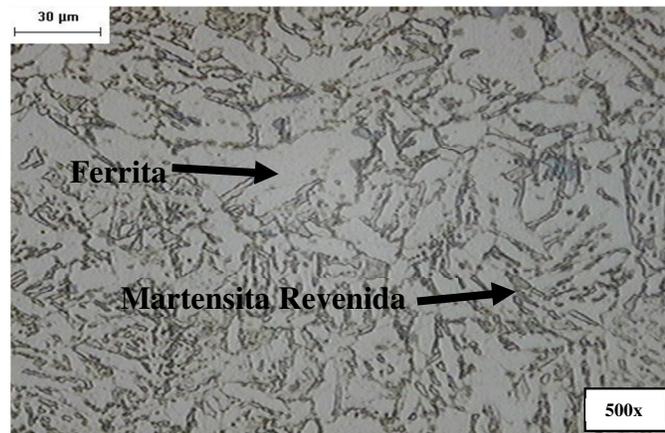
#### 4.10.2 Microestructura DP 600.

La estructura principal de los aceros de doble fase tienen una matriz ferrítica con pequeñas islas de martensita; la cantidad de islas de martensita aumentan conforme aumenta el grado del acero, el acero utilizado en esta investigación es un acero DP 600 y la microestructura se muestra a continuación en la figura 4.29.



**Figura 4.29** Metal base acero DP 600 a 500x.

La microestructura en la zonas afectadas por el calor adyacente al metal base, es principalmente de ferrita con martensita revenida, la martensita revenida es aquella que debido al calentamiento por la aplicación de la soldadura sufre una descomposición, la cual causa un efecto de ablandamiento en este tipo del material, dando una eficiencia menor a la necesaria, como se muestra en el punto 2.2.5.1.3 de esta monografía, y se puede observar en la siguiente figura 4.30.



**Figura 4.30** Zona Afectada por el calor adyacente al metal base DP600 a 500x.

# Capítulo 5

## Conclusiones

De acuerdo a los resultados observados en el caso de estudio, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

### **5.1 Reparación de aceros TRIP.**

a) Primera soldadura en aceros TRIP. Los aceros TRIP al ser soldados mediante el proceso GMAW obtuvieron resultados favorables, teniendo resistencias iguales o mayores que el metal base original (780 MPa), estos resultados son alentadores debido a que se tiene la certeza de que una unión de este tipo, con los parámetros que se utilizan comúnmente en la industria automotriz para aceros de alta resistencia HSLA tiene buenas propiedades mecánicas. En cuanto a su microestructura se puede observar que en la zona afectada por el calor existe un endurecimiento debido a la formación de diferentes fases como los son la bainita y la martensita, es necesario debido a este endurecimiento, realizar otros estudios para revisar el rendimiento de estas estructuras de acuerdo a la aplicación a la cual vaya a ser sometido este material.

b) Primer re-trabajo en aceros TRIP. Cuando se soldó por segunda vez con el mismo proceso y parámetros, manualmente, se observó que el perfil de soldadura cambio drásticamente, tanto en la forma de penetración como el perfil superficial, esto debido a que en una reparación, existe ya la unión metalúrgica entre las placas a diferencia de cuando se suelda por primera vez, donde existe un espacio entre las placas, además se observó que existe una zona de ablandamiento en la ZAC adyacente al metal base debido a una superioridad de la fase ferrítica, sin embargo los valores de resistencia de tensión al corte registrados, fueron mayores que los mínimos requeridos por el grado del material (780 MPa).

c) Segundo re-trabajo en aceros TRIP. Al igual que en la segunda soldadura el perfil cambia drásticamente, además de la existencia de una degradación del espesor debido al método de remoción manual empleado, que puede llegar a remover parte del material base, la fractura se encontró en la zona afectada por el calor adyacente a la zona de fusión, a diferencia de la segunda soldadura, donde la falla se encontró en la zona afectada por el calor adyacente al metal base, aun así los valores de esfuerzo de tensión al corte se mantuvieron por encima del valor mínimo especificado por el grado del material.

## **5.2 Reparación de aceros DP.**

a) Primera soldadura en aceros DP. En los aceros DP se puede encontrar que la falla ocurre en la ZAC adyacente al metal base, la información bibliografía señala a esta zona como la zona de ablandamiento, la cual es común en este tipo de materiales, a pesar de ello siendo un acero DP600, el cual la resistencia mínima a la tensión debido al grado del material debe de ser 600 MPa mostró resultados mayores a este valor, sin embargo estuvieron por debajo del valor original de la resistencia del metal base (644 MPa) lo cual indica una eficiencia menor al 100%. La zona de ablandamiento a la cual se le

atribuye esta pérdida de resistencia ocurre debido a un revenido de la martensita original.

b) Primer re-trabajo en aceros DP. En La segunda soldadura además de encontrar un perfil de soldadura diferente tanto en la superficie como en su penetración, la resistencia del material bajo considerablemente a comparación de la primera soldadura, no cumpliendo con la resistencia mínima del material (600 MPa).

c) Segundo re-trabajo aceros DP. En la tercer soldadura se observa que la resistencia está muy por debajo de la resistencia mínima del material, pero se registraron valores más altos que en la segunda soldadura.

En los aceros TRIP a pesar de que se registró una pérdida de resistencia a la tensión en cada reparación, la resistencia en todos los casos estuvo por encima de la resistencia mínima del metal base, los fabricantes de aceros comúnmente le dan un margen de resistencia mayor al mínimo de la especificación que en este caso es de 780 MPa., sin embargo queda a consideración del usuario o cliente la reparación de estos.

En los aceros DP desde la primera soldadura se observa una zona de ablandamiento, la cual al ser sometida a un recalentamiento crece y bajan aún más sus propiedades mecánicas, esto debido al revenido de martensita en la ZAC adyacente al metal base, una de las posibles soluciones hasta el momento es en el diseño, donde se tendrá que considerar la perdida de resistencia en este tipo de uniones y dar de otra forma a la unión las características necesarias que requiere el elemento estructural.

## Referencias Bibliográficas

- [1]. Tzormpatzdi V. and Fournalaris G. EMC (2008). 14<sup>th</sup> European microscopy congress 1-5 September, Aachen. Germany Microstructure - mechanical property in dual phase automotive strip steel.
- [2]. Consultado en [www.Steelforge.com](http://www.Steelforge.com) 25/marzo/2010.
- [3]. ArcelorMittal automotive worldwide (2008), Catálogo de productos, Edición para Europa, aceros micro aleados para conformación en frío.
- [4]. Autosteel partnership June, 2009 Advanced High Strength Steel application design and stamping process guideline.
- [5]. Lis J., Lis A.K., Kolan C.; (2005), Journal of Materials Processing Technology 162–163, 350–354, Processing and properties of C–Mn steel with dual-phase microstructure Institute of Materials Engineering, Czestochowa University of Technology, 19 Armii Krajowej, 42-200 Czestochowa, Poland.
- [6]. Zhili Feng (2006) Characterization of Thermo-Mechanical Behaviors of Advanced High Strength Steels (AHSS): Task 2 - Weldability and Performance Evaluations of AHSS Parts for Automotive Structures.
- [7]. Farabia N., Chena D.L, Lib J., Zhou Y., Dongc S.J. (2009) Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints Department of Mechanical and Industrial Engineering, Ryerson University, 350 Victoria Street, Toronto, Ontario M5B 2K3, Canada.
- [8]. O'Brien R. (1996) Welding Handbook/welding processes volume 2. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México.

- [9]. Roman Engineering Services (2007) Advanced High-Strength Steel (AHSS) Weld Performance Study for Auto body Structural Components. South field, Michigan U.S.A.
- [10]. Diego García Lázaro (2009).Centro Zaragoza, Instituto de investigación de reparación de vehículos, Tipos de aceros en las carrocerías y su reparabilidad, Zaragoza España.
- [11]. Gould J.E., Khurana S.P., Li T. ; (2006) Predictions of microstructures when welding automotive advanced high- strength steels; welding journal, AWS May 2006, Columbus, Ohio U.S.A.
- [12]. Volpone L.M.; Reyes F. A.; Muller S.M.; Rutilli G; (2007) “Impact of the welding process in microstructure and hardness of AHSS (DP and TRIP), applying the GMAW, CMT, Brazing; CMT and laser LBW- CO<sub>2</sub> processes”. Proceeding of the 3<sup>er</sup> Encuentro y congreso internacional en tecnología de la soldadura industrial 2007, Saltillo México.
- [13]. Pérez M. G.:(2008) Estudio de la soldabilidad de aceros avanzados de alta Resistencia (AHSS): martensíticos, doble fase (DP) y plasticidad inducida por transformación, Saltillo México.
- [14]. AWS D8.8M (2007) Specification for automotive weld quality- Arc welding steel. American Welding Society, Miami Florida U.S.A.
- [15]. I-car advantage (2006) Advanced High-Strength Steels –A Collision Repair Perspective, Hoffman Estates, IL, U.S.A.
- [16]. General Motors, AISI, and AISI Automotive (2003) Advanced High Strength Steel Reparability Study Phase II Final Report, American iron steel institute south field, Michigan, U.S.A.
- [17]. Angarita Cesar; Moewis Philippe; Sáenz Laura (2003) Evaluación Del comportamiento mecánico de un acero microaleado X60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- [18]. The Auto/Steel Partnership Member Companies, (2003) Light Weight Suv Frame design development. Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- [19]. Información de Manual Fronius, CMT: Cold Metal Transfer, Proceso de arco voltaico corto MIG/MAG.
- [20]. Información Manual Lincoln, Surface Tension Transfer (STT) Process Cleveland, OH. U.S.A.

- [21]. AWS A5.18 (1999) Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods For Gas Shielded Arc Welding, Miami Florida U.S.A.
- [22]. AWS B1.10 (1999). Guide for the Nondestructive Examination of Welds Miami Florida U.S.A.
- [23]. Baltazar Hernandez V.H., Panda S.K., Kuntz M.L., Zhou Y. (2009) Nanoindentation and microstructure analysis of resistance spot welded dual phase steel a Centre for Advanced Materials Joining, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- [24]. Consultado en [www.ahmsa.com](http://www.ahmsa.com) 25/marzo/2010.
- [25]. Bhattacharya Debanshu, Developments in Advanced High Strength Steels, Research and Development Center, Mittal Steel, East Chicago, Indiana, U.S.A.
- [26]. Koppel Conway (2009), Collision Standard Advanced High strength Steel, U.S.A.
- [27]. Daimler Chrysler Corporation (2003) Arc Welding Automotive Components, U.S.A.
- [28]. ASM Handbook (1992) Volume 9 Metallography and microstructures, U.S.A.

# Figuras y tablas

## Figuras

**Figura 2.1** Aceros de baja resistencia, aceros de alta resistencia HSS y aceros avanzados de alta resistencia indicados en color verde, amarillo y azul. <sup>[15]</sup>

**Figura 2.2** Microestructura de un acero HSLA laminado en caliente, con una microestructura de ferrita y perlita, atacado con picral al 4% y después con nital 2% 200x. <sup>[28]</sup>

**Figura 2.3** Curvas límites calculados para familias de aceros HSLA laminadas en frío en la cual nos muestra la deformación máxima permisible en fracción. <sup>[3]</sup>

**Figura 2.4** Comparación de esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril de un acero DP contra un acero HSLA.

**Figura 2.5** Esquema de obtención de Aceros Doble Fase por enfriamiento controlado. <sup>[5]</sup>

**Figura 2.6** (a) Representación gráfica de la ubicación de los aceros de doble fase de acuerdo a su esfuerzo- deformación (b) representación gráfica de una estructura típica de un acero de doble fase. <sup>[4]</sup>

**Figura 2.7** Microestructura de un acero DP 600 obtenida mediante un microscopio electrónico de barrido donde se puede observar la fase de martensita (M) y la fase de ferrita (f). <sup>[7]</sup>

**Figura 2.8** Concepto metalúrgico para obtener aceros TRIP.

**Figura 2.9** Comparación del esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril de los aceros TRIP en comparación con los aceros de doble fase y los aceros HSLA notando sus mejores propiedades mecánicas <sup>[4]</sup>.

**Figura 2.10** (a) Representación gráfica de la ubicación de los aceros de TRIP de acuerdo a su esfuerzo- deformación (b) Representación gráfica de una estructura típica de un acero TRIP. <sup>[4]</sup>

**Figura 2.11** Microestructura típica de un acero TRIP (a) Atacada con nital 1000x. (b) Atacada con LePera 2000x <sup>[25]</sup>.

**Figura 2.12** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de TRIP de acuerdo a su esfuerzo- deformación. <sup>[4]</sup>

- Figura 2.13** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de MS de acuerdo a su esfuerzo - deformación.<sup>[4]</sup>
- Figura 2.14** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de FB de acuerdo a su esfuerzo- deformación <sup>[4]</sup>.
- Figura 2.15** Representación gráfica de la ubicación de los aceros de TRIP de acuerdo a su esfuerzo- deformación.<sup>[4]</sup>
- Figura 2.16** Uso de los diferentes tipos de aceros en la estructura de un automóvil. <sup>[28]</sup>
- Figura 2.17** Chasis estructural de una camioneta utilitaria con aceros convencionales. <sup>[18]</sup>
- Figura 2.18** Chasis estructural de una camioneta utilitaria aceros HSS, AHSS y Aceros convencionales.<sup>[18]</sup>
- Figura 2.19** esquema de una transferencia tipo spray o por aspersión.
- Figura 2.20** Proceso de soldadura con tecnología CMT. <sup>[19]</sup>
- Figura 2.21** Esquema del proceso STT. <sup>[21]</sup>
- Figura 2.22** Junta típica de un elemento estructural para la industria automotriz. <sup>[6]</sup>
- Figura 2.23** Esquema de uniones soldadas mediante el proceso GMAW para un chasis estructural.
- Figura 2.24** materiales AHSS sometidos a pruebas de tensión. <sup>[6]</sup>
- Figura 2.25** En esta gráfica donde se muestra la eficiencia de la junta. <sup>[6]</sup>
- Figura 2.26** Diferencia de durezas entre la zona afectada por el calor, metal base y metal de soldadura siendo 1 el color original de la dureza del metal base y a mayor color más dureza a menor color zonas blandas.<sup>[6]</sup>
- Figura 2.27** Relación de la dureza y la fractura en una prueba de resistencia de tensión al corte en un acero DP980 donde fractura en la zona afectada por el calor.<sup>[6]</sup>
- Figura 2.28** Zona de ruptura en diferentes aceros AHSS. <sup>[6]</sup>
- Figura 2.29** Aspecto microestructural de DP 600 soldado con GMAW: CMT; (a) Zona de unión de las dos placas, evidenciando zona de aporte, ZAC y metal base; (b) Zona de aporte, mostrando Ferrita Widmanstatten secundaria (FWS), bainas de Ferrita alotriomórfica (inter granular, FAI) y ferrita acicular bainítica (FAB); (c) ZAC, mostrando bainita inferior (BI) y bainita superior (BS). Atacado con HNO<sub>3</sub> 2% (Nital)+ Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Le Pera). Parámetros utilizados: 128 Amper, 14 V, 600 mm/min. Calor de entrada 4551. 68 J/in. <sup>[12]</sup>
- Figura 2.30** Distribución de durezas por proceso GMAW de acero DP 600. <sup>[2]</sup>
- Figura 2.31** Macro ataque en acero DP 600 utilizando corriente directa. <sup>[9]</sup>
- Figura 2.32** Resultados de durezas de la unión realizada en espécimen DP 600 tabla 3.3. <sup>[9]</sup>
- Figura 2.33** Macro ataque de acero DP 600 usando corriente alterna. <sup>[9]</sup>
- Figura 2.34** Resultados de durezas de la unión realizada en espécimen DP 600 tabla 3.3 <sup>[9]</sup>
- Figura 2.35** Microestructura mediante SEM en la zona de ablandamiento, donde se puede observar la formación de bainita (B), martensita revenida (TM) y ferrita (F). <sup>[7]</sup>

**Figura 2.36** a) Perfil de durezas donde se muestra la zona de ablandamiento en una unión por medio de láser, b) Microestructura del metal base DP600 observada mediante SEM  
c) Martensita revenida del metal base observada mediante SEM <sup>[23]</sup>

**Figura 2.37** La foto (a) muestra la afectación en todo el espesor de la placa inferior. Las fotos (b) y (c) presentan la zona epitaxial ZAC, respectivamente, mostrando crecimiento de agujas de martensita y ferrita intergranular en zona de aporte, y martensita con ferrita bainítico acicular, ferrita poligonal y posiblemente austenita retenida en ZAC. Atacado con  $\text{HNO}_3$  2% (Nital)+  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (Le Pera). Parámetros: 118 Amper, 14.3 Volts y 800 mm/min. Calor de entrada: 3214.50. J/in.<sup>[12]</sup>

**Figura 2.38** Distribución de durezas por proceso GMAW de acero TRIP 800. <sup>[12]</sup>

**Figura 2.39** Requerimientos de pierna y garganta en la soldadura.

**Figura 2.40** Defectos comunes en soldaduras de doble filete. <sup>[22]</sup>

**Figura 2.41** Esquema de definición de un claro. <sup>[27]</sup>

**Figura 2.42** Aspecto de un socavado.

**Figura 2.43** Porosidad. <sup>[27]</sup>

**Figura 2.44** Esfuerzo de cedencia de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.45** Esfuerzo ultimo a la tensión de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.46** Porcentaje de elongación de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.47** Esfuerzo de cedencia de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.48** Esfuerzo ultimo a la tensión de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.49** Porcentaje de elongación de diferentes Materiales a diferentes condiciones. <sup>[16]</sup>

**Figura 2.50** Equipo básico para reparación en el proceso de ensamblaje.

**Figura 4.1** Fotografía del tipo y modelo del robot utilizado.

**Figura 4.2** Dimensiones de placa y traslape.

**Figura 4.3** Ilustración representativa de la vista superior de la placa.

**Figura 4.4** Muestras de donde se extrajeron las probetas de tensión.

**Figura 4.5** Forma en que se realizó el ensayo de tensión.

**Figura 4.6** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 primera soldadura.

**Figura 4.7** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780.

**Figura 4.8** Grafica de microdureza promedio TRIP 780.

**Figura 4.9** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 primera soldadura.

**Figura 4.10** Diferentes zonas de microdureza en aceros DP 600.

**Figura 4.11** Grafica de microdureza promedio DP600

**Figura 4.12** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 segunda soldadura

**Figura 4.13** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780 segunda soldadura.

**Figura 4.14** Grafica de microdureza promedio TRIP 780 segunda soldadura.

- Figura 4.15** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 segunda soldadura.
- Figura 4.16** Diferentes zonas de microdureza en aceros DP 600 segunda soldadura.
- Figura 4.17** Grafica de microdureza promedio DP600 segunda soldadura.
- Figura 4.18** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros TRIP 780 tercera soldadura.
- Figura 4.19** Grafica de microdureza promedio TRIP 780 tercera soldadura.
- Figura 4.20** Diferentes zonas de microdureza en aceros TRIP 780 tercera soldadura.
- Figura 4.21** Ruptura en los ensayos de tensión en aceros DP600 tercera soldadura.
- Figura 4.22** Grafica de microdureza promedio DP600 segunda soldadura.
- Figura 4.23** Diferentes zonas de dureza en aceros DP 600 tercera soldadura
- Figura 4.24** Eficiencia de la unión en aceros TRIP 780.
- Figura 4.25** Eficiencia de la unión en aceros TRIP 780.
- Figura 4.26** Metal base acero TRIP 780 500x
- Figura 4.27** Zona afectada por el calor adyacente a la zona de fusión TRIP 780 500x.
- Figura 4.28** Zona afectada por el calor adyacente al metal base TRIP 780 500x.
- Figura 4.29** Metal base acero DP 600 500x.
- Figura 4.30** Zona Afectada por el calor adyacente al metal base 600 500x.

## Tablas

- Tabla 2.1** Composición química de un acero HSLA - Altos Hornos de México.
- Tabla 2.2** Ejemplo de las propiedades mecánicas de los aceros diseñados para la ULSAB. <sup>[4]</sup>
- Tabla 2.3** Ejemplo de la composición química de un acero DP600 (% e.p.). <sup>[13]</sup>
- Tabla 2.4** Composición química de un acero TRIP 800 (% e.p.). <sup>[13]</sup>
- Tabla 2.5** Especificación de total de piezas, peso y soldadura en chasis en Acero convencional.
- Tabla 2.6** Especificación de total de piezas, peso y soldadura en chasis en Acero HSS, AHSS.
- Tabla 2.7** Composición química ER70S-3 y ER70S-6 información AWS A.18. <sup>[21]</sup>
- Tabla 2.8** Propiedades mecánicas ER70S-3 y ER70S-6 información AWS A.18. <sup>[21]</sup>
- Tabla 2.9** Durezas en DP600.
- Tabla 2.10** Características de soldadura de una unión de un DP 600 de 3.6 mm de grosor. <sup>[9]</sup>
- Tabla 2.11** Características de soldadura de una unión de un DP 600 de 3.6 mm de espesor. <sup>[9]</sup>
- Tabla 2.12** Valores de micro dureza para soldadura en aceros TRIP por GMAW.
- Tabla 4.1** Matriz de experimentación (describe el número de probetas y pruebas a realizar).
- Tabla 4.2** Comparación entre el análisis químico del fabricante y Comimsa del acero DP600.
- Tabla 4.3** Pruebas Mecánicas a material base, acero DP600.
- Tabla 4.4** Comparación entre el análisis químico del fabricante y Comimsa del acero TRIP780.
- Tabla 4.5** Pruebas Mecánicas a material base, acero TRIP 780.

**Tabla 4.6** Características del equipo de soldadura.

**Tabla 4.7** Parámetros utilizados para la soldadura de los cupones.

**Tabla 4.8** Tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje primera soldadura.

**Tabla 4.9** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas TRIP 780.

**Tabla 4.10** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas DP600.

**Tabla 4.11** Tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje segunda soldadura.

**Tabla 4.12** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas TRIP 780 segunda soldadura.

**Tabla 4.13** Tabla de microdurezas de las diferentes zonas DP600 segunda soldadura.

**Tabla 4.14** Tabla de esfuerzos máximos y eficiencia en porcentaje tercera soldadura.

**Tabla 4.15** Tabla de durezas de las diferentes zonas TRIP 780 tercera soldadura.

**Tabla 4.16** Tabla de durezas de las diferentes zonas DP600 tercera soldadura.