

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS AHSS  
TERCERA GENERACIÓN TWIP Y AUSTENÍTICOS INOXIDABLES**

**POR**

**MARIO ALBERTO SOLÍS ÁLVAREZ**

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

**SALTILLO, COAHUILA. OCTUBRE DE 2012**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE SOLDABILIDAD DE ACEROS AVANZADOS AHSS TERCERA  
GENERACIÓN TWIP Y AUSTENÍTICOS INOXIDABLES**

**POR**

**MARIO ALBERTO SOLÍS ÁLVAREZ**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA. OCTUBRE DE 2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios:** Por brindarme esta oportunidad

**A mi Madre Martha:** Por su amor y apoyo incondicionales

**A mis Hermanos Soledad y Luis:** Por alentarme y ser ejemplo de vida

**A mi Padre Mario:** Por sus sabios consejos

**A mis asesores y maestros:** Por brindar sus conocimientos y tiempo en mi formación académica

**A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales:** Por darme esta oportunidad de desarrollarme académicamente y profesionalmente

**A CONACYT:** Por proporcionar el financiamiento económico para poder continuar con mi desarrollo académico

Síntesis	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1 Objetivos específicos	4
1.3. Justificación	4
1.4. Planteamiento del problema	5
1.5. Aportación tecnológica	5
1.6. Alcance	6
CÁPITULO 2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Clasificación de los aceros avanzados AHSS	7
2.2 Microestructura de aceros avanzados AHSS tercera generación	11
2.2.1 Maclas y deslizamientos	13
2.2.2 Microestructura de aceros TWIP	15
2.2.3 Microestructura de aceros austeníticos inoxidables	17
2.3 Procesos de soldadura utilizados en la industria automotriz para aceros AHSS tercera generación	22
2.3.1 GMAW	23
2.3.1.1 Proceso de soldadura de arco de gas metal (GMAW gas metal arc welding)	23
2.3.1.2 Polaridad de electrodos	24
2.3.1.3 Gases protectores	26
2.3.1.4 Modos de transferencia de metal	28
2.3.1.5 Ventajas y desventajas del proceso GMAW	31
2.3.2 Proceso de soldadura laser (LBW)	32
2.3.2.1 Laser CO <sub>2</sub> y laser Yag	32
2.3.2.2 Ventajas y desventajas del proceso laser	33

2.3.2.3 Focalización y emisión	34
2.3.2.4 Equipo	35
2.3.2.5 Calidad de la soldadura	36
2.3.2.6 Aplicaciones	38
2.3.2.7 metales soldables	39
2.3.3 Proceso de soldadura por resistencia eléctrica RSW	41
2.3.3.1 Proceso de soldadura RSW	42
2.3.3.2 Distribución de calor durante el proceso RSW	43
2.3.3.3 Ciclo de soldadura	45
2.3.3.4 Equipo	47
2.3.3.5 Electrodo	50
2.3.3.6 Calidad de la soldadura	51
2.3.4 Soldadura por fricción agitación (FSW)	52
2.3.4.1 Fundamentos e introducción	52
2.3.4.2 Variables de soldadura	55
2.3.4.3 Herramental	56
2.3.4.4 Regiones de la soldadura por fricción agitación	58
2.3.4.5 Defectos	58
2.4 Criterios de Aceptación de soldadura en la industria automotriz	59
2.4.1 Especificaciones de dimensiones de la soldadura de filete	59
2.4.2 Defectos en uniones soldadas y principales causas	60
2.4.2.1 Uniones soldadas con falta de penetración de raíz	61
2.4.2.2 Claros en las uniones soldadas por interrupción de suministro de alambre	61
2.4.2.3 Socavamiento	62
2.4.2.4 Porosidades	63
2.4.2.5 Agrietamiento	64

2.5 Soldabilidad de aceros AHSS tercera generación	64
2.5.1 Soldabilidad de los aceros TWIP	64
2.5.1.1 Soldabilidad de aceros TWIP por el proceso GTAW, LBW y PLBW	66
2.5.1.1.1 Efectos de los procesos de soldadura en la zona de fusión.	66
2.5.1.1.2 Evaporación del Manganeseo en la zona de fusión	68
2.5.1.1.3 Dilución en la zona de fusión	70
2.5.1.1.4 Segregación	71
2.5.1.1.5 Tamaño de grano	72
2.5.1.1.6 Esfuerzos residuales	72
2.5.1.1.7 Defectos de soldadura	72
2.5.2 Soldabilidad de aceros austeníticos inoxidable	73
2.5.2.1 Soldabilidad de aceros austeníticos inoxidable por proceso RSW	76
2.5.2.2 Soldabilidad de aceros austeníticos inoxidable por GMAW	81
2.5.2.3 Soldabilidad de aceros austeníticos inoxidable por soldadura laser (LBW)	84
2.5.2.4 Soldabilidad de aceros austeníticos inoxidable por el proceso FSW	87
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	93
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO	96
4.1 Determinación de variables	96
4.2 Elaboración de probetas de soldadura	97
4.3 Evaluación de uniones soldadas acero TWIP	99

4.3.1 Prueba de tensión	99
4.3.2 Prueba de microdureza	99
4.3.3 Análisis metalográfico	100
4.4 Resultados obtenidos	100
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>107</b>
Índice de Figuras	112
Índice de Tablas	117
Resumen autobiográfico	118

# Síntesis

La aplicación de aceros avanzados de alta resistencia por sus siglas en inglés AHSS, proporciona beneficios como la reducción del peso del vehículo sin comprometer la seguridad de los pasajeros, debido a la aplicación de espesores más delgados lo cual lleva a la reducción en el consumo del combustible al igual que una mejora en el desempeño de la absorción de energía durante algún impacto.

En la actualidad se está desarrollando una tercera generación de los aceros avanzados de alta resistencia, los cuales se denominan aceros de plasticidad inducida por maclaje TWIP por sus siglas en inglés, aceros austeníticos inoxidables, aceros endurecidos por compartición de bandas SIP por sus siglas en inglés y por último aceros de bajo peso con plasticidad inducida y adición de aluminio SIP por sus siglas en inglés. Cabe mencionar que en el mercado comercial solo se encuentran los austeníticos inoxidables comúnmente conocidos como la serie 300, el resto de estos aceros aun se encuentran en desarrollo por parte de las acereras.

Comúnmente estos aceros son unidos por procesos de soldadura de fusión gas-metal (MIG) y láser (LBW) por sus siglas en inglés, proceso de soldadura por resistencia (RSW) y últimamente se está desarrollando un proceso en estado semisólido, la soldadura por fricción agitación (FSW). En estos aceros las altas resistencias se obtiene mediante la modificación de su microestructura. Durante los procesos de soldadura por fusión y resistencia la microestructura original es modificada debido al aporte de calor, es decir a mayor calor de entrada es mayor el efecto sobre la microestructura tanto del material base como de la zona de fusión.

Este trabajo presenta el estado del arte de la soldabilidad de los aceros austeníticos inoxidables y TWIP unidos por los proceso de fusión gas metal



(GMAW) y láser (LBW), resistencia por puntos (RSW) y estado semi-sólido fricción agitación (FSW).

Actualmente en la industria automotriz existe un desconocimiento sobre la soldabilidad de los aceros TWIP y austeníticos inoxidable debido a que normalmente se utilizan aceros con diferentes composiciones químicas, por lo cual se plantea que este trabajo sirva como guía inicial de la soldabilidad de estos aceros en los procesos ya mencionados y qué características presentan después de ser unidos por estos procesos.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Durante las últimas décadas, un esfuerzo significativo de investigación ha sido dirigido hacia el desarrollo de tecnologías avanzadas en aceros de alta resistencia (AHSS). Esta investigación fue impulsada principalmente por las necesidades de la industria automotriz para la reducción del peso del vehículo para mejorar la eficiencia de consumo de combustible de las unidades y aumentar la seguridad de los ocupantes. Cada año existe una mayor presión regulatoria en el mundo con respecto a la conservación del medio ambiente y las expectativas del consumidor con respecto a resistencia al impacto y la economía de combustible se han traducido en el uso extensivo de los grados AHSS en las estructuras de carrocerías. Las proyecciones indican que el porcentaje en peso de aceros AHSS aumentará un 35% para el año 2015, mientras que los aceros de medio carbono (mild steels) se redujeron de 55% (en 2007) al 29% en las carrocerías y puertas de vehículos ligeros. La mayoría de los fabricantes de automóviles internacionales están optando por un mayor uso de los AHSS como parte de sus estrategias de desarrollo de vehículos. [1]

La tendencia actual en la construcción del cuerpo de los automóviles es la aplicación de los aceros convencionales, principalmente con bajo contenido de carbono, formados por laminación en caliente y frío. Recocidos después de la deformación, y el enfriamiento se realiza de tal manera que permitan obtener estructuras ferríticas. Sin embargo, la nueva generación de aceros requiere tratamientos especiales, que permiten obtener estructuras más complejas. El método dominante de la obtención de montaje de carrocerías de vehículos sigue siendo la soldadura por resistencia (RSW), a pesar de la expansión de las tecnologías como el láser / soldadura por láser híbrido, pegado, remachado o

grapado. Este trabajo monográfico presenta las características de los modernos aceros avanzados de plasticidad inducida por maclaje (TWIP) los cuales tiene un alto contenido de manganeso y, aceros austeníticos inoxidables con alto contenido de níquel-cromo, aceros (L-IP) y aceros (SIP). Para efectos de este estudio bibliográfico los últimos cuatro tipos de aceros TWIP, austeníticos inoxidables L-IP y SIP serán mencionados como aceros avanzados de alta resistencia tercera generación al igual que se presentará el estudio de la soldabilidad de estos aceros.

## 1.2 OBJETIVO

Estudiar el estado del arte de la soldabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia tercera generación (AHSS) TWIP y austeníticos inoxidables unidos por procesos de soldadura de fusión y resistencia eléctrica.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el estado del arte de aceros TWIP y austeníticos inoxidables.
- Estudiar los efectos del proceso de soldadura en el comportamiento de las uniones soldadas.
- Evaluar las microestructuras de las uniones Soldadas por procesos de fusión en aceros TWIP y austeníticos inoxidables.
- Evaluar las microestructuras de las uniones Soldadas por el proceso de FSW en aceros austeníticos inoxidables.
- Evaluar las microestructuras de las uniones Soldadas por el proceso de fusión RSW en aceros austeníticos inoxidables.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

La industria automotriz está desarrollando una tercera generación de aceros avanzados estructurales, esta tercera generación es lo último en tecnología, no solo de ensamble de carrocerías automotrices sino también de producción de aceros, cabe decir que muchos de los aceros de alta resistencia todavía se encuentran en pruebas y por ende no son todavía producidos en masa y no se

están utilizando todavía a gran escala en la industria automotriz, es por eso que existe una necesidad de empezar a estudiar las propiedades que presentarán no solo durante el proceso de ensamble sino también qué características presentarán en servicio y por último el tópico principal de este estudio, la soldabilidad de los mismos, es decir qué microestructura presentan después de ser unidos por los procesos de fusión y resistencia eléctrica, al no existir mucha bibliografía disponible sobre el tema se pretende que este estudio sirva como una guía inicial de lo que será la tendencia en la industria automotriz de los procesos mayormente utilizados en ella para la unión (soldabilidad) de aceros avanzados de tercera generación.

#### 1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se están empezando a utilizar aceros avanzados de segunda generación como lo son DP y TRIP, al igual que los aceros martensíticos y al boro desde hace algún par de años [8] [9]. En la industria acerera ya se está desarrollando una tercera generación de estos aceros avanzados (TWIP, austeníticos inoxidables, L-IP, S-IP), estos aceros son unidos por diferentes métodos principalmente soldadura por resistencia eléctrica (RSW resistance spot welding), soldadura de arco gas metal (GMAW gas metal arc welding) y soldadura de emisión de láser (LBW laser beam welding) en la industria automotriz, a la fecha no existe información detallada de la situación actual de la soldabilidad de estos aceros, como qué propiedades presentan los mismos después de ser unidos por los métodos mencionados, como cuál es la pérdida del esfuerzo a la cedencia en la zona afectada por el calor y cuál es la tendencia de que estos aceros de tercera generación sean mayormente utilizados en la fabricación de unidades automotrices.

#### 1.5 APORTACIÓN TECNOLÓGICA

El presente estudio plantea sentar las bases para la iniciación del estudio de la soldabilidad de los aceros avanzados tercera generación (TWIP, austeníticos

inoxidables) y qué propiedades presentan después de ser unidos por los procesos de fusión y resistencia eléctrica.

Evidenciar la importancia del conocimiento en la soldabilidad de los aceros TWIP y austeníticos inoxidables con los procesos anteriormente mencionados, con el fin de predecir qué cambios en la micro estructura de la unión existirán después del proceso de soldadura.

## 1.6 ALCANCE

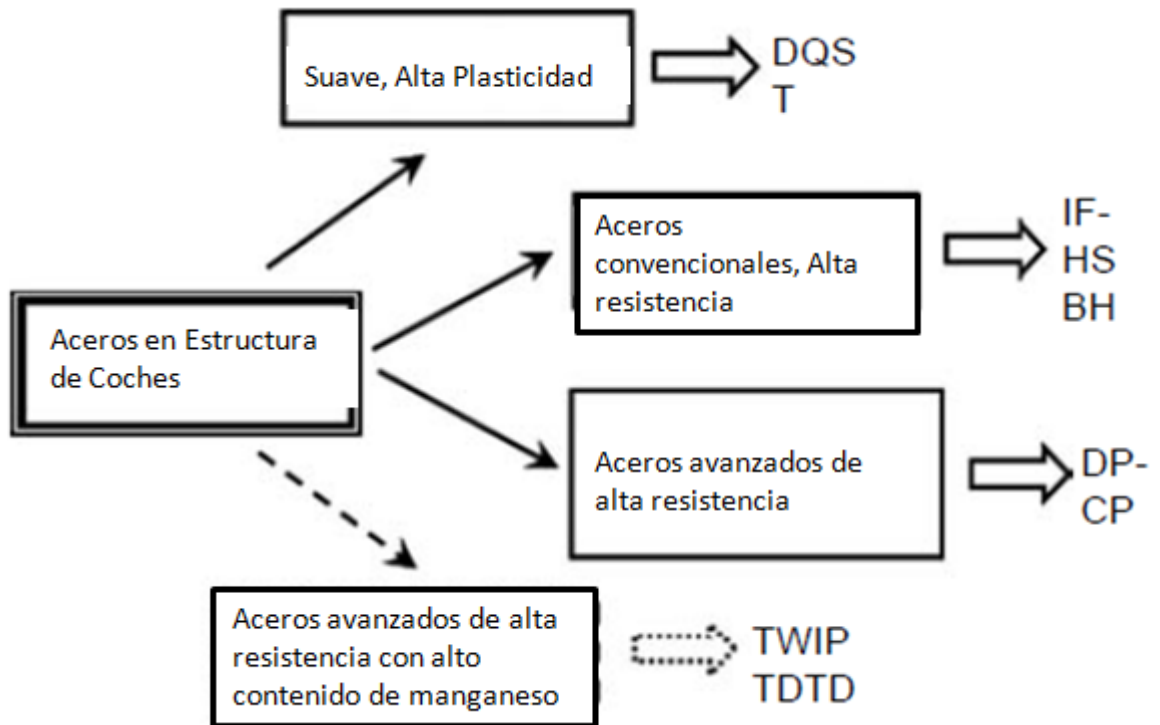
El alcance del presente trabajo es el estudio del estado del arte de la soldabilidad de los aceros avanzados tercera generación TWIP y austeníticos inoxidables, unidos por los procesos de fusión GMAW, LBW, resistencia RSW y estado semisólido FSW.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS AVANZADOS AHSS

Definido por Jacek Senkara[1], hasta el momento, no existe una clasificación generalmente aceptada de aceros estructurales para la industria automotriz. Según los conocimientos actuales, sin embargo, se pueden clasificar en tres grupos básicos (Figura 2.1):



**Figura 2.1.** Clasificación de los aceros estructurales según los conocimientos actuales. [1]

I. Aceros suaves de bajo carbono y alta plasticidad (DQSK), libre de intersticios (IF), con resistencia a la tracción de menos de 300 MPa y elongación total de 30-60%;

II. Aceros convencionales de alta resistencia (HSS), aceros endurecidos por horneado (BH), aceros al manganeso (CMN), aceros microaleados SI, y aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA)) con 300, MPa Rm, 700 y el alargamiento reducido, en comparación con el grupo anterior;

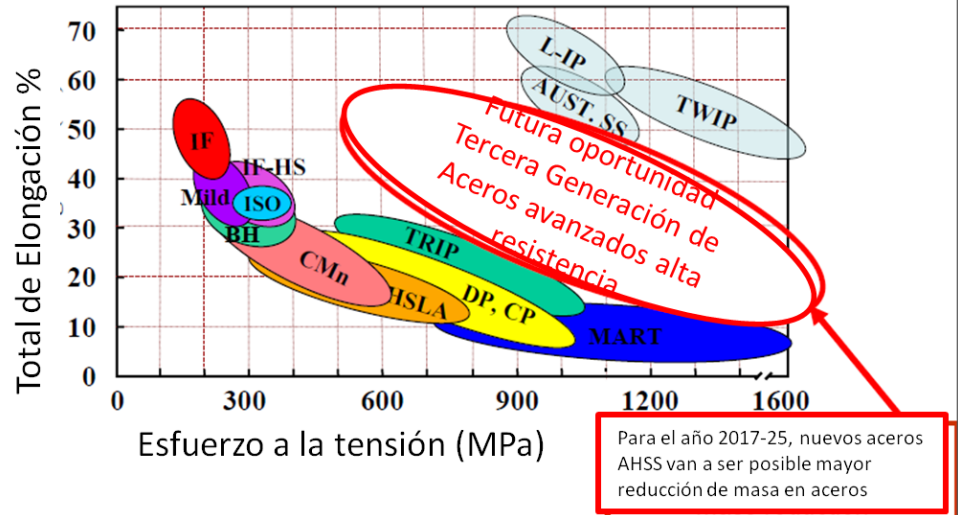
III. Aceros avanzados de muy alta resistencia (AHSS) (por encima de 700 MPa, llegando hasta los 2000 MPa) y elongación del 5-30%, es decir mientras la resistencia a la tensión aumenta, el % de elongación decrece. Ver Figura 2.1. [1]

Para efectos de referencia de este estudio dividiremos los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) en tres generaciones, dentro de la primera generación se encontraran los aceros de fase compleja (CP) y doble fase (DF), en la segunda generación están los aceros por inducción plástica (TRIP) y aceros martensíticos (MS), dentro de la tercera generación están los aceros (TWIP), aceros austeníticos inoxidables (ASS), aceros (L-IP) y aceros (SIP).

En la actualidad no existe una norma o consenso que determine qué aceros pertenecen a la primera, segunda o tercera generación de aceros avanzados, esta segregación se ha definido principalmente por orden de aparición de los diferentes aceros o por definición propia de los autores. Por ejemplo, para las compañías que fabrican los aceros, la tercera generación AHSS aún no se desarrolla ni siquiera el nombre de los posibles aceros sin embargo se tiene planeado que estos aceros sean más ligeros, esta es una proyección que se tiene para el año 2017 a el año 2025. Ver figura 2.2. [13]

### 3ra Generación de acero avanzados alta resistencia

Estamos desarrollando una nueva generación de aceros para el futuro

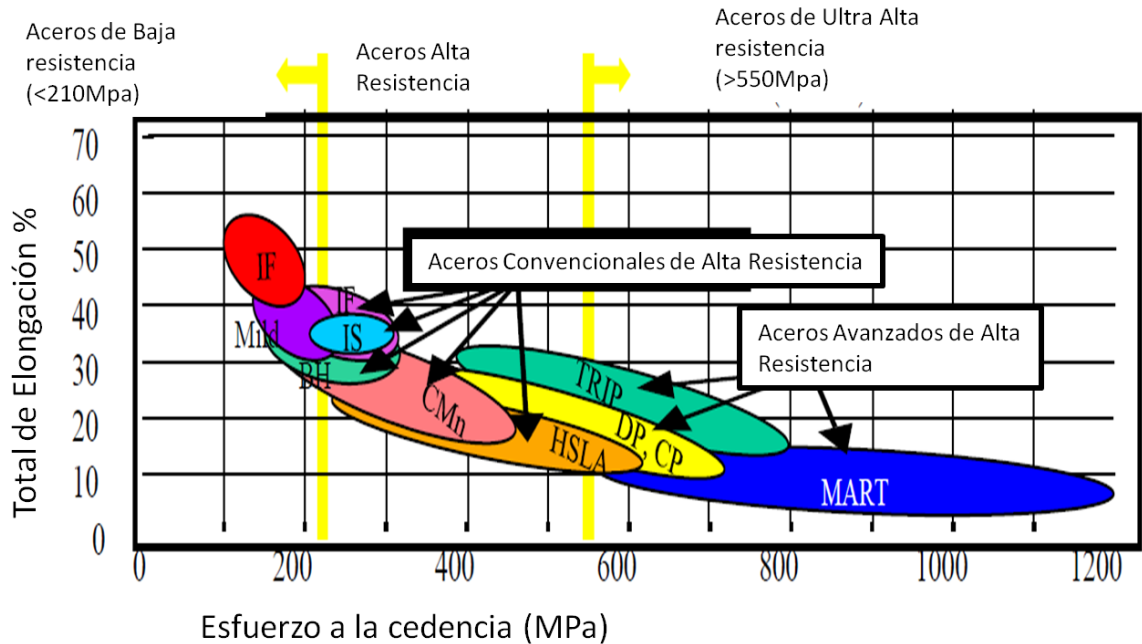


**Figura 2.2.** Clasificación de los aceros estructurales según las compañías acereras. [13]

Es decir para las fabricantes de acero la segunda generación de aceros avanzados AHSS son los TWIP, L-IP y austeníticos inoxidable, y la primera generación son TRIP, doble Fase, fase compleja y martensíticos.

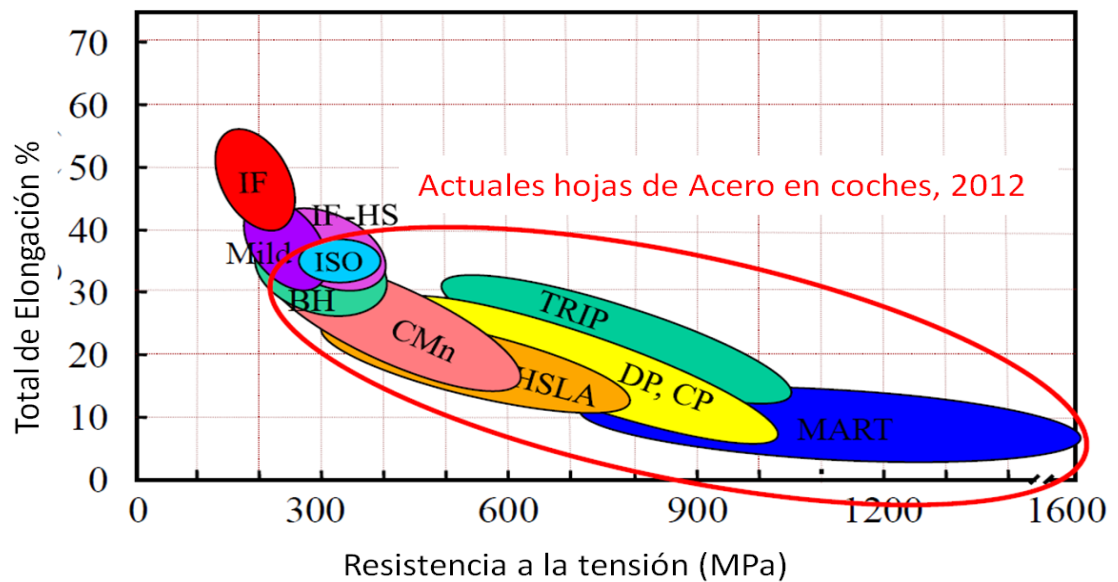
Para algunos autores (Emmanuel De Moor, David K. Matlock) y para las compañías automotrices la primera generación de los aceros avanzados son los aceros convencionales con alta resistencia, para segunda generación toman en cuenta los aceros TRIP, doble fase, fase compleja y martensíticos y para la tercera generación toman en cuenta los aceros LIP, TWIP y austeníticos inoxidable. Ver Figura 2.3. [13]





**Figura 2.3.** Clasificación de los aceros estructurales según las compañías automotrices. [13]

Algunos otros autores como J. Zenkara [1] (2010), descalifican esta primera generación por el nombre de convencionales, por tal motivo para efecto de este estudio hay que revisar cuales son los aceros que actualmente se están utilizando en la industria automotriz. Ver Figura 2.4.



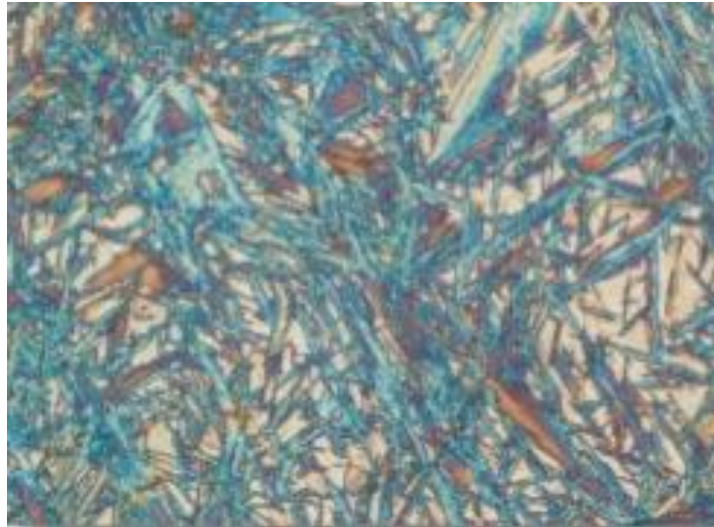
**Figura 2.4.** Clasificación de los aceros estructurales según algunos autores. [13]

Como es mostrado en la figura 2.4, solo algunos aceros convencionales se están utilizando actualmente en la industria automotriz, descartándolos en este estudio y solo tomando los aceros avanzados de alta resistencia AHSS los cuales los clasificaremos por orden de aparición, entonces en este estudio la primera generación de los aceros avanzados de alta resistencia serán los doble fase y fase compleja, para la segunda generación se hará referencia a los aceros TRIP y martensíticos.

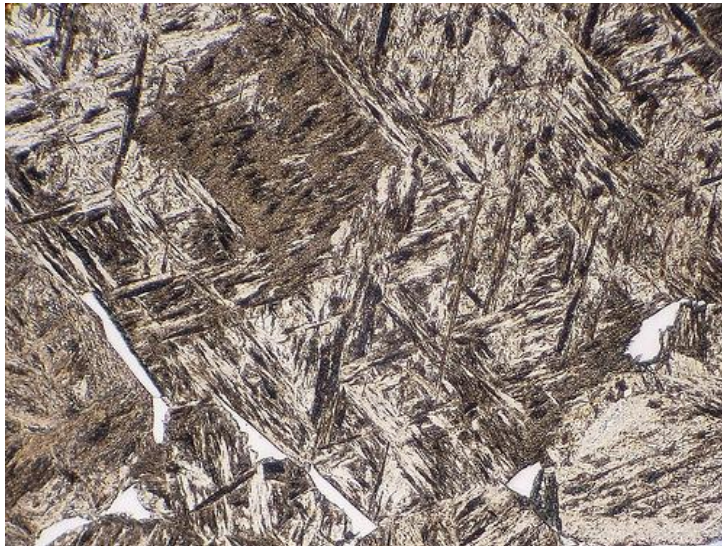
En los últimos capítulos de este estudio se hace referencia a la soldadura y soldabilidad de los aceros avanzados de alta resistencia AHSS, en este tópico se revisan los procesos de soldadura mayormente utilizados en la industria automotriz para unir aceros avanzados de tercera generación AHSS, como lo son GMAW, RSW, FSW, y láser, a lo que llamaremos soldadura y por ende también se revisaran las injerencias que estos procesos y sus variables tienen sobre las propiedades mecánicas de los aceros avanzados de tercera generación y como las nuevas características de estos aceros repercuten en la soldabilidad de los mismos.

## 2.2 MICROESTRUCTURA DE LOS ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA AHSS TERCERA GENERACIÓN

Los aceros HSS convencionales son endurecidos por solución sólida, precipitación o refinamiento de grano, mientras que los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) son endurecidos por la transformación de fases, y la microestructura de éstos puede incluir martensita, bainita y austenita retenida. Ver figuras 2.5 Y 2.6.



**Figura 2.5.** Microestructura de Martensita y Austenita retenida 100X. [1]



**Figura 2.6.** Microestructura de Bainita 100X. [1]

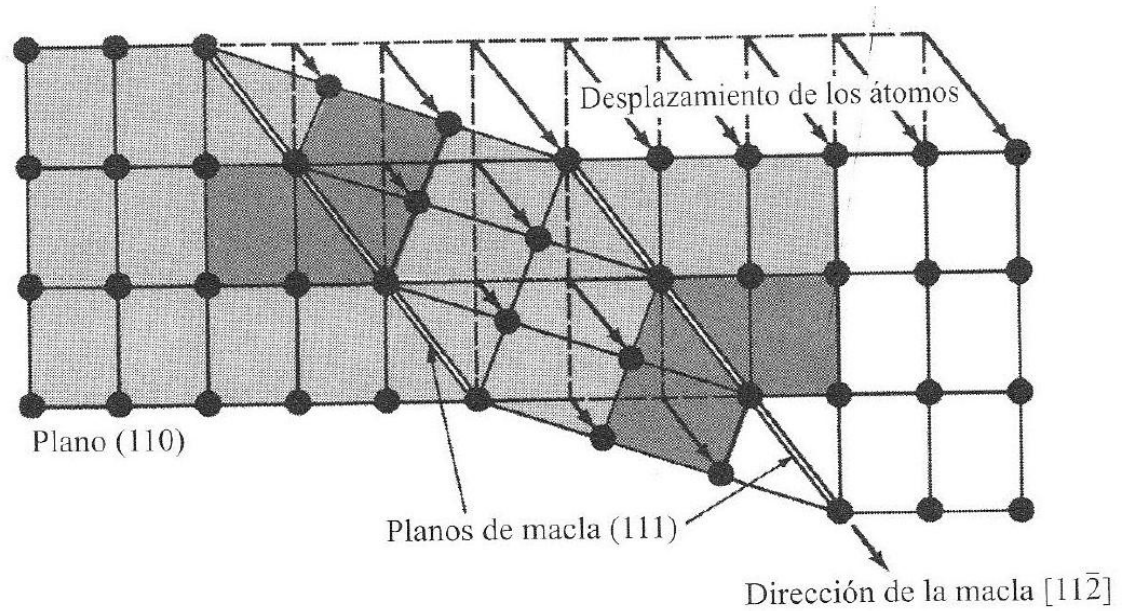
En comparación con los tradicionales HSS, los aceros AHSS muestran una combinación superior en cuanto a resistencia y ductilidad, lo que facilita la absorción de energía durante el impacto y garantiza la seguridad cuando se reduce el peso. La fabricación de los aceros avanzados es un poco más compleja que la de los aceros convencionales, por ejemplo, el control en la fabricación debe ser más riguroso debido a que los porcentajes de fases son controlados de manera estricta para poder mantener las propiedades de este

tipo de aceros. Dentro de esta clasificación nos encontramos con los aceros avanzados de alta resistencia AHSS, primera, segunda y tercera generación. [5]

### 2.2.1 MACLAS Y DESLIZAMIENTOS

La deformación de los cristales metálicos ocurre mediante dos mecanismos básicos: el deslizamiento y el maclaje; en el primero la deformación ocurre por el deslizamiento entre planos cristalográficos de un cristal mediante el movimiento de las dislocaciones, mientras que en el maclaje la deformación sólo ocurre en una zona del cristal, producto del desplazamiento tangencial entre dos regiones del mismo. La región maclada corresponde a aquella zona del cristal que sufre la deformación de la red cristalina por la ocurrencia del maclaje. Una diferencia importante entre el deslizamiento y el maclaje radica en que este último presenta una mayor distorsión de la red cristalina, aunque el porcentaje de deformación global del cristal sea mucho menor. En las fases metálicas con estructura cúbica de cuerpo centrado como la ferrita, las maclas a temperatura ambiente se producen a altas tasas de aplicación de la carga (cargas tipo impacto), mientras que bajo cargas estáticas el mecanismo preferente de deformación es el deslizamiento. Una de las razones por las cuales el deslizamiento no predomina sobre el maclaje bajo carga dinámica radica en que éste último se puede formar en fracciones de tiempo muy cortas, y que pueden estar en el orden de los microsegundos (tiempo aproximado de formación de los cráteres), mientras que la formación de la estructura escalonada producto del deslizamiento puede demorar varias milésimas de segundo. Entonces se puede decir que:

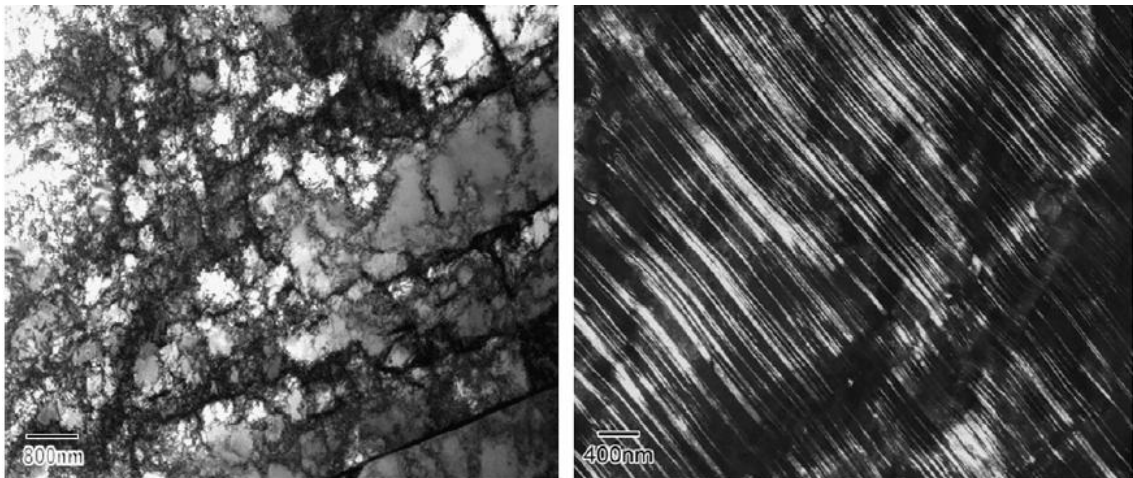
- El maclado es el segundo mecanismo de deformación plástica.
- En el cual se crea una imagen especular de la red no deformada. ver figura 2.7.



**Figura 2.7.** Macla. [17]

- Ocurre en una dirección específica llamada dirección de maclado.
- Los átomos se mueven a distancias proporcionales a su distancia al plano de maclado.
- La macla cambia la dirección de la red lo cual puede causar nuevos sistemas de deslizamiento.

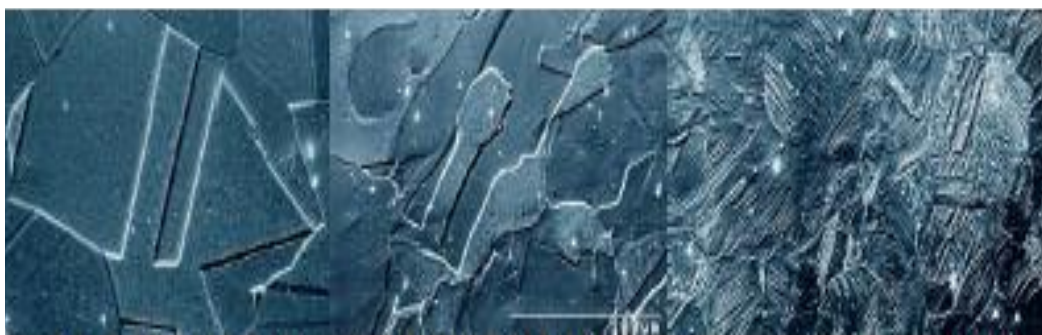
En la figura 2.8 a y b se muestra la diferencia entre deslizamiento y maclado.



**Figura 2.8.** Diferencia entre deslizamiento y macla. [17].

## 2.2.2 MICROESTRUCTURA DE ACEROS TWIP

Los aceros TWIP tienen altos contenidos de manganeso (15- 24%) lo que provoca que el acero sea completamente austenítico a temperatura ambiente. Lo cual conlleva a que el principal modo de deformación sea el maclaje dentro de los granos, el cual causa un alto valor de endurecimiento instantáneo ( $n$ ) de 0.4, conforme la microestructura se hace cada vez más fina, los límites de macla resultantes actúan como límites de grano y endurecen el acero. Ver figura 2.9.



**Figura 2.9.** Microestructura aceros TWIP 500X. [7]

Los aceros TWIP tienen una resistencia extremadamente alta y una formabilidad también extremadamente alta. El valor de  $n$  alcanza hasta 0.4 a una deformación ingenieril aproximada de 30% y es constante hasta una elongación de alrededor de 50%, con resistencia a la tensión es mayor a 1000 MPa. [7]

El comienzo de esta revisión, se destacó el aumento significativo de la actividad de investigación dedicada a aceros con alto contenido de manganeso TWIP ocurrido durante los últimos cinco años, motivada por la combinación de avance de la resistencia y ductilidad que poseen estas aleaciones. Dando como resultado la obtención de muy buenos mecanismos de plasticidad, endurecimiento por deformación, elasticidad, textura, fractura y resistencia a la fatiga. Este resumen explica por qué la metalurgia de los aceros TWIP es actualmente un tema de gran interés práctico y la importancia fundamental.

Como no existe un estándar para la definición de FeMnC aceros TWIP con respecto a la composición química, esta cuestión puede ser discutida a la luz de la presente revisión. La combinación de carbono y manganeso es necesaria para suprimir la tensión inducida por martensita. Sin embargo:

-Aceros con contenido de carbono superior al 1,2% en peso, no son útiles debido a la precipitación de cementita en la austenita.

-Sin carbono, el contenido de manganeso debe ser superior a 30% en peso que sólo se deslizan. Por lo tanto, es razonable proponer que los aceros TWIP Fe-Mn-C debe exhibir una combinación entre el carbono y manganeso, son:

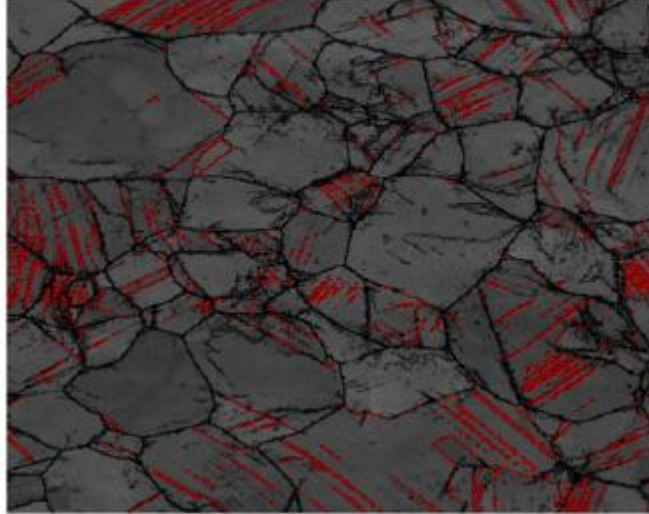
-Un límite máximo de contenido de carbono igual a 1,2% en peso,

- Un límite máximo de contenido de manganeso de entre 30 y 35% en peso.

La producción de acero consume 93% de la producción de manganeso total. Los aceros de bajo carbono y HSLA representan el 94% de la producción y utilizan el 72% del manganeso. También está demostrado que los aceros al alto manganeso representa sólo el 4,5% de la producción de acero, sino que utilizan el 23% del manganeso. Las perspectivas del mercado predicen un crecimiento del 8% para los aceros con alto contenido de manganeso en comparación con el 6% para los aceros de bajo carbono en el año 2015[13]. Estos aspectos deben ser tenidos en cuenta para evaluar la disponibilidad de materia prima (aleaciones de hierro). Finalmente, a pesar de la valiosa labor realizada en aceros TWIP hasta ahora hay muchos retos estimulantes y necesarios de espera en un futuro próximo a fin de mantener la calidad y el dinamismo en este campo de interés. Este estado de la cuestión muestra que los esfuerzos deben ser hechos especialmente con el fin de tener:

-Un análisis más profundo de los efectos de carbono en el endurecimiento por deformación que parece mejorar la eficiencia de las maclas como los obstáculos a las dislocaciones de deslizamiento, pero sin una explicación clara.

-En el ámbito de la fractura, la corrosión bajo tensión y fractura retrasada por el hidrógeno tiene que ser abordado. A pesar de que este problema es común en todos los materiales metálicos con muy alta resistencia. [4]

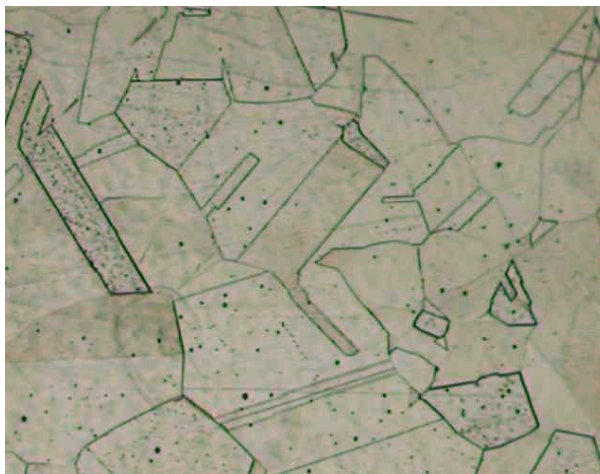


**Figura 2.10.** Microestructura aceros TWIP con límites de maclas (líneas rojas) 500X. [4]

### 2.2.3 MICROESTRUCTURA DE ACEROS AUSTENÍTICOS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable austeníticos no tienen propiedades magnéticas y tampoco pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Tiene alta ductibilidad y presentan excelente soldabilidad. El más popular es el Tipo 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con una cantidad de carbono limitado a un máximo de 0,08%. Es ampliamente utilizado en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, arquitectura, alimenticia, y de transporte. Además es utilizado en la elaboración de cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones [16].





**Figura 2.11.** Microestructura de acero austenítico inoxidable 304 500X. [10]

En algunos ambientes, especialmente en aquellos que contienen iones de cloruro, el inoxidable 304 muestra propensión a una forma de corrosión llamada corrosión por picado (pitting).

Este tipo de corrosión es extraordinariamente localizada, en ella existen determinados puntos de la superficie del material, el medio ambiente agresivo consigue quebrar la película pasiva para posteriormente progresar en profundidad.

El desarrollo de los picados es un proceso auto catalítico y aunque la pérdida de masa pueda ser a veces insignificante, esta forma de corrosión es muy insidiosa, ya que muchas veces un picado es suficiente para dejar un equipo seriamente dañado e inservible.

Otra forma de corrosión son las hendiduras, esta forma de corrosión puede ser considerada como una corrosión por picado artificial. Debido a que es muy semejante a la corrosión por picado y el proceso de crecimiento es también auto catalítico.

Aún así, la presencia de una hendidura es necesaria para la ocurrencia del fenómeno, lo que no sucede en la corrosión por picado. Los mismos medios capaces de provocar la corrosión por picado, promueven la corrosión por hendidura en los aceros inoxidables.

El molibdeno es introducido como elemento de aleación en los aceros inoxidable precisamente para disminuir la susceptibilidad a estas formas de corrosión. La presencia de molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente y en casos en que el inoxidable 304 no resiste a la acción de determinados ambientes, corroyendo por picado o por rendijas, los inoxidables 316 y 317 constituyen una excelente solución, los cuales son utilizados ampliamente en las industrias químicas, de alcohol, petroquímicas, de papel y celulosa, en la industria petrolífera, industrias textil y farmacéutica.

Cuando los aceros inoxidables austeníticos alcanzan las temperaturas de entre 450 y 850 °C sufren un fenómeno indeseable llamado sensibilización, debido a la formación de carburos de cromo en los límites de grano de la microestructura los cuales normalmente son del tipo  $M_3C_7$ ,  $M_7C_3$  y quizás hasta  $M_{23}C_6$ .

La sensibilización, deriva en la disminución del contenido de cromo en los bordes, los cuales drásticamente comprometen la resistencia a la corrosión, tornando el material susceptible a la corrosión intergranular en ciertos ambientes.

Estas zonas térmicamente afectadas por procesos de soldadura son particularmente sensibles a esta forma de corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en el área crítica de temperaturas. La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidables austeníticos extra bajo carbono, 304L, 316L y 317L, en los cuales el contenido de carbono es controlado en un máximo de 0,03%, y así reduciendo la posibilidad de sensibilización.

Esta acción denominada estabilización tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio. Tanto el titanio como el niobio son

estabilizadores del carbono y los aceros inoxidable así obtenidos, el 321 y el 347 son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. El inoxidable 316 Ti es la versión estabilizada del tipo 316. Para aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900 °C, los aceros inoxidables estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono; notoriamente la resistencia a la corrosión por hendidura. En el inoxidable 304 L (20Cr-25Ni-4.5Mo-1.5Cu), la adición de elementos de aleación busca mejorar no sólo la resistencia a la corrosión por picadura sino también la resistencia a la corrosión en medios ácidos reductores. El elevado contenido de níquel mejora también el comportamiento frente a la corrosión bajo tensión.

En los casos en que se pretende una buena resistencia mecánica y no existe gran preocupación por la corrosión intergranular, los aceros inoxidables 304H y 316H, con cantidades de carbono en el rango de 0,04/0,10%, son recomendados.

También cuando existe una precipitación carburos de cromo, tan perjudicial bajo el punto de vista de la corrosión, se torna benéfica cuando lo que interesa son las propiedades mecánicas.

Incrementos considerables en las cantidades de cromo y níquel permiten elevar la temperatura de formación de cascarilla (escamado) de los aceros inoxidables austeníticos.

El inoxidable 304 es recomendado para trabajo al aire libre, a temperaturas inferiores a 925 °C en servicios continuos. En las mismas condiciones, el inoxidable 310, con cromo 24-26% y níquel 19-22%, es resistente a temperaturas de hasta 1150 °C. Es un material clasificado como acero inoxidable refractario. Grandes aumentos de níquel, llevan a las aleaciones Ni-Cr-Fe, donde el elemento con mayor presencia en el material ya no es el hierro sino el níquel.

Estos materiales no son conocidos como aceros inoxidable sino como aleaciones a base de níquel y presentan excelente resistencia a la corrosión en diversos medios a altas temperaturas en servicio.

La elevada cantidad de níquel da también garantía de una buena resistencia a la corrosión bajo tensión.

El acero inoxidable 304 es un material con una alta ductibilidad. Para casos de estampado extra profundo, un aumento en la cantidad de níquel permite mejorar todavía más la ductibilidad. Con esta finalidad fue desarrollado el tipo 305. Ligeras reducciones en la cantidad de níquel disminuyen la estabilidad de la austenita, permitiendo la aparición de martensita inducida por deformación en frío, obteniéndose así excelentes propiedades para aplicaciones estructurales.

El tipo 301, disponible en las versiones 1/4, 1/2, 3/4 de pulgada de espesor y extremadamente duro y con una amplia utilización en las industrias ferroviarias.

El tipo 303 resulta del aumento de la cantidad de azufre en el 304 con la intención de mejorar el maquinado. Pero ductibilidad y la resistencia a la corrosión son comprometidas por este aumento en la cantidad de azufre.

Los aceros de la serie 200, resultan de una substitución parcial de níquel por manganeso. Son utilizados en aplicaciones estructurales, presentando resistencia a la corrosión inferior al 301. [10]

## 2.3 PROCESOS DE SOLDADURA UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ PARA ACEROS AHSS

La soldadura es un proceso de manufactura en el cual se lleva a cabo la unión de dos o más materiales, usualmente metales o termoplásticos, esto es logrado por el proceso de fusión, en el cual las piezas son unidas fundiendo ambas y agregando un material de aporte fundido (también metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, cuando este material de aporte se solidifica se convierte en una unión fija.

La presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura. Esto es contrario con la soldadura blanda (*soldering*) y la soldadura fuerte (*brazing*), que implican la fundición de un material de bajo punto de fusión entre las piezas de metal base para que sean unidos, sin que estas sean fundidas.

Las tecnologías de unión normalmente utilizadas en la industria automotriz son procesos de soldadura por resistencia, fricción, fusión y difusión, procesos mecánicos y unión por bandas adhesivas. La unión por bandas adhesivas es normalmente utilizado para la unión de materiales compuestos, básicamente consiste en el uso de adhesivos epóxicos en forma de bandas. Los procesos mecánicos, como el ribeteado, tox, remachado, etc. son utilizados en la unión de metales disímiles o muy difíciles de soldar, como lo son aluminios, aceros galvanizados etc. La soldadura de difusión es básicamente utilizada en la unión de aleaciones de aluminio. Por último tenemos la soldadura por resistencia la cual es la más utilizada en la industria automotriz y el proceso de fricción que aún se puede decir que es un proceso nuevo tiene una gran aceptación también dentro de la industria automotriz.

Para efecto de este estudio solo se abordarán algunas tecnologías de unión por fusión y los procesos de soldadura por resistencia y fricción que son los que mayormente se utilizan para unir los aceros avanzados AHSS. La soldadura por fusión se divide en tres ramas, de gas, de arco y emisión de alta energía.

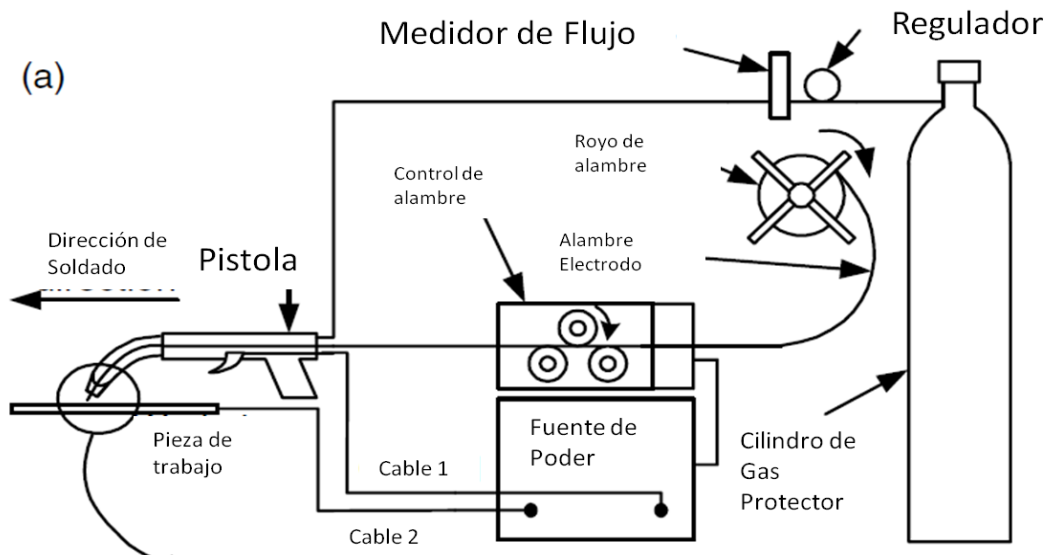
Dentro de la categoría de gas se tiene el proceso de soldadura oxiacetilénica. Dentro de la clasificación de arco se puede encontrar soldadura de arco de metal protegido (SMAW), gas tungsteno (GTAW), plasma (PAW), gas metal (GMAW), núcleo fundente (FCAW), sumergido (SAW), y electro escoria.

Y dentro de la soldadura por emisión de alta energía tenemos soldadura emisión de electrones (EBW), emisión de láser (LBW). Los procesos de soldadura por fusión comúnmente utilizados en la unión de aceros avanzados son GMAW, láser CO<sub>2</sub> y láser diodo.

### 2.3.1 Soldadura por arco Gas Metal GMAW

#### 2.3.1.1 Proceso de soldadura GMAW

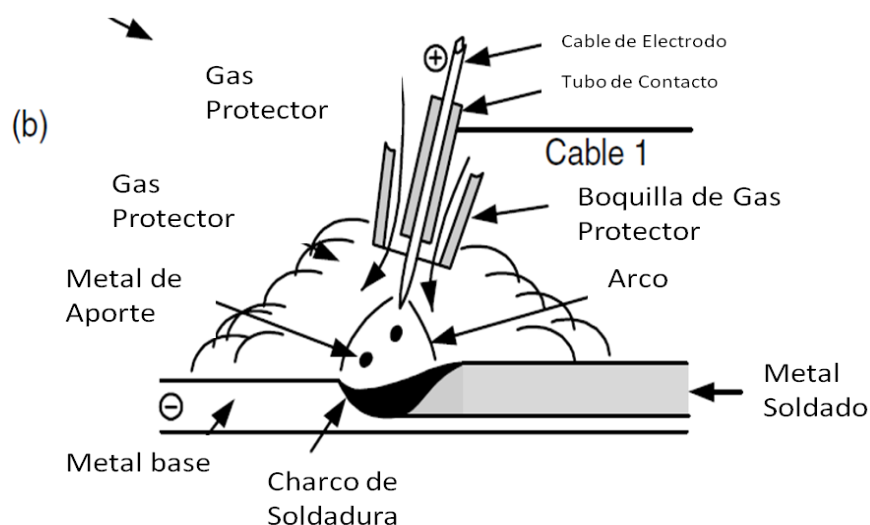
La soldadura de arco por gas metal, siglas en ingles (GMAW) o comercialmente conocida como (MIG), es un proceso que funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo de alambre hueco continuamente alimentado y las placas de metal. Ver Figura 2.12.



**Figura 2.12.** Equipo para el proceso de Soldadura GMAW. [6]

La protección del arco y el charco de soldadura se obtienen por el uso de gases inertes como el argón y el helio. Es por eso que también se la llama MIG metal

inert gas, como los gases no inertes también son utilizados como el  $\text{CO}_2$ , GMAW parece un nombre más apropiado. Ver Figura 2.13. [6]



**Figura 2.13.** Proceso de Soldadura GMAW. [6]

### 2.3.1.2 POLARIDAD DE ELECTRODOS

En el proceso de soldadura existen tres diferentes polaridades de electrodo;

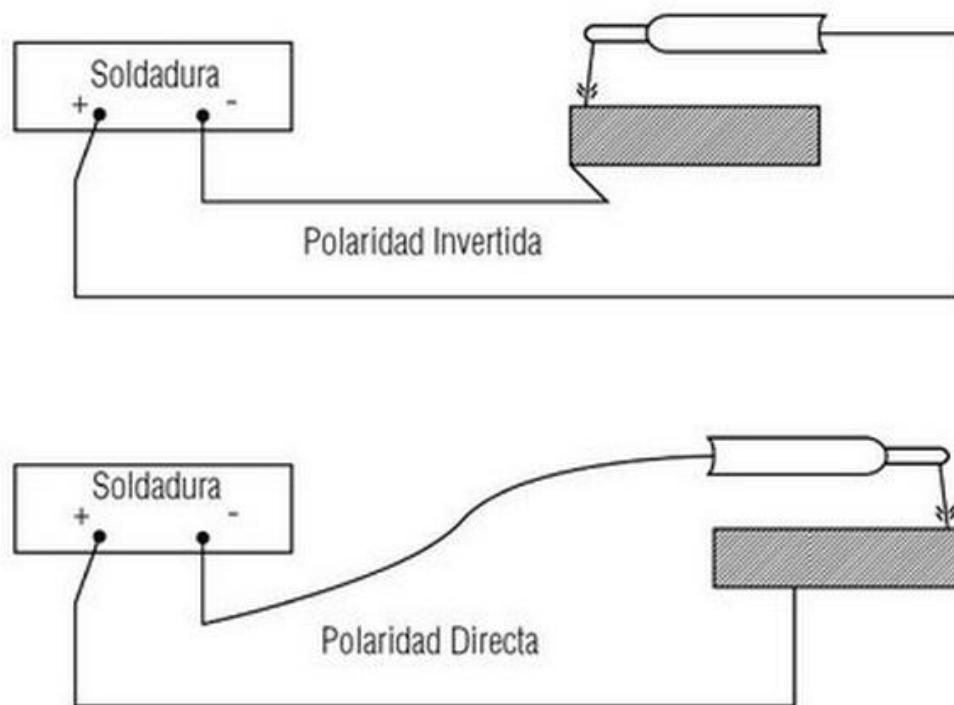
1. Negativo con corriente directa,
2. Positivo con corriente directa
3. Con corriente alterna.

El electrodo de corriente directa, también llamado de polaridad directa, es conectado a la polaridad negativa de la fuente de poder, los electrones son emitidos por el electrodo y acelerados mientras viajan a través del arco, una gran cantidad de energía llamada la función de trabajo, es requerida para que un electrón sea emitido del electrodo. Cuando un electrón entra a la pieza de trabajo una energía equivalente a la función de trabajo se libera, esto da como consecuencia una profunda soldadura.

El electrodo positivo de corriente directa, es también llamado de polaridad contraria, es conectado a la terminal positiva de la fuente de poder. El efecto de

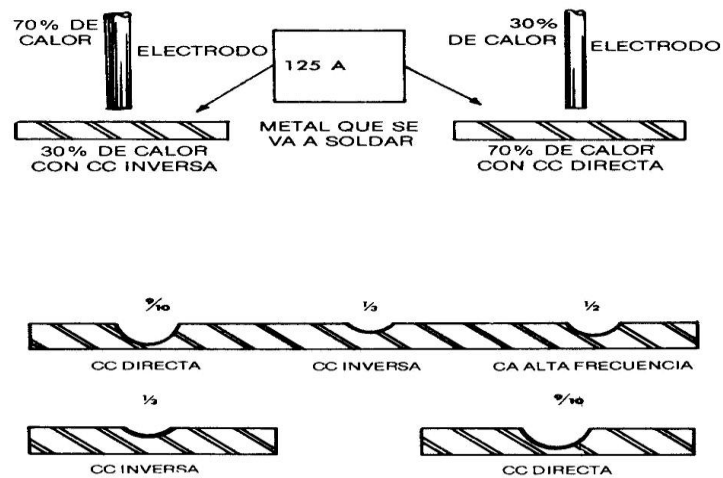
calentamiento de los electrones es más alto en el electrodo que en la pieza de trabajo. Consecuentemente se produce una soldadura poca profunda. Además los iones positivos del gas protector bombardean la pieza de trabajo, golpeando las pequeñas impurezas de oxígeno dejando una superficie limpia. Es por eso que este electrodo puede ser utilizado para soldar láminas muy delgadas de materiales que forman óxidos como aluminio y magnesio donde una penetración profunda no es requerida.

Y por último tenemos el electrodo de corriente alterna, una buena penetración y limpieza de óxidos pueden ser obtenidos al utilizar esta configuración como se muestra en la figuras 2.14 y 2.15, es comúnmente utilizado para soldar aleaciones de aluminio. [6]



**Figura 2.14.** Tipos de electrodos y corrientes utilizados en el proceso GMAW. [6]



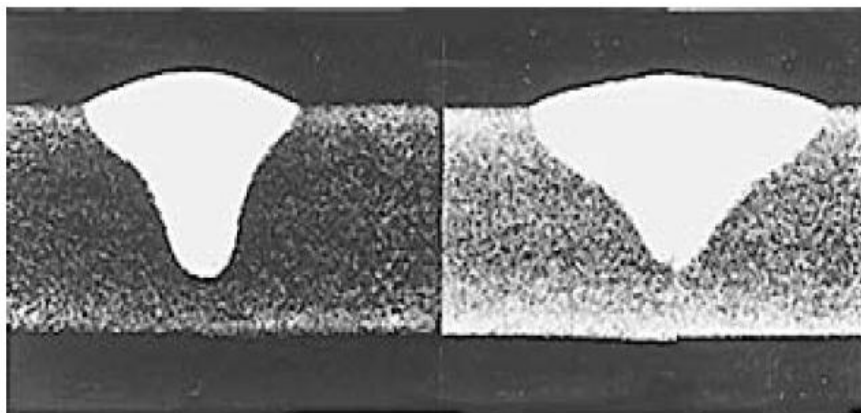


**Figura 2.15.** Tipos de electrodos y corrientes utilizados en el proceso GMAW. [8]

### 2.3.1.3 GASES PROTECTORES

El argón, helio y sus mezclas son usados para soldar metales no ferrosos como también aceros aleados o inoxidable. El arco de energía está menos disperso uniformemente en un arco de argón que en un arco de helio, debido a la baja conductividad térmica del argón. En consecuencia del plasma del arco de argón tiene un núcleo de alta energía y un manto exterior de menor energía térmica.

Esto ayuda a producir una transferencia axial estable de metal a través de goteo de un arco de plasma de argón. La sección transversal soldada resultante es usualmente caracterizada por un patrón de penetración tipo capilar como lo muestra la figura siguiente lado izquierdo. Figura 2.16. Con una protección pura de Helio una protección tipo parabólica es usualmente observada lado derecho.



**Figura 2.16.** Tipos de penetración dependiendo del gas protector utilizado en GMAW. [6]

Sin embargo con los metales ferrosos, la protección de helio puede producir salpicaduras y la protección de argón puede producir debilitamiento en las líneas de fusión, agregando  $O_2$  (alrededor del 3%) o dióxido de carbono  $CO_2$  al argón los problemas se reducen.

Los aceros al carbono y aceros de baja aleación son usualmente soldados con  $CO_2$  como gas protector. Desde que la protección de  $CO_2$  produce un alto nivel de salpicadura, un relativo bajo voltaje es usado para mantener un arco sumergido corto, para minimizar la salpicadura. Es así que la punta del electrodo esta usualmente por debajo de la superficie de la pieza de trabajo. Las ventajas de utilizar  $CO_2$  como gas protector son alta velocidad de soldado gran penetración y un bajo costo. Por último tenemos la figura 2.17 donde se muestran algunas mezclas de gases protectores y su aplicación. [6]

Gas protector	Acción química	Usos; observaciones
Argón (A)	Inerte	Para soldar la mayoría de metales, excepto acero.
Helio (He)	Inerte	En aleaciones de Al y Cu para máximo calor y minimizar la porosidad.
A y He (20-80 a 50-50%)	Inerte	Aleaciones de Al y Cu para mayor aplicación de calor y minimizar la porosidad. Arco más silencioso y estable que sólo con He.
A y Cl (huellas de Cl)	Esencialmente inerte	Todas las aleaciones, para minimizar la porosidad.
N <sub>2</sub>	Reductora	En el Cu, permite un arco muy potente; se usa más en Europa.
A + 25-30% N <sub>2</sub>	Reductora	En Cu, un arco más potente y suave, de control más fácil que sólo con N <sub>2</sub> ; se usa mucho en Europa.
A + 1-2% O <sub>2</sub>	Oxidante	Aceros inoxidable y de aleación; también para algunas aleaciones de cobre desoxidadas.
A + 3-5% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aceros al carbono, aleaciones de acero y acero inoxidable, se requiere electrodo desoxidado.
A + 20-30% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Diversos aceros; se usa principalmente con arco en corto circuito.
A + 5% O <sub>2</sub> + 15% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Diversos aceros; requiere electrodo desoxidado; se usa mucho en Europa.
Co <sub>2</sub>	Oxidante	Aceros al carbono y de baja aleación; el electrodo desoxidado es esencial.

Nota:

AL = aluminio; Cu = cobre; Ar = argón; Cl = cloro; N<sub>2</sub> = nitrógeno; He = helio; CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono; O<sub>2</sub> = oxígeno.

**Figura 2.17.** Mezclas de gases protectores y sus aplicaciones en el proceso GMAW. [8]

### 2.3.1.4 MODOS DE TRANSFERENCIA DE METAL

El metal fundido en la punta del electrodo puede ser transferido al charco de soldadura por tres modos básicos de transferencia. 1. Globular 2. spray 3. Corto circuito.

1.- TRANSFERENCIA GLOBULAR: Pequeñas gotas de metal, más cortas o más largas que el diámetro del electrodo, viajan a través del arco vacío bajo la influencia de la gravedad. En una transferencia globular con relativa corriente baja de soldado ocurre sin tener en cuenta el tipo de gas protector. Con el dióxido de carbono y helio, sin embargo eso ocurre en todos los tipos de soldadura. Ver figura 2.18 a.

2.- TRANSFERENCIA POR ESPREADO: por encima de un nivel de corriente crítico, pequeñas gotas de metal atraviesan el arco vacío, bajo la influencia de la fuerza electromagnética, con una velocidad o frecuencia más alta que en el modo globular. La transferencia de metal es mucho más estable y libre de salpicaduras o rocío. El nivel crítico de corriente depende del metal, tamaño del electrodo y la composición del gas de protección. Ver figura 2.18 b.

3.- TRANSFERENCIA POR CORTO CIRCUITO: El metal fundido de la punta del electrodo es transferido de la punta del electrodo al charco de soldadura cuando la punta toca la superficie del charco, esto es cuando el corto circuito ocurre. La transferencia por corto circuito abarca la corriente de soldadura más baja y el diámetro de electrodo más delgado. Esto produce un pequeño charco de soldadura que se enfría muy rápido que es deseable para soldar secciones muy delgadas, soldaduras fuera de posición, como cuando no están al ras las piezas, o aperturas de raíz muy largas. [6]

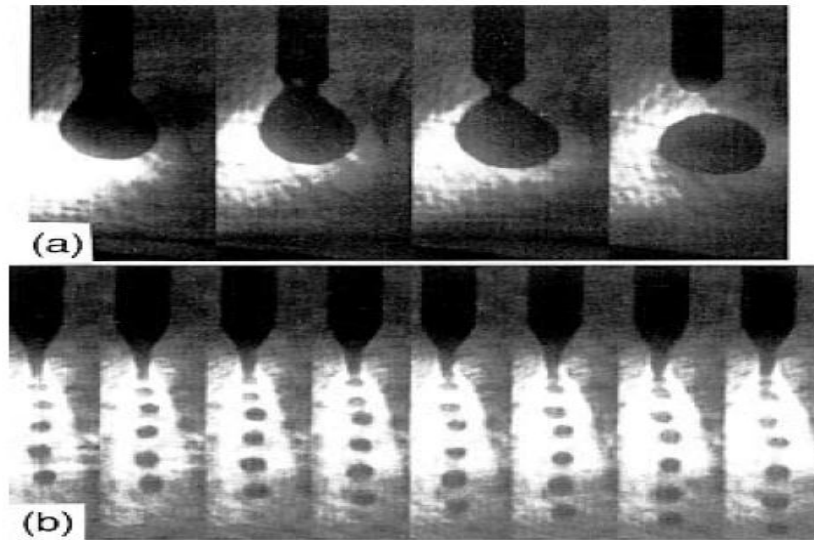
4.- TRANSFERENCIA POR PULSADO: Las limitaciones de la transferencia por spray en cuanto al espesor del trabajo y la posición de soldadura se han superado en gran medida mediante el empleo de fuentes de potencia de diseño especial. Estas máquinas producen formas de onda y frecuencias cuidadosamente controladas que "pulsan" la corriente de soldadura.

Estas maquinas suministran dos niveles de corriente; una corriente de fondo baja y constante que mantiene el arco sin proporcionar energía suficiente para hacer que se formen gotas en la punta del alambre, y una corriente a pulsos superpuesta cuya amplitud es mayor que la corriente de transición necesaria para la transferencia por aspersion. Durante este pulso, se forman y transfieren una o más gotas. La frecuencia y amplitud de los pulsos controlan el nivel de energía del arco, y por tanto la rapidez con que se funde el alambre.

Al reducir la energía media del arco y la rapidez de fusión del alambre, los pulsos permiten aprovechar las características deseables de la transferencia por aspersion en la soldadura de láminas y de metales gruesos en cualquier posición.

Existen muchas variaciones de estas fuentes de potencia. Las más sencillas producen pulsos de una sola frecuencia (60 o 120 pps) con control independiente de los niveles de corriente de fondo y de pulso. Las fuentes de potencia más avanzadas, a veces llamadas sinérgicas, proporcionan

automáticamente la combinación de corriente de fondo y de pulso apropiada para la velocidad de alimentación del alambre escogida. [6]



**Figura 2.18.** Tipos de transferencia de metal utilizados en el proceso GMAW A globular B spreado. [6]

Cabe mencionar que los métodos de transferencia mayormente utilizados son el esreado y corto circuito. A continuación se muestra la figura 2.19 donde están las combinaciones de gases protectores con el método de transferencia y en qué metal base son utilizados comúnmente.

Metal	Transferencia globular/por aspersión <sup>b</sup> Electrodo de 1.6 mm (1/16 pulg) de diámetro					Transferencia en cortocircuito Electrodo de diámetro			
	Argón	Helio	25% Ar- 75% He	Ar-O <sub>2</sub> (1-5% O <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub>	Argón	Ar-O <sub>2</sub> (1-5% O <sub>2</sub> )	75% Ar- 25% CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Aluminio	25	30	29	—	—	19	—	—	—
Magnesio	26	—	28	—	—	16	—	—	—
Acero al carbono	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	—	—	26	—	28	19	21	—
Níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación cupro-níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación níquel-cromo-hierro	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Cobre	30	36	33	—	—	24	22	—	—
Aleación cobre-níquel	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce de silicio	28	32	30	28	—	23	—	—	—
Bronce de aluminio	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce fosforado	28	32	30	23	—	23	—	—	—

a. Más o menos aproximadamente 10%. Los voltajes bajos normalmente se usan con materiales ligeros y bajo amperaje; los voltajes altos se usan con materiales pesados y alto amperaje.

b. En la variación a pulsos de la transferencia por aspersión, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

**Figura 2.19.** Metales con sus modos de transferencia de metal y mezcla de gases para su unión por el proceso GMAW. [8]

### 2.3.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO GMAW

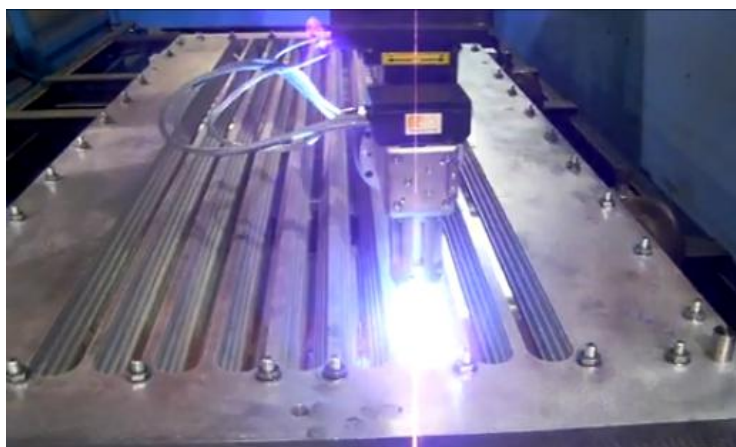
- El proceso de GMAW es muy limpio debido al uso del gas inerte protector.
- Tiene un alto valor de profundidad, lo cual le permite que piezas muy delgadas sean soldadas a altas velocidades.
- El proceso de doble antorcha incrementa la cantidad de aporte del proceso GMAW.
- La habilidad para mantener un corto y estable arco no es requerida.
- Sin embargo las pistolas de GMAW pueden ser voluminosas lo que hace difícil maniobrarlas en pequeñas áreas o esquinas. [6]

### 2.3.2 PROCESO DE SOLDADURA LÁSER (LBW)

Un láser es un mecanismo que emite un haz coherente concentrado el cual promueve transiciones electrónicas o moleculares a niveles de energía inferiores.

Se denomina láser por sus siglas en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. El láser sencillamente transforma energía de una fuente primaria de poder la cual puede ser eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear, en un haz de radiación electromagnética con una frecuencia específica ya sea ultravioleta, visible o infrarroja.

El procesos de soldadura con rayo láser (Laser Beam Welding), LBW siglas en inglés) es un proceso de unión por fusión que produce la coalescencia de materiales gracias al calor emitido de un haz concentrado de luz coherente monocromática que incide sobre la unión que se va a soldar, Ver figura 2.20.



**Figura 2.20.** Proceso de soldadura láser. [7]

#### 2.3.2.1 LÁSER CO<sub>2</sub> Y LÁSER DE GRANATE DE ITRIO Y ALUMINIO CONTAMINADO CON NEODIMIO (YAG)

Los dos tipos de láser primordialmente utilizados para la industria de la soldadura son el láser CO<sub>2</sub> y láser Yac.

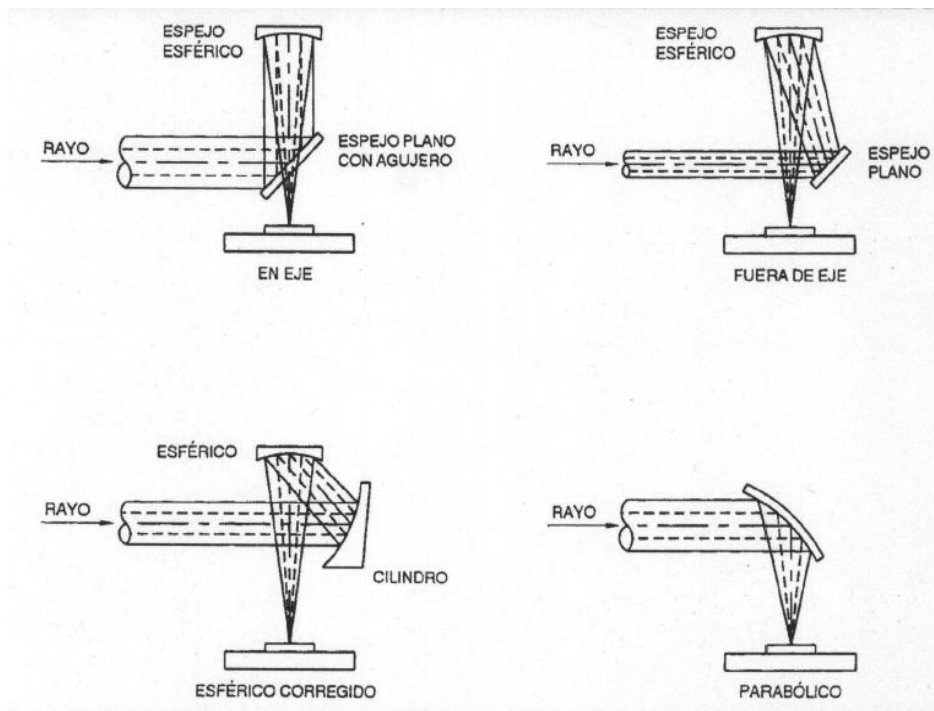
### 2.3.2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO LASER CO<sub>2</sub>

- Poco aporte de calor, ZAC mínimas y mínima distorsión.
- No se requieren electrodos, la soldadura queda libre de contaminación por electrodos, es un proceso sin contacto.
- Los rayos láser se enfocan, alinean y dirigen fácilmente con elementos ópticos, para soldar áreas de difícil acceso.
- La pieza puede soldarse en una cámara de vacío o de atmosfera controlada.
- El rayo láser puede enfocarse en un área pequeña, lo que permite unir componentes pequeños.
- Es posible soldar una amplia variedad de materiales incluidas diversas combinaciones de materiales de diferentes tipos.
- El láser se puede mecanizar con facilidad para soldadura automatizada de alta velocidad.
- Se pueden lograr relaciones (profundidad / ancho) del orden de 10:1.
- El rayo puede transmitirse a más de una estación de trabajo empleando óptica de conmutación del rayo lo que permite compartir el tiempo del rayo.
- Por otra parte las uniones deben colocarse lateralmente con mucha exactitud bajo el rayo y en una posición controlada respecto al punto de foco del rayo.
- Los mecanismo de sujeción deben garantizar que la posición final de la unión este alineada exactamente con el punto de incidencia del haz.
- El espesor máximo de una unión que puede soldarse con un rayo láser es de 19 mm como máximo para aplicaciones en producción.
- La elevada reflectividad y conductividad térmica de algunos materiales, como las aleaciones de aluminio y de cobre pueden afectar su soldabilidad con láser.
- Los láseres tienen eficiencias de conversión de energía bastante bajas, generalmente por debajo del 10%.



### 2.3.2.3 FOCALIZACIÓN Y EMISIÓN

Los rayos láser deben enfocarse a un punto de diámetro pequeño a fin de producir la elevada densidad de potencia requerida para soldar. Esto se logra con óptica transmisora (lentes) o reflejante (espejos) la distancia focal práctica más corta que puede usarse para soldar con un láser de CO<sub>2</sub>, es de aproximadamente 125 mm, los sistemas láser de estado sólido de baja potencia por lo regular utilizan óptica de transmisión (lentes) para enfocar el rayo sobre la pieza de trabajo, en tanto que los láseres de gas de mayor potencia generalmente emplean óptica reflejante (espejos) para este fin. Ver figura 2.21.



**Figura 2.21.** Tipos de focalización para soldadura Laser. [21]

### 2.3.2.4 EQUIPO

El láser de gas de descarga eléctrica de alta potencia (esto es, de 6 Kw o más) generalmente incluyen tres subunidades básicas: la cavidad óptica, el circuito de flujo de gas y el sistema de descarga eléctrica, que incluye la fuente de potencia y los electrodos. La cavidad óptica por lo regular se forma colocando de manera precisa espejos metálicos enfriados por agua con radios de curvatura y espaciamientos específicos que determinan el modo del rayo. Los espejos se montan en una armadura o en una estructura similar diseñada para distorsionarse lo menos posible con las variaciones de temperatura. El volumen que abarca la cavidad óptica normalmente se mantiene a presión reducida.

Un sistema típico podría operar a un décimo de atmósfera. El circuito de flujo del gas contiene el gas del láser, constituido aproximadamente por 95 % de helio y nitrógeno y 5 % de dióxido de carbono. El gas se impulsa por el circuito cerrado mediante una gran bomba de aspas axiales. El gas se excita eléctricamente en la cavidad de láser, donde se produce la potencia óptica; la energía no aprovechada, en forma de calor, se elimina a través de un intercambiador de calor gas-agua situado inmediatamente corriente abajo de la cavidad de láser, y el gas se recircula para ser excitado eléctricamente otra vez.

El sistema de descarga eléctrica contiene una fuente de potencia de ca, cc o rf (radiofrecuencia) conectada a una serie de electrodos para excitar el gas en todo el volumen de la cavidad de láser. A veces se colocan resistores estabilizadores para que la descarga eléctrica sea más uniforme cuando se desea producir un rayo láser de onda continua. Además de lo anterior, los láseres industriales de alta potencia emplean muchos sistemas auxiliares, casi siempre controlados por un control numérico computarizado (CNC) cuyo fin es que el sistema opere con rapidez y facilidad.

Los sistemas de control automatizan el arranque y el funcionamiento del láser con un mínimo de funciones reguladas por el operador con el fin de que éste no

requiera demasiada capacitación. Entre los sistemas auxiliares que pueden encontrarse en un láser industrial están: un sistema de suministro de gas para alimentar al láser gases premezclados o en volúmenes discretos; un sistema de vacío para mantener la presión del láser en su nivel operativo o para evacuar la cavidad de láser cuando se requiere renovar la mezcla de gases; un suministro de agua para el intercambiador de calor y el enfriamiento de los espejos; una ventana sólida o aerodinámica para llevar el rayo de alta potencia de la cavidad de láser a presión reducida hasta el entorno de trabajo a presión atmosférica; medidores de potencia para vigilar la potencia del rayo, y un sistema de obturación del rayo que lo dirige a una estación de trabajo cuando el operador o los controles de CNC lo requieren.

### 2.3.2.5 CALIDAD DE LA SOLDADURA

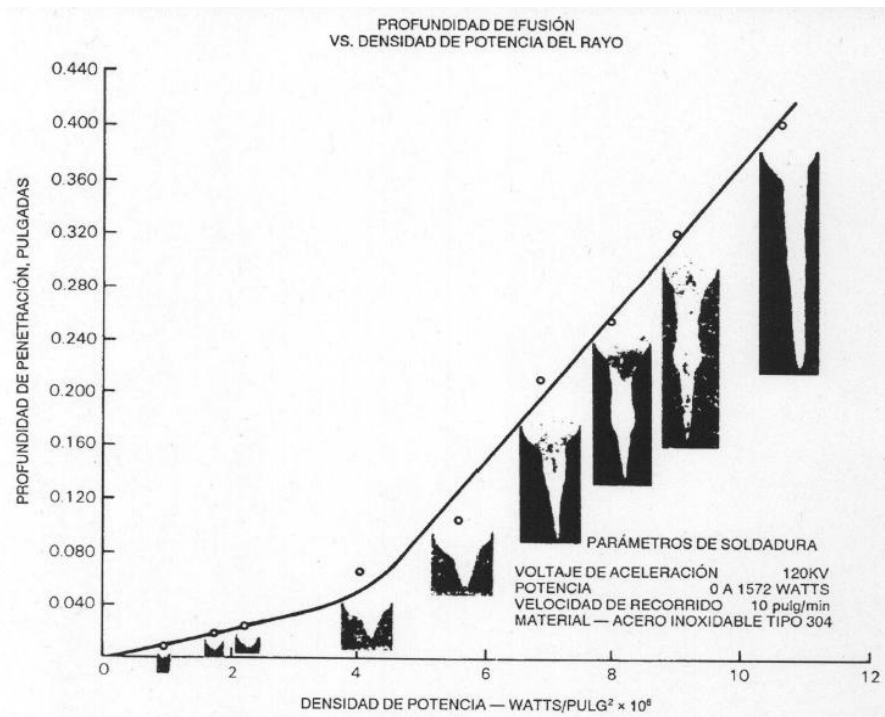
Al alcanzar densidades de potencia del orden de  $1.55 \times 10^6 \text{ W/mm}^2$  ( $1 \times 10^6 \text{ W/pul}^2$ ) o mayores, la soldadura con rayo de penetración profunda se logra mediante un mecanismo de transferencia de energía de key hole.

En este nivel de densidad de potencia, el aporte de energía del rayo incidente es tan intenso que no puede eliminarse por los procesos normales de conducción, convección o radiación. Por tanto, el área sobre la que incide el rayo se funde y vaporiza. En la figura 2.20 se muestran las densidades de potencia asociadas a la transición de la soldadura de conducción a la soldadura de key hole.

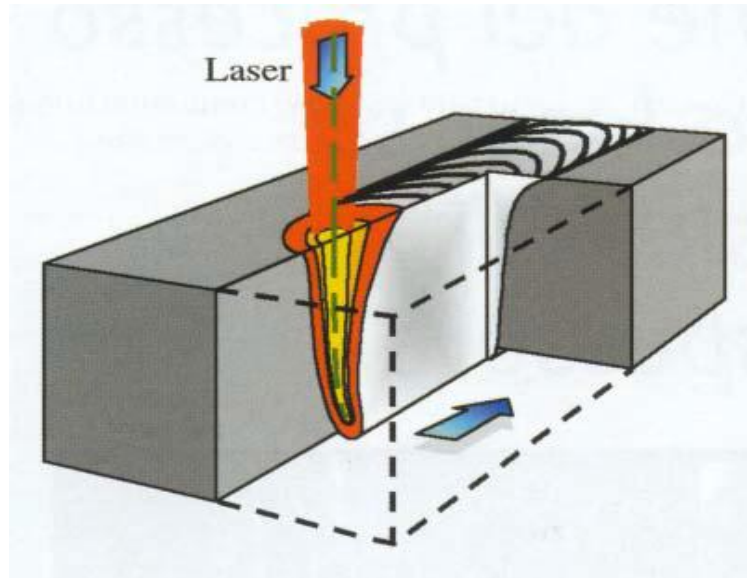
Este fenómeno de soldadura de key hole se presenta tanto en la técnica de rayo láser como en la de haz de electrones, lo que indica que fundamentalmente es una función de la densidad de potencia, y que no depende de la longitud de onda. Cuando el material en el punto de interacción se funde y vaporiza, la presión de reacción del vapor crea una cavidad profunda o "agujero calado", como se muestra en la figura 2.23. Este hoyo es una columna de vapor rodeada por un cilindro delgado de metal fundido. Cuando la

pieza de trabajo se mueve relativa al rayo, la presión de vapor del metal mantiene el key hole, y el metal fundido que lo rodea fluye en dirección opuesta a la dirección de soldado, solidificándose rápidamente y formando una zona angosta de fusión: la unión soldada.

Es posible obtener razones profundidad/anchura del orden de diez a uno cuando se usa el método de key hole para soldar con láser. La zona de fusión angosta, con razón profundidad/anchura alta, que se forma al soldar con láser a presión atmosférica es similar a la que se produce soldando con haz de electrones en el vacío.



**Figura 2.22.** Densidades de potencia asociadas a penetración. [21]



**Figura 2.23.** Método Hoyo calado. [21]

Algunos procesos de láser, están reduciendo la velocidad de soldado para lograr una soldadura más ancha gracias a efectos de conducción. Este método se aplica con frecuencia en aplicaciones de soldadura de láminas metálicas a tope en las que la tolerancia de embonamiento obliga a emplear velocidades de soldadura más bajas para asegurar la confiabilidad y repetitividad del proceso.

La soldadura con rayo láser es excelente para soldar secciones delgadas. Se ha soldado con éxito acero inoxidable con espesores tan bajos como 0.0025 mm (0.0001 pulg) empleando láseres a pulsos. Las máquinas soldadoras con láseres de Nd: YAG y de CO<sub>2</sub> pulsados son especialmente apropiadas para soldar secciones delgadas. [21]

### 2.3.2.6 APLICACIONES

La soldadura con rayo láser se está usando en una amplia variedad de aplicaciones, como en la producción de transmisiones automotrices y unidades de embrague de acondicionadores de aire. En esta última aplicación, la soldadura con láser permite emplear un diseño que de otro modo no podría fabricarse. El proceso se está usando también en la producción de relevadores y sus recipientes y para sellar dispositivos electrónicos y estuches de

marcapasos cardiacos. Otras aplicaciones son la soldadura continua de tubos de aluminio para ventanas térmicas y puertas de refrigeradores.

Entre las aplicaciones de la soldadura con láser que más éxito han tenido está la soldadura de componentes de transmisiones (como engranes de sincronización, engranes de impulso y cajas de embrague) para la industria automotriz. Estas soldaduras anulares y circunferenciales requieren rayos con potencia de entre 3 y 6 kw, dependiendo de la velocidad de soldadura empleada, y penetraciones que por lo regular no exceden los 3.2 mm (.125 pul).

Los materiales soldados son aceros al carbono o de aleación. En algunos casos, como los dientes de los engranes, se han endurecido selectivamente antes de soldar. La soldadura con rayo láser de tales ensambles tiene muchas ventajas. El bajo aporte de calor del láser no afecta las zonas preendurecidas adyacentes a la soldadura. Además, este bajo aporte de calor. Produce un mínimo de distorsión, lo que hace posible soldar estampados de precisión con las dimensiones finales.

La facilidad de automatización y la capacidad para soldar a alta velocidad hace al proceso con láser ideal para aplicaciones de producción de tipo automotriz, y en años recientes se han instalado muchos de estos sistemas en la industria del automóvil. [21]

### 2.3.2.7 METALES SOLDABLES

La soldadura con rayo láser puede unir casi cualquier metal consigo mismo, y también metales disímiles metalúrgicamente compatibles. Los aceros de bajo carbono se sueldan con facilidad, pero cuando el contenido de carbono excede el 0.25% la transformación martensítica puede dar pie a soldaduras quebradizas y agrietamiento.

La soldadura a pulsos ayuda a minimizar la tendencia al agrietamiento. Son preferibles los aceros total o parcialmente libres de porosidades, sobre todo

para aplicaciones estructurales, ya que las soldaduras en acero con canto pueden tener huecos. Los aceros con grandes cantidades de azufre y fósforo pueden ser propensos al agrietamiento en caliente durante la soldadura. Además, puede aparecer porosidad en aceros de maquinado libre que contienen azufre, selenio, cadmio o plomo.

Han surgido problemas al soldar aceros carburizados o nitrurados. Las soldaduras en estas aleaciones por lo general son porosas y presentan grietas. En ocasiones se añaden cuñas de níquel a estos metales y a algunas aleaciones de acero para aumentar la tenacidad. También se ha agregado aluminio en pequeñas cantidades a uniones de acero con canto para reducir la porosidad causada por los gases atrapados.

Muchos aceros inoxidable se consideran buenos candidatos para la soldadura con láser. La baja conductividad térmica de estos metales permite formar soldaduras más angostas y lograr penetraciones más profundas que en los aceros al carbono. El acero inoxidable de la serie 300, con excepción de los tipos 303 y 305C de maquinado libre y los tipos 321 y 347 estabilizados, son fácilmente soldables. Las soldaduras hechas en algunos de los aceros inoxidables de la serie 400 pueden ser quebradizas y requerir un recocido después de soldados. Muchas aleaciones resistentes al calor a base de níquel y hierro se están soldando con éxito empleando rayo láser.

Las aleaciones de titanio y otras aleaciones refractarias se pueden soldar con este método, pero siempre se requiere una atmósfera inerte para evitar la oxidación. El cobre y el latón a menudo se sueldan consigo mismos y con otros materiales empleando diseños de unión especializados para soldadura por conducción. El aluminio y sus aleaciones soldables se pueden unir *con* soldaduras de ensamble de penetración parcial y a menudo se unen con soldaduras de conducción a pulsos para producir empaques electrónicos herméticamente sellados.

Los diseños de las uniones deben mantener en tensión el aluminio. Los metales refractarios como el tungsteno a menudo se sueldan por conducción en ensambles electrónicos, pero requieren potencias mayores que otros materiales. El Kovar chapado con níquel se emplea con frecuencia en soldaduras para sellar componentes electrónicos, pero se debe tener especial cuidado para asegurarse de que el chapado no contenga fósforo, que suele encontrarse en el proceso de chapado de níquel sin electricidad ("electrolisis") comúnmente usado para piezas de Kovar que se sueldan por resistencia.

Las uniones de metales disímiles se encuentran a menudo en soldaduras de conducción en las que el trenzado de conductores forma un soporte metálico que minimiza la flexión de uniones que podrían ser quebradizas. En la soldadura de conductores es común unir metales disímiles con diferentes propiedades físicas (reflectividad, conductividad y punto de fusión). Se requieren técnicas especiales, como agregar vueltas adicionales de un material a la unión, a fin de equilibrar las características de fusión de los materiales. Algunos de estos conceptos pueden aplicarse también a soldaduras estructurales y de ensamble, pero las posibilidades son mucho más limitadas. [21]

### 2.3.3 PROCESO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA (RSW)

La soldadura por puntos (RSW) es un proceso de soldadura por resistencia que produce la unión de las superficies de contacto en un solo lugar por el calor obtenido de la resistencia a la corriente eléctrica a través de las partes de trabajo unidas bajo presión por medio de electrodos.

El tamaño y forma de las soldaduras de forma individual se forman principalmente limitado por el tamaño y el contorno de los electrodos. El equipo de soldadura por puntos puede ser relativamente simple y de bajo costo o también pueden ser múltiples máquinas muy grandes de soldadura por puntos.



Las máquinas estacionarias de soldadura por puntos solo existen de dos tipos: el de brazo de cuerno o de dirección y el de prensa.

Las máquinas de cuerno de un pivote o balanceo del brazo electrodo superior, que es accionada por energía neumática, pueden ser utilizados para una amplia gama de trabajos, pero están limitadas a 50 Kva y se utilizan para espesores más finos. Para máquinas más grandes normalmente más de 50Kva, el mecanismo de sujeción es una prensa. En estas máquinas, el electrodo superior se desplaza en un plano. La presión y el movimiento se proporcionan en el electrodo superior por la presión hidráulica o neumática.

Para el trabajo de producción de alto volumen, como en la industria automotriz, se emplean varias máquinas de soldadura por puntos. Estas son en forma de prensa las cuales son pistolas individuales en las cuales se montan los electrodos. Las soldaduras se hacen en un orden secuencial para que no todos los electrodos de conducción de corriente funcionen al mismo tiempo. [7]

### 2.3.3.1 PROCESO DE SOLDADURA RSW

Las operaciones de soldadura de puntos, de costura y de proyección implican la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica con las magnitudes y duraciones adecuadas.

La corriente de soldadura debe pasar entre los electrodos atravesando el trabajo, su continuidad se asegura mediante fuerzas aplicadas a los electrodos, o por proyecciones moldeadas para proveer la densidad de corriente y presión necesarias. La secuencia de operación debe, en primer lugar, generar suficiente calor para llevar un volumen confinado del metal al estado fundido. En seguida, se permite que este metal se enfríe bajo presión hasta que tenga la fuerza suficiente para mantener unidas las piezas. La densidad de corriente y la presión deben ser suficientes para formar un botón, pero no tan altas que el metal fundido sea expulsado de la zona de fusión. La duración de la corriente debe ser lo bastante corta como para evitar un calentamiento excesivo de las

caras de los electrodos, pues semejante calentamiento podría pegar los electrodos al trabajo y reducir considerablemente su vida útil.

El calor requerido para estos procesos de soldadura se produce por la resistencia que oponen las piezas de trabajo al paso de una corriente eléctrica por el material. Debido a lo relativamente corto del trayecto de la corriente eléctrica en el material y a lo limitado del tiempo de soldadura, se requieren corrientes relativamente altas para generar el calor necesario para la soldadura. [21]

### 2.3.3.2 DISTRIBUCIÓN DEL CALOR DURANTE EL PROCESO RSW

Una característica importante de la soldadura de resistencia es la rapidez con que puede producirse el calor para la soldadura. En la figura 2.24 se ilustra la distribución de temperatura en el trabajo y los electrodos, en el caso de la soldadura de puntos, de costura y de proyección.

En una soldadura hay por lo menos siete resistencias conectadas en serie que determinan la distribución de temperatura. En el caso de una unión de dos espesores, son las siguientes:

- (1) 1 y 7, la resistencia eléctrica del material del electrodo.
- (2) 2 y 6, la resistencia de contacto entre el electrodo y el metal base. La magnitud de esta resistencia depende de la condición superficial del metal base y del electrodo, del tamaño y el contorno de la cara del electrodo, y de la fuerza del electrodo. (La resistencia es aproximadamente inversamente proporcional a la fuerza de contacto.)

Éste es un punto de considerable generación de calor, pero la superficie del metal base no alcanza su temperatura de fusión durante el paso de la corriente debido a la elevada conductividad térmica de los electrodos (1 y 7) y al hecho de que por lo regular están enfriados por agua.

(3) 3 y 5, la resistencia total del metal base mismo, que es directamente proporcional a su resistividad y espesor, e inversamente proporcional al área de sección transversal del trayecto de corriente.

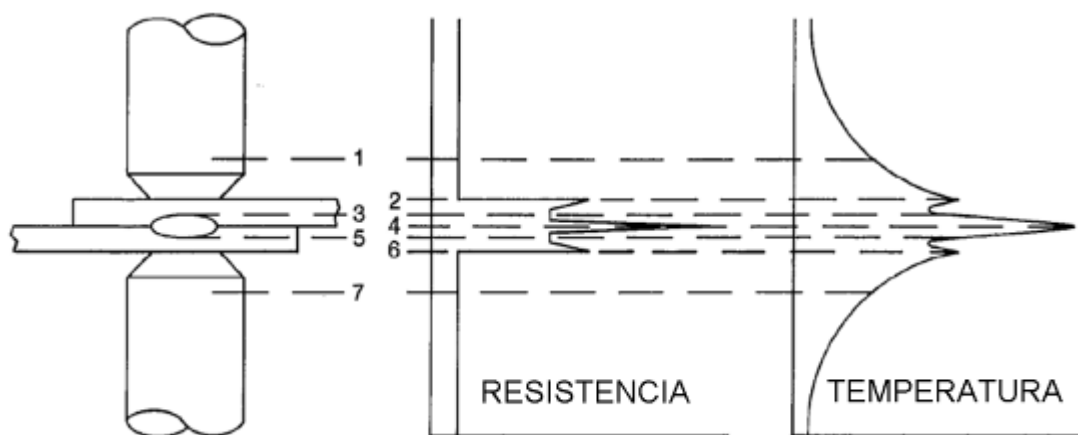
(4) 4, la resistencia de las caras internas del metal base en el punto donde se formará la soldadura. Éste es el punto de mayor resistencia y, por tanto, el punto donde se genera más calor. Puesto que también se genera calor en los puntos 2 y 6, el calor generado en las caras internas (punto 4) no tiende a fugarse a los electrodos. En todos estos puntos se genera calor, no sólo en las caras internas de los metales base.

El flujo de calor desde las caras internas de los metales base, o hacia ella, está regido por el gradiente de temperatura establecido por el calentamiento por resistencia de los diversos componentes del circuito. Esto a su vez promueve o retarda la creación del calor de soldadura localizado que se requiere. En cada uno de los siete lugares indicados en la figura 2.24 se genera calor en proporción a la resistencia de cada uno. Sin embargo, el calor de soldadura sólo se requiere en las caras internas de los metales base, y el calor generado en todos los demás sitios se debe reducir al mínimo.

Puesto que la resistencia más alta está en 4, el calor aparece con mayor rapidez en ese lugar. Los puntos que le siguen en resistencia son 2 y 6. La temperatura también se eleva rápidamente en estos puntos, pero no tanto como en 4. Después de transcurrido cerca del 20% del tiempo de soldadura, el gradiente de calor probablemente se ajuste al perfil que se muestra en la figura 2.22. El calor generado en 2 y 6 se disipa rápidamente hacia los electrodos adyacentes 1 y 7, enfriados por agua. El calor en 4 se disipa con mucha mayor lentitud hacia el metal base. Por tanto, mientras la corriente de soldadura continúe, la velocidad de elevación de la temperatura en el plano 4 será mucho más rápida que en 2 y 6.

La temperatura de soldadura se indica en el diagrama de la derecha de la figura 2.22 con el número de puntos dentro del dibujo que conducen a la curva correspondiente. En una soldadura bien controlada, la temperatura de soldado se alcanzará primero en numerosos contactos puntuales de las caras internas, que se fundirán y en poco tiempo crecerán formando un botón.

Los factores que afectan la cantidad de calor generado en la unión por una corriente dada para una unidad de tiempo de soldadura son (1) las resistencias eléctricas dentro del metal soldado y los electrodos, (2) las resistencias de contacto entre las piezas de trabajo y entre los electrodos y las piezas de trabajo y (3) la pérdida de calor hacia los electrodos y las piezas de trabajo. La distribución del calor en una soldadura por RSW se explicará a detalle en la figura 2.24. [8]



**Figura 2.24.** Distribución del calor en el proceso de soldadura RSW. [21]

### 2.3.3.3 CICLO DE SOLDADURA

El ciclo para la soldadura de puntos, consiste básicamente en cuatro fases: Ver figura 2.25.

(1) Tiempo de compresión-el intervalo de tiempo entre el arranque del cronómetro y la primera aplicación de corriente; este lapso es para asegurar

que los electrodos hagan contacto con el trabajo y ejerzan la fuerza máxima antes de aplicar la corriente de soldadura.

(2) Tiempo de soldadura - el tiempo durante el cual se aplica corriente de soldadura al trabajo cuando la soldadura es de un solo impulso.

(3) Tiempo de retención-el tiempo durante el cual se mantiene la fuerza aplicada al trabajo después del término del último impulso de corriente; durante este tiempo, la pepita de soldadura se solidifica y enfría hasta adquirir suficiente resistencia mecánica.

(4) Tiempo inactivo - el tiempo durante el cual los electrodos se despegan del trabajo y éste se desplaza hasta la siguiente posición de soldadura; este término generalmente se aplica cuando el ciclo de soldadura es repetitivo. En la figura siguiente se muestra un ciclo de soldadura básico. Se puede agregar una o más de las siguientes características a este ciclo básico para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la zona de soldadura:

(1) Fuerza de pre sujeción para asentar los electrodos contra las piezas de trabajo.

(2) Pre calentamiento para reducir el gradiente térmico en el metal en el inicio del ciclo de soldadura.

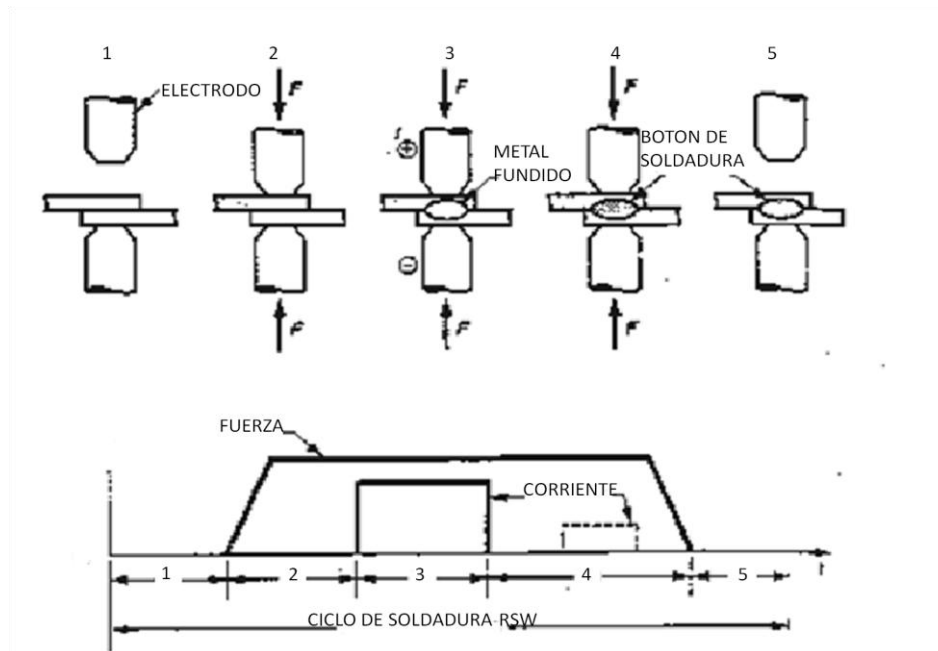
(3) Fuerza de forjado para consolidar el botón de soldadura.

(4) Tiempos de enfriamiento y templado para producir soldaduras con la resistencia mecánica deseada en aceros de aleación endurecibles.

(5) Post calentamiento para refinar el tamaño de grano de la soldadura en aceros.

(6) Decaimiento de corriente para retardar el enfriamiento en aluminio.

En algunas aplicaciones, la corriente de soldadura se alimenta intermitentemente durante un intervalo de soldadura; está encendida durante el tiempo de calentamiento y se interrumpe durante el tiempo de enfriamiento. [21]



**Figura 2.25.** Ciclo para soldadura de puntos. [21]

#### 2.3.3.4 EQUIPO

El equipo de soldadura de puntos, consiste en tres elementos básicos: un circuito eléctrico, el equipo de control y un sistema mecánico. El circuito comprende un transformador de soldadura, un contacto primario y un circuito secundario. El circuito secundario incluye los electrodos que conducen la corriente de soldadura al trabajo, y el trabajo mismo. En algunos casos, el circuito también incluye alguna forma de almacenar energía eléctrica. Para la soldadura de resistencia se emplea tanto corriente alterna como corriente continua. La máquina soldadora convierte la potencia de línea de 60 hz en potencia de bajo voltaje y alto amperaje en su circuito secundario.

Los controles de soldadura pueden tener una o más de las siguientes funciones principales:

- (1) Iniciar e interrumpir el suministro de corriente al transformador de soldadura.
- (2) Controlar la magnitud de la corriente.
- (3) Accionar y liberar los mecanismos de fuerza de los electrodos en el momento apropiado.

Estos controles pueden dividirse en tres grupos con base en sus funciones: Contactores de soldadura, controles de cronometría y secuencia, y otros controles y reguladores de corriente.

Un contactor de soldadura conecta y desconecta la potencia primaria y el transformador de soldadura. Los contactores emplean rectificadores controlados por silicio (scr), tubos ignición o tubos tiratrón para interrumpir la corriente primaria.

El control de cronometría y secuencia establece la secuencia de soldadura y la duración de cada una de las funciones de la secuencia. Esto incluye la aplicación de fuerza de los electrodos y de corriente, así como los intervalos de tiempo después de cada función.

La salida de corriente de soldadura de una máquina se controla mediante derivaciones del transformador, un control de calor electrónico, o ambas cosas. El control de calor electrónico se usa en combinación con los tubos ignición o los scr; controla la corriente retrasando el disparo de los tubos ignición o los scr durante cada medio ciclo ( $1/120$  s). La variación del tiempo de retraso del disparo sirve para aumentar o reducir gradualmente el amperaje primario (mis). Esto permite controlar la corriente de soldadura con pendiente positiva y negativa. Las derivaciones del transformador sirven para modificar el número de vueltas del devanado primario que se conectan a la línea de potencia de ca. Esto altera la razón de vueltas del transformador, aumentando o reduciendo el voltaje de circuito abierto del secundario.

Una reducción de la razón de vueltas aumenta el voltaje de circuito abierto del secundario, la corriente primaria y la corriente de soldadura. La operación mecánica de las máquinas de soldadura de puntos, de costura y de proyección es esencialmente la misma. Los electrodos se acercan al trabajo y retroceden a intervalos y con velocidades controlados.

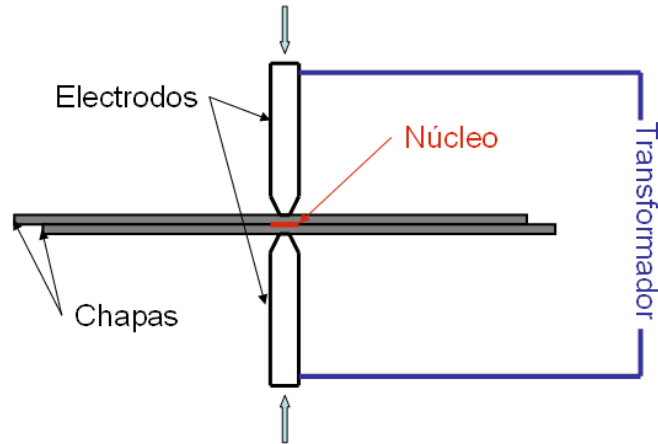
La fuerza de los electrodos se aplica mediante mecanismos hidráulicos, neumáticos, magnéticos o mecánicos. La velocidad de aproximación de los electrodos debe ser alta pero controlada, de modo que las caras de los electrodos no se deformen por los constantes golpes.

El metal de soldadura, calentado localmente, se expande y contrae rápidamente durante el ciclo de soldadura y los electrodos deben seguir este movimiento para mantener la presión de soldadura y el contacto eléctrico. La capacidad de la máquina para seguir el movimiento varía dependiendo de la masa de las partes móviles, o de su inercia, y de la fricción entre las partes móviles y el armazón de la máquina.

Si la presión entre los electrodos y el trabajo decae con rapidez durante el tiempo de soldadura, las superficies de contacto de los electrodos y las piezas de trabajo pueden sobrecalentarse y quemar las caras de los electrodos o hacerles pequeños agujeros. Puede suceder que los electrodos se peguen al trabajo y, en algunos casos, las superficies de las piezas que se están soldando pueden vaporizarse debido a las energías tan altas. La fuerza de electrodos que se aplica durante la fusión del botón de soldadura puede ser insuficiente para consolidar el metal de la soldadura para evitar la porosidad y el agrietamiento internos.

Existen máquinas con múltiples niveles de fuerza que pueden aplicar una presión de forjado elevada durante la solidificación de la soldadura. La magnitud de esta presión debe adecuarse a la composición y el espesor del metal y a la geometría de las piezas. La presión de forjado a menudo es de dos a tres veces la presión de soldadura. Puesto que la soldadura se enfría desde la periferia hacia el interior, la presión de forjado debe aplicarse en el momento en que se interrumpe la corriente, o muy cerca de ese momento. Ver figura 2.26. [21]





**Figura 2.26.** Equipo básico utilizado en el proceso de soldadura RSW. [21]

### 2.3.3.5 ELECTRODOS

Los electrodos para soldadura de resistencia tienen cuatro funciones:

- (1) Conducen la corriente de soldadura al trabajo y, en el caso de la soldadura de puntos y de junta, fijan la densidad de corriente en la zona de soldadura.
- (2) Transmiten una fuerza a la pieza de trabajo.
- (3) Disipan parte del calor de la zona de soldadura.
- (4) Mantienen la alineación y posición relativas de las piezas del trabajo en la soldadura de proyección.

Si no se requiriera aplicar presión, la selección del material de los electrodos podría hacerse casi exclusivamente con base en sus conductividades eléctrica y térmica. Puesto que los electrodos se someten a fuerzas que con frecuencia son de magnitud considerable, deben ser capaces de aguantar los esfuerzos impuestos a temperaturas elevadas sin una deformación excesiva. Es importante que los electrodos tengan la forma correcta porque la corriente debe limitarse a un área fija para poder lograr la densidad de corriente requerida.

Si sólo va a realizarse una soldadura de punto o de junta a la vez, únicamente se requiere un par de electrodos. En este caso, la fuerza y la corriente se aplican a cada soldadura mediante electrodos moldeados. Es posible realizar

varias soldaduras de proyección separadas por distancias cortas empleando un solo par de troqueles de soldadura (electrodos).

En el mercado hay electrodos de diversas aleaciones de cobre con propiedades físicas y mecánicas satisfactorias. En términos generales, cuanto más dura sea la aleación, menores serán sus conductividades eléctrica y térmica. La elección de la aleación apropiada para una aplicación dada se basa en un equilibrio entre sus propiedades eléctricas y térmicas y sus cualidades mecánicas. Por ejemplo, los electrodos empleados para soldar aluminio deben tener conductividad elevada a expensas de una resistencia a la compresión alta, a fin de minimizar la adhesión de los electrodos al trabajo.

En cambio, los electrodos para soldar acero inoxidable deben sacrificar la alta conductividad para obtener una resistencia a la compresión que les permita soportar la fuerza de electrodo tan alta requerida.

La resistencia a la deformación depende del límite proporcional y de la dureza de la aleación del electrodo. El límite proporcional se fija en gran medida mediante tratamiento con calor.

La temperatura de la cara del electrodo es el factor determinante, porque es aquí donde ocurre el reblandecimiento. El tamaño y la forma de los electrodos por lo regular dependen del espesor de las láminas y del metal que se va a soldar. [21]

### 2.3.3.6 CALIDAD DE LA SOLDADURA

La calidad de soldadura requerida depende primordialmente de la aplicación. En aviones y vehículos espaciales, la calidad de soldadura debe cumplir con varias especificaciones muy estrictas. En otras aplicaciones, como los automóviles, las especificaciones son menos rígidas. En general, la calidad de las soldaduras de resistencia por puntos, costura y proyección se determinan con base en lo siguiente:

(1) Aspecto de la superficie.

- (2) Tamaño de la soldadura.
- (3) Penetración.
- (4) Resistencia mecánica y ductilidad.
- (5) Discontinuidades internas.
- (6) Separación de las láminas y expulsión de metal.

Desafortunadamente, el tamaño del botón y la penetración, dos de los factores que más afectan la resistencia mecánica de las soldaduras, no se pueden determinar sin inspecciones destructivas. Por añadidura, tanto el examen metalográfico destructivo como la prueba de corte por tensión de soldaduras de muestra, de uso tan común, tienen limitaciones inherentes.

El diseñador debe estar consciente de estas deficiencias al considerar la soldadura de resistencia por puntos, costura o proyección para una aplicación. Se ha tenido cierto éxito en la aplicación de controles de vigilancia o adaptativos, por ejemplo los basados en medir la expansión térmica del botón de soldadura en formación y del metal base circundante durante el calentamiento y la fusión, con el fin de asegurar la producción de soldaduras de resistencia que siempre sean aceptables. Tales éxitos tal vez compensen la imposibilidad de poder inspeccionar el tamaño del botón y la penetración sin destruirla, así como las limitaciones inherentes de los ensayos destructivos de soldaduras. [21]

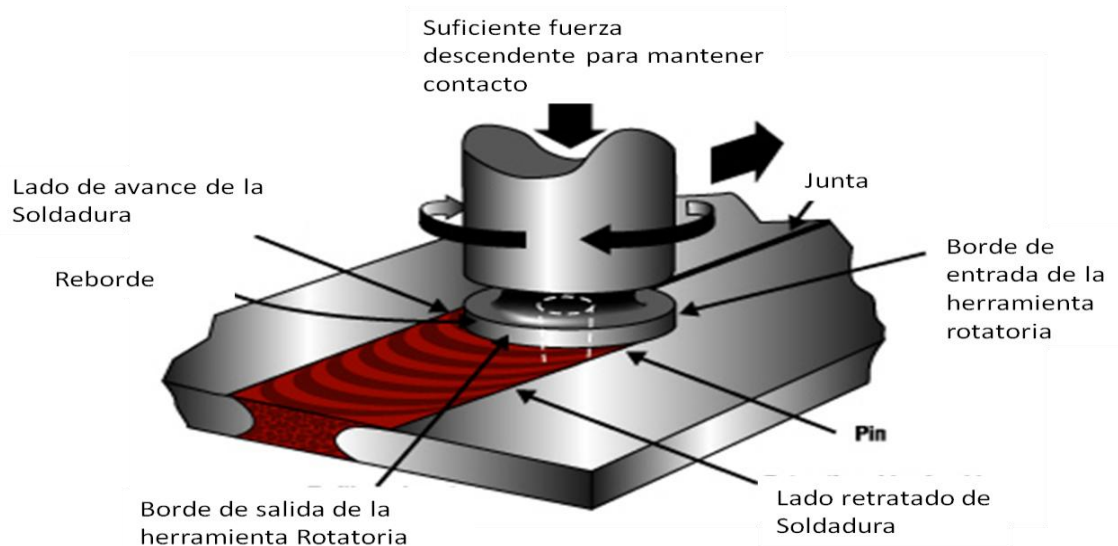
## 2.3.4 SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACION (FSW)

### 2.3.4.1 FUNDAMENTOS E INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de soldadura inventado por el Instituto de Soldadura en Cambridge, Reino Unido en 1991. La Soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de soldadura en estado semisólido (no fusión) en una máquina rotatoria, sumergible, que atraviesa una

herramienta especial en forma de pin a lo largo de un conjunto de placas para formar una soldadura.

La acción de rotación y la geometría específica de la herramienta de FSW genera la fricción y el trabajo mecánico de los materiales que a su vez generan el calor y la mezcla necesaria para el transporte de material de un lado de la línea de la articulación a la otra. El proceso tiene numerosas ventajas sobre otras tecnologías de unión y se puede utilizar para soldar gran variedad de materiales, incluyendo pero no limitado a, aluminio, bronce, cobre, titanio, acero, magnesio y plástico. Ver figura 2.27. [12]

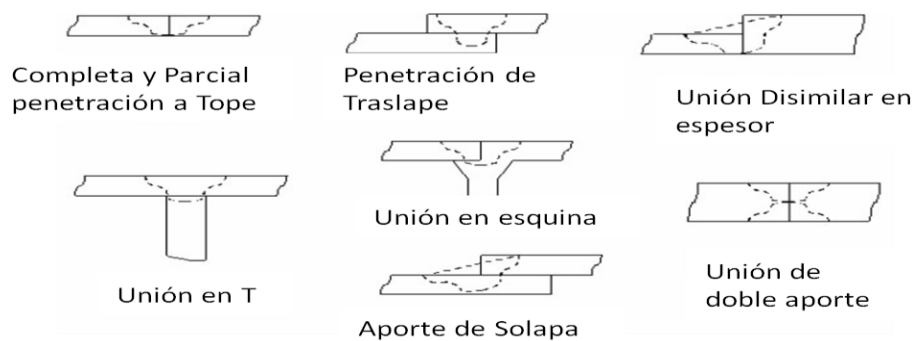


**Figura 2.27.** Proceso de soldadura FSW. [12]

La soldadura por fricción agitación ofrece una variedad de ventajas sobre los procesos tradicionales de fusión. Estas ventajas incluyen mejorar la resistencia estática y las propiedades de fatiga. El proceso es también muy fuerte, no es sensible a las condiciones ambientales, a diferencia de muchos de los procesos tradicionales de fusión.

Esto es especialmente benéfico para la soldadura de materiales de bajo punto de fusión como el aluminio, magnesio, bronce y cobre. También se produce una distorsión significativamente menor que los procesos convencionales, lo que permite la reducción de costos dramáticamente en muchas aplicaciones. [12]

El proceso de fricción agitación puede ser utilizada en una amplia gama de configuraciones comunes, incluyendo soldaduras a tope, soldadura a tope con diferente espesor, la penetración sesgada y doble penetración. Ver figura 2.28.



**Figura 2.28.** Tipos de uniones compatibles y no compatibles con el proceso FSW. [12]

Sin embargo, no se puede utilizar para la configuración tradicional de la junta en T que se utiliza comúnmente en muchas aplicaciones de soldadura por fusión. A menudo, esto puede requerir un nuevo diseño del producto, para aprovechar al máximo el proceso de FSW.

Existen dos variantes importantes que se pueden utilizar para otras aplicaciones. La primera es la soldadura por fricción Spot (FSSW), donde se hunde y se retracta la herramienta. Esta variante en particular tiene paralelos con la soldadura por puntos de resistencia (RSW) y tiene ventajas significativas sobre RSW, y evita muchas de las dificultades de RSW de aluminio.

Otra variante de FSW es el procesamiento por fricción (FSP), que es simplemente que la herramienta de fricción recorra el material. No hay ningún proceso de unión en esta aplicación. FSP se puede utilizar para mejorar significativamente las propiedades del material de fundición y material forjado.

En las fundiciones, la porosidad puede ser eliminada. Además, una mejora significativa en las propiedades del material se puede realizar. En otras aplicaciones, el material puede ser procesado para mejorar la ductilidad del

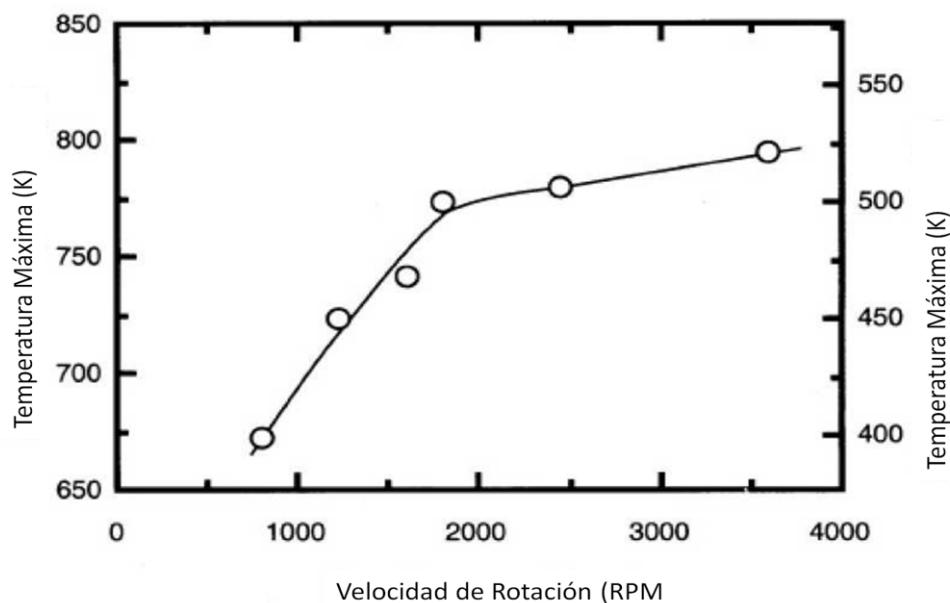
material. Esto puede ser aprovechado en la formación de flexión o aplicaciones de materiales que normalmente se presenta baja ductilidad, como el aluminio.

La Soldadura por fricción agitación es nueva, pero se ha utilizado en producción desde 1995 en Europa. Las primeras aplicaciones fueron para formar paneles para uso marino. Desde entonces, el proceso ha sido comercializado en muchas otras industrias, como la ferroviaria, automotriz, maquinaria pesada, aeroespacial y médica, etc. En la actualidad, se aplica en la fabricación de ensamblajes complejos, dando calidad y mejoras significativas de costos. A medida que el proceso está madurando, los diseñadores se están aprovechando del proceso, mediante el diseño del producto específico para el proceso de FSW. [12]

#### 2.3.4.2 VARIABLES DE SOLDADURA

La velocidad de soldadura (cm/min), la velocidad de la herramienta de rotación (rpm), la presión vertical de la herramienta  $\text{Kg/cm}^2$ , el ángulo de inclinación de la herramienta y el diseño de la herramienta son las principales variables independientes que se utilizan para controlar el proceso de FSW.

La tasa de generación de calor, campo de temperatura, velocidad de enfriamiento, la presión sobre el metal, torque, y la fuerza dependen de estas variables. Normalmente el incremento de la temperatura se incrementa con el incremento de la velocidad de rotación. Ver figura 2.29.



**Figura 2.29.** Incremento de la temperatura por el incremento de la velocidad de rotación. [19]

El torque disminuye con el aumento en la velocidad de rotación de la herramienta debido al aumento en la generación de calor velocidad y temperatura, cuando las otras variables se mantienen constantes. Se hace más fácil para el material a fluir a altas temperaturas y velocidades de deformación. Sin embargo, el torque no es afectado significativamente por el cambio en la velocidad de soldadura. El exceso de presión sobre la herramienta puede ser un indicador importante de potencial de erosión de la herramienta y, en casos extremos, rotura de la herramienta.

La presión también puede afectar la calidad de la soldadura. Presiones muy altas pueden conducir a un sobrecalentamiento y el adelgazamiento de la articulación (hombro), mientras que presiones muy bajas llevar a un calentamiento insuficiente y vacío de material. El requisito de potencia también se incrementa con el aumento de la presión. [19]

#### 2.3.4.3 HERRAMENTAL

El diseño de herramientas influye en la generación de calor, el flujo del material, la potencia requerida, y la uniformidad del las juntas soldadas. El hombro genera la mayor parte del calor y evita que el material plastificado

escape fuera de la pieza de trabajo, además que tanto el hombro y el pin de herramienta afectan el flujo de material.





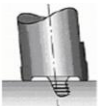

Varias herramientas han sido diseñadas ver figura 2.30. El whorl y MX-Triflute tienen volúmenes más pequeños de pines que las herramientas con pines cilíndricos.

Las roscas cónicas con el diseño espiral inducen a un componente vertical de velocidad que facilita el flujo de material. La flauta en el MX-Triflute también aumenta la zona interfacial entre la herramienta y la pieza de trabajo, dando lugar a mayores tasas de generación de calor, reblandecimiento y aumentando el flujo de material.

Aunque los diseños cilíndricos, whorl y Triflute son adecuados para la soldadura a tope, no son útiles para la soldadura a traslape, donde el excesivo adelgazamiento de la placa superior puede ocurrir junto con la captura de óxido adherente entre las superficies superpuestas.

Las herramientas de acampanado-Triflute y sesgo se desarrollaron para asegurar la fragmentación de la capa de óxido interfacial y una soldadura más ancha que es habitual para una soldadura con la configuración a tope.

La herramienta acampanado-Triflute es similar a la MX-Triflute con una flauta de expansión, mientras que A-skew™ es una herramienta roscada cónica con su eje inclinado a la del husillo de la máquina. Ambas herramientas aumentan el volumen de barrido relativo a la del pin, expandiendo así la región de agitación y resultando en una soldadura más amplia. Ver figura 2.30. [19]

Herramienta	Cilíndrica	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Esquema						

**Figura 2.30.** Configuraciones de Herramientales para FSW. [19]



### 2.3.4.4 REGIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN

A continuación se muestran las regiones de la soldadura por fricción agitación.



**Figura 2.31.** Regiones de una soldadura por Fricción agitación. A) Material Base, B) Zona afectada por el calor, C) Zona termo mecánicamente afectada, D) Botón de soldadura. [19]

La zona afectada por el calor (HAZ) es similar que en las soldaduras convencionales aunque la temperatura pico máxima es significativamente menor que la temperatura de sólido, y la fuente de calor, es más bien difusa. Esto puede conducir a diferentes microestructuras en comparación con los procesos de soldadura por fusión.

La región central del botón que contiene el "aro de cebolla" donde se experimenta la deformación más grave, y es una consecuencia de la forma en que una herramienta roscada deposita el material desde el frente hacia la parte posterior de la soldadura.

La zona afectada termo mecánicamente (TMAZ) se encuentra entre la ZAC y el botón, los granos de la microestructura original se mantienen en esta región, pero a menudo en un estado deformado. [19]

### 2.3.4.5 DEFECTOS

Los defectos más comunes en FSW son porosidades y defectos de superficies, con una velocidad constante y un incremento en la velocidad de avance pueden derivar en la creación de agujero de gusano cerca de la superficie de la

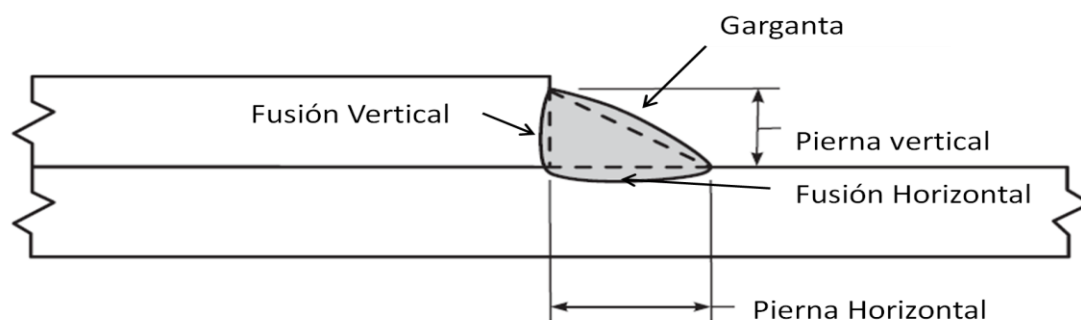
soldadura, es decir que el incremento de las porosidades incrementa con la velocidad de avance debido a un indebido flujo de material en la parte inferior de la soldadura. Existen indicadores que la velocidad de avance y la velocidad de rotación son importantes variables en la formación del hoyo de gusano. <sup>[19]</sup>

## 2.4 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE SOLDADURA EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En la actualidad la industria automotriz tiene uno de los estándares de calidad más estrictos debido a la alta competencia que existe en este mercado. Cabe mencionar que cada compañía automotriz tiene su estándar para criterios de aceptación de soldadura, los cuales son referenciados de la norma AWS D8.1, D8.8 y D8.14. Aunque en estas normas solo se abarcan aceros avanzados TRIP, DP y Fase compleja, se deben de tomar como referencia para la evaluación de las uniones de los acero TWIP.

### 2.4.1 ESPECIFICACIONES DE DIMENSIONES DE LA SOLDADURA DE FILETE

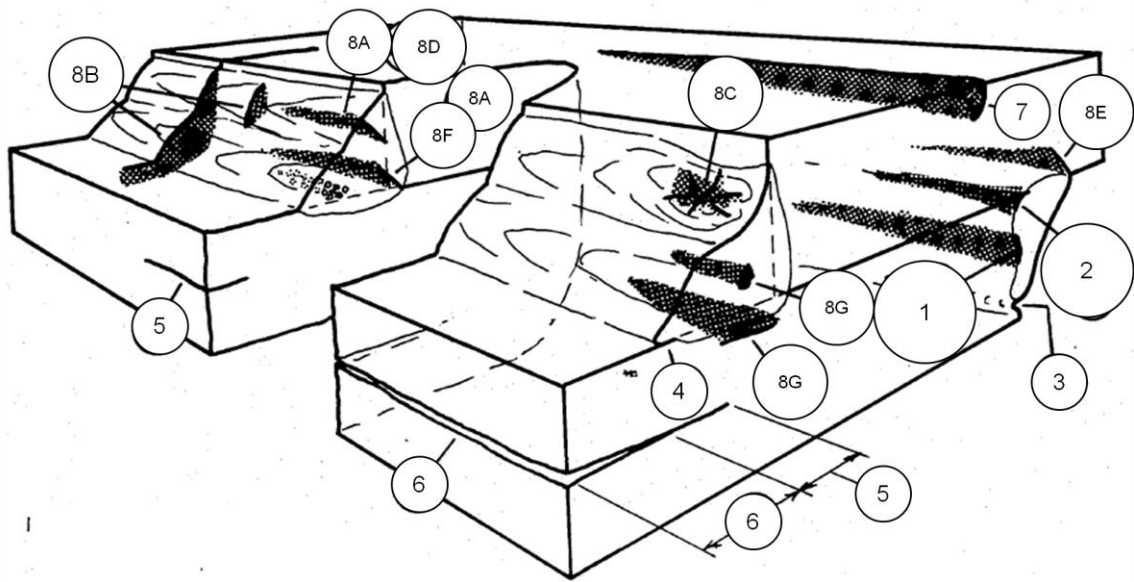
La longitud de las piernas de la soldadura de filete y garganta debe de cumplir con las siguientes. 1.- El mínimo de tamaño de las piernas debe de ser igual o mayor del 90% del material con el menor espesor. 2.- La garganta de la soldadura no debe de ser menor del 60% del material soldado con menor espesor. Ver figura 2.32. [20]



**Figura 2.32.** Especificación de dimensiones de la soldadura de filete. [20]

## 2.4.2 DEFECTOS EN UNIONES SOLDADAS Y PRINCIPALES CAUSAS

Los defectos más comunes de soldadura en los procesos de ensamble con la configuración de traslape son descritos en la figura 2.33.



**Figura 2.33.** Defectos más comunes en los proceso de ensamble. [20]

De acuerdo con los números mostrados en la figura anterior los defectos son:

- 1.- Fusión incompleta localizada entre la zona del metal base y el metal de aporte.
- 2.- Penetración incompleta del metal de aporte en el material base localizado en la raíz.
- 3.- Socavado en el metal base debido al excesivo calor de entrada.
- 4.- Traslape del metal de aporte sobre el metal base, localizado en el pie de soldadura.

5.- Laminación, defecto de fabricación del material base localizado en la mitad del espesor del material base.

6.- Delaminación, exposición del metal en la superficie.

7.- Defectos de laminación superficial en el metal base, estos pueden causar grietas si la soldadura es aplicada en este tipo de soldadura.

8.- Diferentes tipos de grietas: A) longitudinal, B) transversal, C) cráter, D) garganta, E) pie, F) raíz y g) zona afectada por el calor. [20]

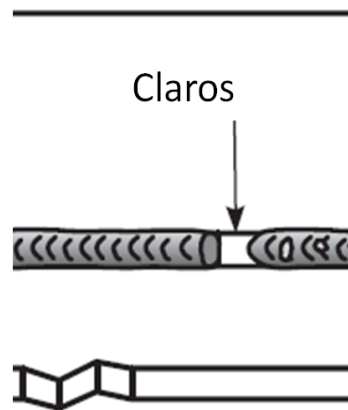
#### 2.4.2.1 UNIONES SOLDADAS CON FALTA DE PENETRACIÓN DE RAÍZ DEBIDO AL CAMBIO DE LA MORFOLOGÍA DE LAS PIEZAS.

Uno de principales problemas a los que se enfrentan las organizaciones manufactureras al utilizar aceros avanzados, es el conformado de estos ya que debido a su alta resistencia por ende las herramientas también deben de ser de mayor resistencia para impedir que la herramienta se desgaste y por ende cambie la morfología de las piezas lo que es un problema al momento de unir las piezas ya que usualmente son unidas por procesos robotizados o automatizados los cuales generalmente son guiados hacia y por la raíz y un cambio en está afectaría la soldadura en un punto en específico. [20]

#### 2.4.2.2 CLAROS EN LAS UNIONES SOLDADAS POR INTERRUPCIÓN DE SUMINISTRO DE ALAMBRE

Como ya se vio con anterioridad en el proceso GMAW, el conducto del electrodo y su forro se conectan a una ménsula adyacente a los rodillos de alimentación del motor que suministra el alambre o material de aporte. El conducto sustenta conduce y protege el alambre desde los rodillos de alimentación hasta la pistola y la punta de contacto. Se necesita una alimentación continua del electrodo para asegurar un arco estable. Es preciso evitar que el alambre se doble o se pandeé. Si el electrodo no está sustentado en todos los puntos, entre los rodillos y la punta de contacto, tenderá a

atascarse, esto provoca que le suministro de alambre sea interrumpido induciendo a formar claros en la unión, así como también el desgaste en los rodillos y mala calidad del alambre. Ver figura 2.34. [20].



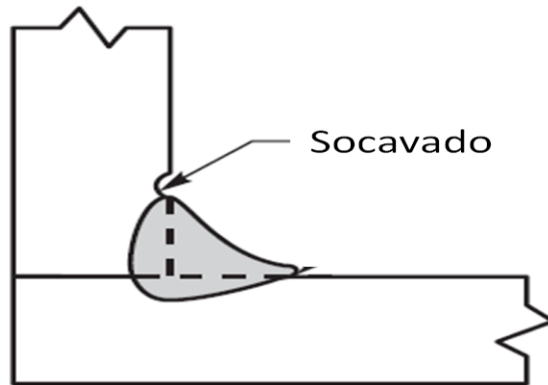
**Figura 2.34.** Claros en soldadura. [20]

### 2.4.2.3 SOCAVAMIENTO

En los procesos de soldadura un aumento en la velocidad de desplazamiento, voltaje o corriente así como un ángulo incorrecto de la pistola pueden causar un problema de socavamiento. [20]

### CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

En soldaduras menores a 12" no debe de existir socavamiento y en soldaduras mayores a 12" no debe de existir más del 20% del espesor de la placa. Ver figura 2.35.



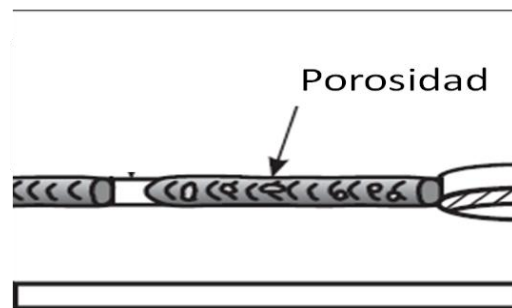
**Figura 2.35.** Defecto de socavado en soldadura. [20]

#### 2.4.2.4 POROSIDADES

Normalmente las porosidades ocurren por la falta de cobertura del gas de protección, la cual puede ser ocasionada por una falta de limpieza en la boquilla, o un insuficiente flujo del gas de protección o agentes externos como corrientes de aire que desplacen el gas de protección. Ver figura 2.36. [20].

#### CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

La suma de los diámetros de los poros en una superficie de 25 mm no debe de exceder de 6.4 mm. Y el máximo diámetro de los poros no debe de exceder 1.6 mm. [20].



**Figura 2.36.** Defecto de Porosidad en soldadura. [20]

### 2.4.2.5 AGRIETAMIENTO

Este defecto normalmente viene precedido por un cordón de soldadura muy delgado o un excesivo calor de entrada en la pieza de trabajo, también en algunas ocasiones hay que revisar si se requiere un precalentamiento de la pieza o un tratamiento térmico para evitar un endurecimiento excesivo en la zona de fusión.

### CRITERIOS DE ACEPTACION

Las grietas no son permitidas, no importa el tipo de grieta ni su localización. [20].

## 2.5 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AVANZADOS DE ALTA RESISTENCIA AHSS TERCERA GENERACIÓN

Como ya se ha tratado en este trabajo, en la actualidad existe poca información de la soldadura y soldabilidad de los aceros avanzados AHSS de tercera generación, por ende solo nos basaremos en los aspectos técnicos y tecnológicos de la soldadura por fusión y fricción en los aceros de alto contenido de manganeso (TWIP) y austeníticos inoxidables. La influencia de los procesos de soldadura en el tamaño de grano y en la resistencia también se discute. Por último se obtienen conclusiones con respecto a la optimización de los procesos de soldadura de aceros TWIP y austeníticos inoxidables. [11]

### 2.5.1 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS TWIP

En los últimos años mucha atención se ha centrado en aceros con plasticidad inducida por maclas con alto contenido de manganeso aceros (TWIP). A pesar de este acrónimo similar a TRIP (plasticidad inducida por transformación), los aceros TWIP son de alta aleación y presentan una estructura austenítica completamente a temperatura ambiente, mientras que los aceros TRIP son aceros de baja aleación con una microestructura ferrítica predominante.

Varios conceptos de aleación de aceros TWIP se han desarrollado y publicado, los más populares se basan en los sistemas Fe-Mn-C o Fe-Mn-Al-Si. Estos dos sistemas de aleación, sin embargo, no son resistentes a la corrosión.

Los estudios más recientes se han ocupado de aceros TWIP resistentes a la corrosión sobre la base del sistema Fe-Mn-Cr-C-N. Aunque las aleaciones de estos últimos presentan las mismas ventajas con respecto a la plasticidad y resistencia a la corrosión electroquímica, la incorporación de cantidades significativas de nitrógeno lleva a problemas adicionales. Los tres sistemas de aleación han presentado maleabilidad y plasticidad excepcional en combinación con una alta resistencia en la condición de trabajado en frío.

Una característica clave para obtener el efecto TWIP es la energía de falla de apilamiento. En general se supone que los valores entre 20 y 45 mJ están relacionados con altos valores de plasticidad durante la deformación, mientras que los valores más bajos se relacionan con la tensión inducida por el estrés o la transformación de la estructura de  $\gamma$ -Fe o  $\alpha$   $\epsilon$ -martensita. Los valores más altos de la energía de falla inciden en un aumento en las dislocaciones y en una menor formación de maclas cristalográficas por deformación. [18].

Las aplicaciones de los aceros TWIP actualmente en discusión incluyen el sector automotriz. Por ejemplo, piezas de carrocería que tienen que ser delgadas, fuertes, ligeras y dúctiles en el futuro podrían ser producidas con estos aceros. La unión de las partes es una cuestión importante con respecto a las aplicaciones de automóviles y carrocerías. En particular, los procesos de soldadura por fusión, con una alta energía de entrada lo cual da como resultado cambios significativos en el material en la zona de fusión (FZ) y la zona afectada por el calor (HAZ).

Cuanto más las propiedades del acero dependen del procesamiento termo mecánico y de la aleación química, mayor será el impacto previsto de la



soldadura por fusión. Naturalmente, este es también el caso de los grados de baja aleación, tales como aceros TRIP, porque la soldadura altera la FZ y ZAC con respecto a la fracción de la fase, tamaño de grano y la resistencia.

Sin embargo, varios aspectos adicionales tienen que ser considerados para la soldadura por fusión de aceros TWIP debido a su mayor nivel de dependencia de aleación, alta dependencia de las propiedades en la química, baja conductividad térmica y las diferencias en las vías de solidificación. Los principales aspectos de las uniones soldadas por fusión, entre aceros similares y disímiles son presentados y discutidos aquí. [18].

### 2.5.1.1 SOLDABILIDAD DE ACEROS TWIP POR EL PROCESO GTAW, LBW Y PLBW

Debido a que el espectro de técnicas de procesos de soldadura es muy amplio y los datos experimentales de los aceros TWIP son relativamente escasos, esta contribución se enfoca en los procesos de soldadura por fusión láser y GTAW y en los cambios microestructurales que se obtienen en los aceros TWIP.

#### 2.5.1.1.1 EFECTOS DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA EN EL MATERIAL

Cada técnica de fusión de soldadura se caracteriza por un alto consumo de energía locales para fundir el material y por tanto producen una unión metalúrgica.

En el caso de la soldadura por arco gas tungsteno (GTAW), la densidad de potencia es del orden de  $104 \text{ W/cm}^2$ , y para soldadura con rayos láser (LBW), que se utiliza en la industria del automóvil,  $106 \text{ W/cm}^2$ . Dos regiones diferentes de la articulación tienen que ser consideradas: la zona de fusión (ZF) y la zona afectada por el calor (ZAC).

La FZ es completamente líquida durante el proceso de soldadura y las interacciones de gas licuado ocurren durante la soldadura. Por lo general, conserva su microestructura de vaciado. A pesar de la ZAC no es fundido durante la soldadura, se cambia por la entrada de calor del proceso de soldadura.

Para láminas de materiales que suelen ser utilizadas en aplicaciones de automóvil, una disipación de dos dimensiones de calor se puede anticipar, lo que implica que la mayoría del calor introducido en la FZ no se pierde por radiación y convección, si no por transportación en el material base.

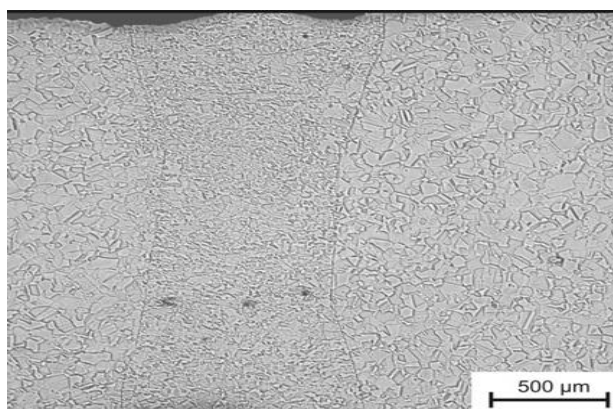
En uniones disímiles de aceros TWIP y aceros de baja aleación la entrada de calor muestra diferencias significativas en la respuesta de ambos materiales con respecto a las transformaciones de fase en el acero de baja aleación. Por lo tanto, para los aceros de baja aleación, los perfiles del proceso de soldadura son más relevantes en comparación con las de los aceros TWIP. Una amplia gama de temas pueden ser analizados con respecto a la soldadura de aceros TWIP.

Esta contribución analiza una selección de los eventos más significativos y característicos relacionados con este tipo de aceros. Por ejemplo Lais Mujica Ronseri [18] encontró que la evaporación, dilución y la segregación, afectan a la composición química de la unión y por lo tanto la estabilidad de la fase austenítica y sus propiedades mecánicas.

El tamaño de grano, las tensiones residuales y la dureza son una respuesta física a los cambios microestructurales en la soldadura. Por último, un análisis de los defectos de soldadura pone de relieve los principales problemas que se pueden encontrar específicamente en este tipo de uniones analizados con respecto a la soldadura de aceros TWIP. [18]

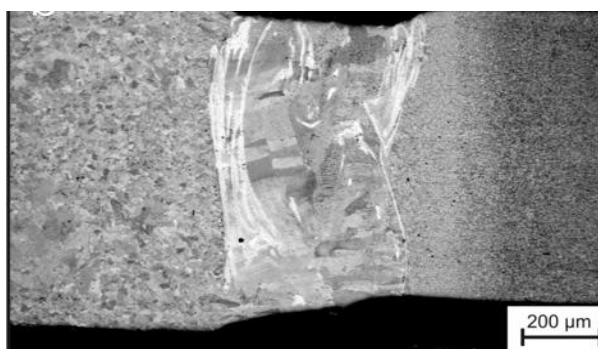
### 2.5.1.1.2 EVAPORACIÓN DEL MANGANESO EN LA ZONA DE FUSIÓN

La evaporación de manganeso en la zona de fusión es uno de los efectos indeseables en la soldadura de los aceros TWIP. El análisis de uniones soldadas de aceros TWIP Fe–25Mn–3Al–3Si demuestra el decremento de la cantidad de manganeso de 24% a 22.5%. En la zona de fusión comparado con el metal base. Ver 2.37.



**Figura 2.37.** Soldadura de acero Fe–25Mn–3Al–3Si. [18]

Y en una unión disímil de acero TWIP Fe–22Mn–0.6C de 22 a 7%. Ver figura 2.38.



**Figura 2.38.** Soldadura de acero TWIP disímil. [18]

Esto es causado por los efectos de evaporación y dilución. La evaporación es debida a la creciente presión de vapor de manganeso con aumento de la temperatura. Por ejemplo, en el estado líquido en 1500 y 1600 C, la presión de vapor de manganeso puede llegar a 2000 y 4770 Pa, respectivamente. Los procesos GTAW, LBW y LBW pulsado fueron aplicados para unir aceros TWIP

Fe–25Mn–12Cr–0.24C–0.32N. La potencia de entrada y velocidad de soldadura fueron 1.13 Kw y 0.4 m/min para GTAW, 3 Kw y 2.25 m/min para CLBW, 0.3 Kw, 0.6 m/min para PLBW. El contenido de manganeso en la Zona de fusión no se redujo utilizando soldadura de laser continua (CLBW), pero disminuyó en un 1,5% utilizando soldadura de arco de gas tungsteno (GTAW) y también disminuyó 5% aplicando laser pulsado (PLBW).

Esta tendencia parece estar relacionada no a la entrada media de potencia, sino más bien a la instantánea penetración de calor, su presión de vapor no es especialmente alta a temperaturas de soldadura por fusión.

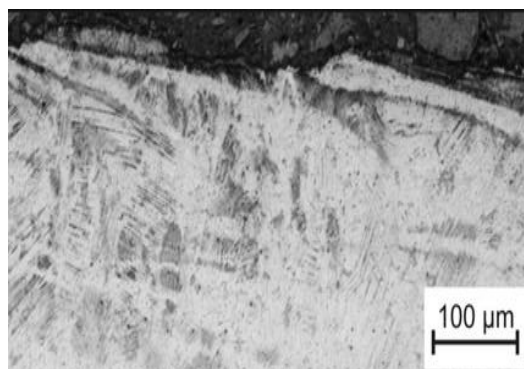
Es bien sabido que el manganeso es responsable de la estabilidad austenita de aceros TWIP y tiene una importante influencia en la energía de falla de apilamiento (SFE). Una disminución 25 a 20% en Mn. podría representar una disminución en el SFE de alrededor de 5–10 mj/m<sup>2</sup>, Si la cantidad de manganeso que se evaporó es significativa, se puede esperar una disminución de la SFE, lo que puede conducir a un mecanismo diferente a la deformación por maclaje, por ejemplo transformación martensítica.

### 2.5.1.1.3 DILUCIÓN EN LA ZONA DE FUSIÓN

Teniendo en cuenta que los aceros TWIP están destinados a aplicarse como lámina en la industria del automóvil, la dilución debe ser cuidadosamente considerada para las uniones de aceros TWIP con aceros diferentes que contienen niveles más bajos de elementos de aleación.

Las típicas estructuras de carrocería están con aceros TRIP, de doble fase y aceros martensíticos. La unión de estos aceros con aleaciones no ferrosas como el aluminio no es tratado en este trabajo. El efecto de la dilución se ha estudiado en uniones disímiles dando como resultado que la orientación de las bandas martensíticas sigue la trayectoria determinada por la convección de la

fase líquida durante la soldadura, donde las fuerzas de flotabilidad (densidad de diferencias) y convección de Maragóni (gradientes de tensión superficial y las fuerzas de termocapilaridad), así como el flujo de calor, influyen en la mezcla de los materiales y la dirección de las bandas martensíticas. Las bandas de martensita resultaron ser responsables de la rotura en la Zona de fusión durante los ensayos de tensión, como se ve en la Figura 2.39. [18]



**Figura 2.39.** Soldadura de acero TWIP TRIP (bandas martensíticas). [18]

Un método posible de contrarrestar los problemas de la dilución es soldar las hojas de forma asimétrica con respecto a la de acero TWIP. Esto minimiza los efectos de la dilución derivada de un segundo material con un contenido de aleación inferior.

Además, una entrada de calor más pequeño se puede aplicar debido a la temperatura de fusión más bajo del acero al manganeso ( $T_{liq} = 1350-1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en comparación con otros aceros estructurales ( $T_{liq} \geq 1500-1525\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

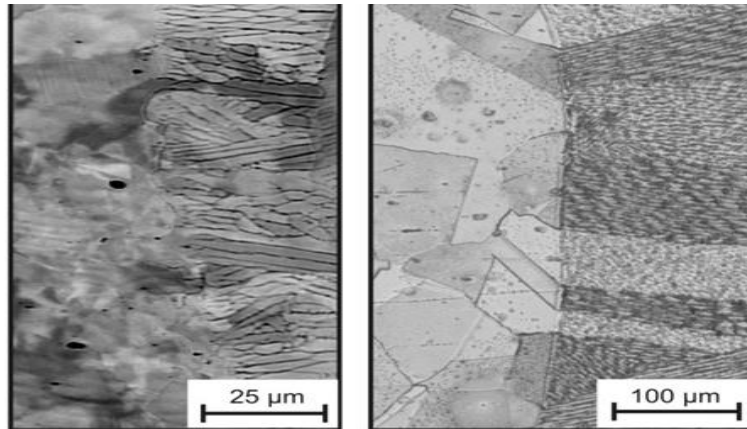
Otro método propuesto para contrarrestar el efecto de la dilución es el uso de un material de aporte seleccionado en el diagrama básico de Schaeffer para poder obtener una microestructura completamente austenítica en la zona de fusión.

El material de aporte deberá de tener un alto contenido de cromo equivalente tan alto como el del acero TWIP y el de baja Aleación, el contenido de níquel equivalente deberá de estar entre el del acero TWIP y el del acero de baja

aleación, con esto el material de aporte deberá compensar la pérdida de austenita en la zona de fusión y prever la formación de martensita. [18]

#### 2.5.1.1.4 SEGREGACIÓN

Para la mayoría de los aceros TWIP, la solidificación austenítica directa se lleva a cabo, como se ve en la figura 2.40.



**Figura 2.40.** Segregación de soldadura de aceros TWIP. [18]

La microsegregación se produce durante la solidificación de la soldadura. Esto conduce al enriquecimiento de la fase líquida con manganeso y por lo tanto a un agotamiento correspondiente en la solidificación de la fase austenítica.

Adicionalmente, el carbono se co-segrega con el manganeso para producir áreas ricas de C-Mn. Esto resulta en áreas ricas de austenita con elementos estabilizadores (C and Mn), ubicados en las regiones interdendríticas como una consecuencia de la mayor solubilidad. Las áreas de baja estabilidad austenítica (C-y-Mn pobres) se encuentran en el centro de las dendritas.

El contenido de carbono y de manganeso determinarán principalmente la energía atrapada de falla y el modo de deformación de la unión bajo estrés entonces una transformación martensítica puede ocurrir en áreas donde existe poca cantidad de manganeso en lugar de la deformación por maclaje. El efecto

de la segregación también puede causar la formación de segundas fases eutécticas como la cementita. [18]

#### 2.5.1.1.5 TAMAÑO DE GRANO

Los efectos del tamaño de grano son diferentes en la ZAC y en la zona de fusión. Por un lado, el tamaño de grano afecta el grado de resistencia mientras que, por otro una disminución en el tamaño de grano disminuye la propensión a transformaciones martensíticas y de la actividad de maclaje que afecta a la tasa de endurecimiento por deformación y ductilidad. [18]

#### 2.5.1.1.6 ESFUERZOS RESIDUALES

Los datos sobre los esfuerzos residuales en uniones de aceros TWIP son escasos. Las mediciones de las juntas a tope soldado con láser de Fe-24mn-0,6 C y acero TRIP800 revelan perfiles longitudinales de las tensiones residuales típicas para soldadura por fusión. Los esfuerzos longitudinales son más grandes que los transversales.

Los máximos esfuerzos residuales (+180 MPa) en el material TWIP se encontraron cerca del cordón de soldadura, los efectos residuales afectaron una amplia zona del metal base, 4 mm lejos del centro de la zona de fusión, a pesar de que las observaciones de la microestructura no distinguen alguna diferencia. No obstante que los esfuerzos residuales en el centro de la unión tienen un máximo de resistencia a la cedencia del material base no afecta la integridad de la unión. [18]

#### 2.5.1.1.7 DEFECTOS DE SOLDADURA

Las soldaduras de aceros TWIP son susceptibles a la fisuración en caliente debido a la solidificación austenítica, como resultado del alto coeficiente de expansión volumétrica de la fase austenítica y por lo tanto una gran contracción de volumen.

La soldadura de Fe-18Mn-0,6C por GTAW ha dado lugar a una fisuración en caliente, relacionada con la precipitación de la cementita eutéctica y a la segregación de manganeso. Sin embargo esto también depende de los parámetros de soldadura y la composición del material, en soldaduras con láser de materiales similares y disímiles Fe-24Mn-0.6C y Fe-25Mn-3Al-3Si la fractura en caliente no fue encontrada dado la baja entrada de calor comparada con el proceso de GTAW. [18]

Debido a que las hojas de acero TWIP generalmente tienen una pobre resistencia a la corrosión, estas láminas deben de ser galvanizadas. Esto causa problemas relacionados con el zinc al momento de ser soldadas. Una de las consecuencias esperadas es la formación de poros debido a la gran cantidad de zinc evaporado, los parámetros de soldadura y la separación de las placas pueden ayudar a retrasar la formación de poros por la liberación de vapor del charco de soldadura. [18]

## 2.5.2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AUSTENÍTICOS INOXIDABLES

El continuo desarrollo de nuevos aceros inoxidable austeníticos se deriva de la fuerte necesidad por parte de la industria para hacer que estos materiales disponibles, sean capaces de operar en ambientes muy corrosivos. Esto ha llevado a la investigación y exitosa definición de los nuevos aceros austeníticos inoxidable con un alto contenido de cromo, molibdeno y nitrógeno (y bajo contenido en hierro), capaces de resistir, en particular, las formas diversas de la corrosión localizada (picadura y hendidura), identificada en varias aplicaciones como los mecanismos más importantes y característicos de los daños.

Lauro Mandinga [16] encontró un gran aumento en la resistencia a la "picadura", en el acero 304L, que tiene un contenido en peso de molibdeno de 4.5% con respecto al 2.5% de los 316 tradicionales, también se ha logrado en



aceros de alto contenido de nitrógeno tipos (UNS S31254) y 654SMO (UNS S32654), en el que Mo y N alcanzan el 7% y 0.5% respectivamente. El nitrógeno permite un marcado aumento en la resistencia a la "picadura" y hendidura' de los aceros Cr-Ni-Mo inoxidable y al mismo tiempo, aumenta sus características de tracción a través de mecanismos basados en el endurecimiento de la disolución que son las características que nos interesan en las partes automotrices.

Además, el nitrógeno junto con el níquel, hace que la estructura austenítica sea más estable y reduce la susceptibilidad a la precipitación de intermetálicos compuestos durante los tratamientos térmicos y / o soldadura.

El alto contenido de nitrógeno de los aceros inoxidables austeníticos pueden ser susceptibles a la formación de "porosidad" durante la soldadura, en contraste, al menos en parte, por el equilibrio entre la alta Cr, Ni y el contenido de Mo, con adiciones adecuadas de manganeso para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la zona de fusión de la soldadura.

La susceptibilidad a la rotura de calor constituye otro problema relacionado con la soldadura de aceros inoxidables de alta aleación, y para contrarrestar estos materiales modificados se han formulado con bajo contenido de impurezas (por ejemplo, azufre y fósforo), sin embargo, en la soldadura de aceros inoxidables con un contenido de molibdeno mayor a, un 4,5%, las aleaciones que llevan una base de níquel se utilizan con frecuencia.

El uso de aleaciones de níquel con un contenido alto de molibdeno principalmente permite la fuerte tendencia de ese elemento para separar a las zonas de fusión (con la consiguiente reducción de su contenido dendrítico medio, y por lo tanto, la resistencia a la corrosión en entornos de cloruro) y reducir al mínimo la formación de compuestos intermetálicos durante la soldadura. Sin embargo, pueden iniciar los problemas de grietas de calor en las zonas de fusión. Incluso en este caso debido al contenido de niobio frecuentemente por parte de los materiales a base de níquel que

generalmente se utiliza (por ejemplo, tipo 625). Las características de resistencia a la corrosión de las uniones soldadas también dependen en gran medida a las operaciones de limpieza después de la soldadura, la importancia de la cual se convierte fundamental para el uso en entornos corrosivos con alto contenido de cloruros. Si los procedimientos adecuados de limpieza se practican y la ausencia de defectos de soldadura está asegurada, las características de resistencia a la corrosión de la soldadura se llevan a cabo para ser más o menos equivalentes a las del material base adyacente. [16].

Incluso los aceros inoxidable austeníticos se agrupan frecuentemente en relación con su capacidad para resistir "picaduras", y está íntimamente unido a su composición química específica. Con ese objetivo, un parámetro llamado la equivalencia de resistencia a la picadura (PRE) ha sido definida en la que la influencia de los elementos de la aleación como el cromo (Cr), molibdeno (Mo) y nitrógeno (N) y, a veces de tungsteno (W) se pondera en la resistencia a la picadura. La relación se establece en las ecuaciones 1 y 2:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 30 \times \% \text{N} \quad (1)$$

y con tungsteno:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times (\% \text{Mo} + 0,5\% \times \text{W}) + 30\% \times \text{N} \quad (2)$$

Un factor de 30 para el nitrógeno es el que se considere más adecuada en la actualidad para los aceros super-austenítico, al mismo tiempo un factor de 16 propuestas por Truman se aplica preferentemente a los tipos dúplex y súper dúplex de acero inoxidable. El efecto favorable de nitrógeno en la resistencia a la picadura se cuantifica por el valor alto atribuye a su factor correspondiente. Sobre la base del valor calculado PRE (el cálculo con el factor de 16 para el nitrógeno se ha introducido para la comparación), los aceros inoxidables

austeníticos se pueden subdividir en tres grupos:

Grupo 1: PRE <45;

Grupo 2: PRE = 45-60;

Grupo 3: PRE > 60.

### 2.5.2.1 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AUSTENÍTICOS INOXIDABLES POR EL PROCESO RSW

Los aceros austeníticos inoxidable son conocidos por su alta resistencia y dureza al momento de ser procesados en frío. Esta deformación causa que la austenita sea transformada en martensita, este principio es lo que ayuda a que los aceros 301 posean una mayor resistencia que los 304 ver figura 2.41, pero decremента la ductibilidad y la tenacidad. Por otra parte también se presentan defectos de soldadura como lo son inclusiones de hidrogeno, segregación, formación de carburos y grietas.

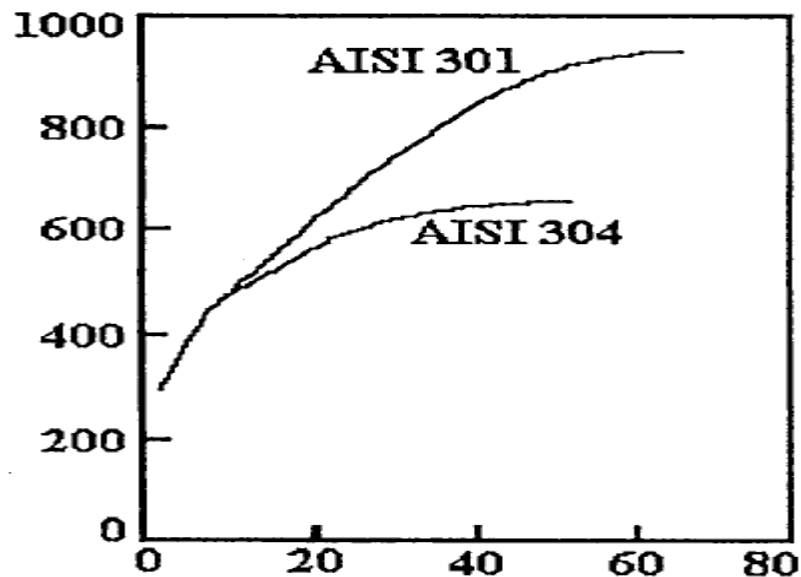


Figura 2.41. Curvas de deformación de aceros 301 y 304. [22]

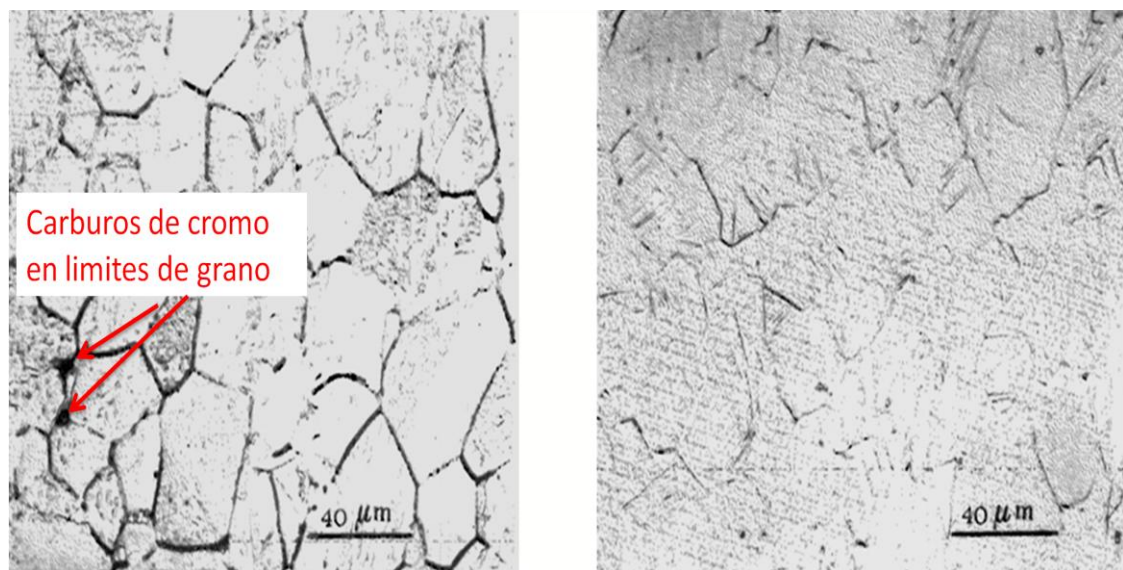
Bernabai U. (2010) [22] soldó dos laminas de acero 301 (ver composición química en figura 2.42) de dimensiones 15 x 60 x 1 mm por el proceso

resistencia eléctrica a dos láminas galvanizadas de dimensiones 24 x 250 x 08 mm.

	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni
Steel A	0.098	1.2	0.48	0.022	0.001	17.45	7.67
Steel B	0.105	0.76	0.58	0.026	0.002	17.00	7.25

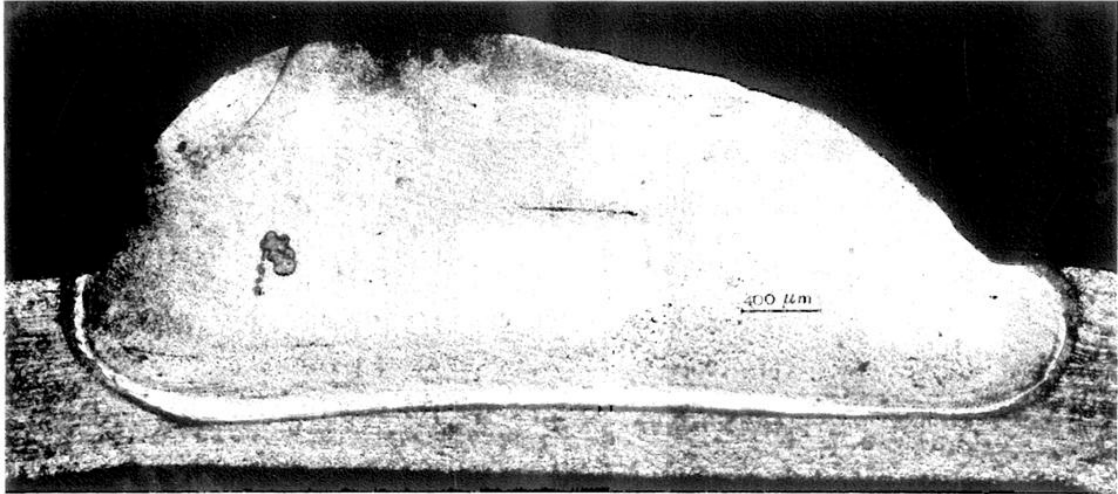
**Figura 2.42.** Composición química de acero A y B. [22]

Bernabai encontró que el acero A está sensibilizado en mayor proporción que el acero B es decir muestra mayor precipitación de carburos de cromo en los límites de grano. Ver figura 2.43. [22]



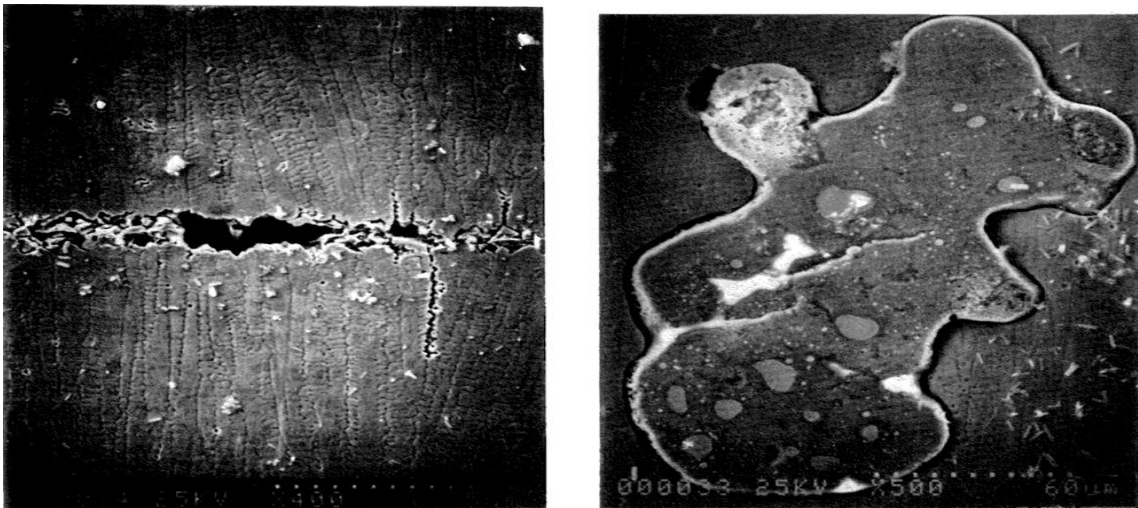
**Figura 2.43.** Metalografía óptica de acero A y B. [22]

Una revisión metalográfica de la zona de fusión del acero A con la placa galvanizada, es mostrada en la figura 2.44 el cual es una inclusión de hidrógeno debido a que el recubrimiento de zinc actúa como una barrera para permitir que le hidrógeno escape.



**Figura 2.44.** Vista general de zona de fusión soldadura de acero A con placa galvanizada. [22]

En la figura 2.45 se observa un rechupe e inclusiones en la zona de fusión, la cual está caracterizada por una estructura dendrítica, debido a la saturación de hidrógeno por el proceso de solidificación. [22]



**Figura 2.45.** Rechupe e inclusión en la zona de fusión. [22]

El fenómeno de sensibilización ocurre en los aceros austeníticos inoxidables cuando la temperatura de la soldadura incrementa el precipitado de fases ricas en cromo a lo largo de zonas críticas como interfaces asuteníticas ferríticas, maclas y bandas de deslizamiento dentro de los granos austeníticos asociados con la sensibilización localizados en la zona afectada por el calor son

denominados corrosión transgranular, límites de grano localizados con la zona afectada por el calor son denominados corrosión intergranular, los límites de grano que tienen un alto contenido de ferrita debido al rápido enfriamiento, asociados con la sensibilización son llamados corrosión interdendrítica.

Pilar de Tiedra (2011) [23] soldó láminas de acero 304 de 0.8 mm de espesor, (ver composición química en figura 2.46) el procedimiento del experimento fue el siguiente, clase de electrodo No. 2 con 4.5 mm de diámetro, tiempo de soldado; 0.20 s, corriente de soldado 5000 A, fuerza de electrodo, 1500 N.

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Al	Co
0.08	18.03	8.74	0.426	1.153	0.36	0.003	0.17
Cu	Nb	Ti	V	W	Fe	P	S
0.39	0.02	0.004	0.05	0.03	70.48	0.019	0.002

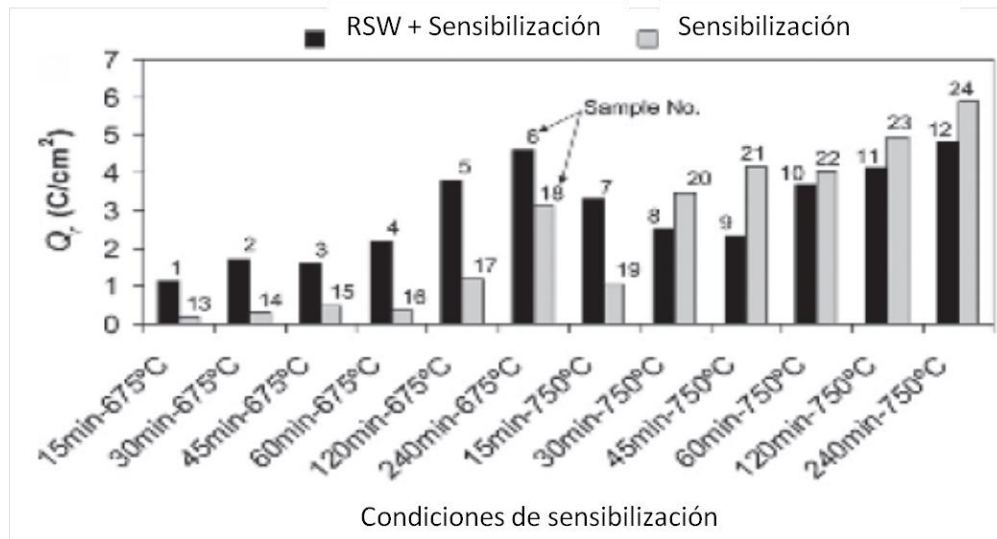
**Figura 2.46.** Composición química de acero inoxidable 304. [23]

Posteriormente al proceso de soldadura las láminas fueron sensibilizadas como se muestra en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Proceso de sensibilización. [23]

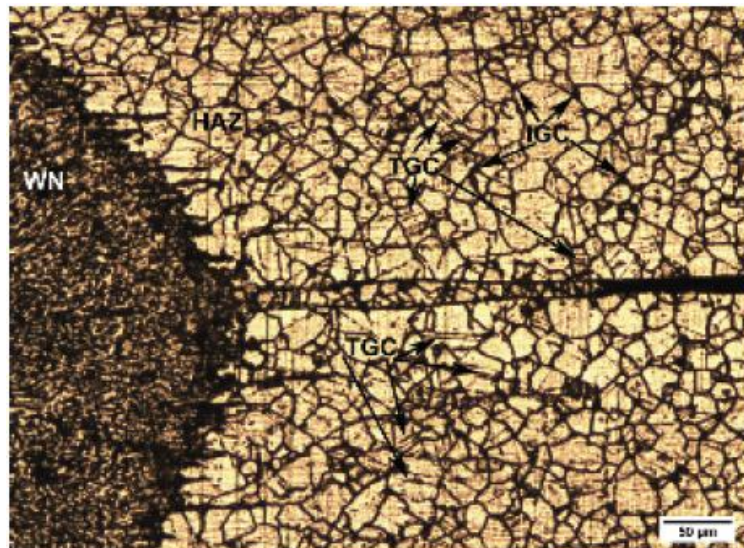
Sensibilizado porterior a la soldadura		Número de muestra
Temperatura (°C)	Tiempo (min)	
675	15	1
	30	2
	45	3
	60	4
	120	5
	240	6
750	15	7
	30	8
	45	9
	60	10
	120	11
	240	12

En este experimento se encontró por medio de EPR y DLEPR que el grado de sensibilización se disminuye cuando se incrementa el tiempo de sensibilizado, pero posteriormente se incrementa. Ver figura 2.47.



**Figura 2.47.** Grado de sensibilización en comparación con el tiempo de sensibilizado. [23]

Además se encontró corrosión intergranular y corrosión transgranular en la zona afectada por el calor. Ver figura 2.48.



**Figura 2.48.** Corrosión intergranular y transgranular en la zona afectada por el calor. [23]

Y por el contrario, como se puede ver en la figura 2.49 la corrosión interdendrítica localizada en el botón de la soldadura, decrece cuando se

incrementa el tiempo de sensibilización. Debido a el gradiente de temperatura es mayor en el botón que en la zona afectada por el calor. Además de obtener ferrita delta que es favorable para evitar la fractura en caliente pero limita la resistencia a la corrosión del botón de soldadura. [23]

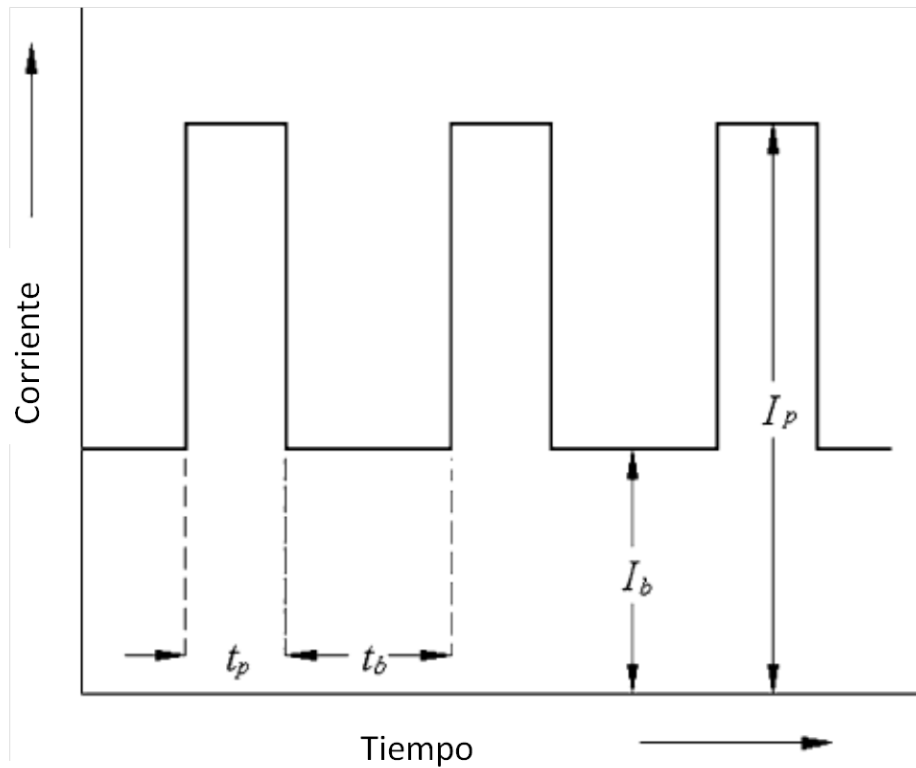


**Figura 2.49.** Corrosión interdendrítica en el botón de la soldadura. [23]

### 2.5.2.2 SOLDABILIDAD DE ACEROS AUSTENÍTICOS INOXIDABLES POR GMAW

Normalmente cuando se desea soldar láminas muy delgadas de metal se utiliza una variación del proceso GMAW, este proceso se denomina P-GMAW por sus siglas en inglés Pulsed GMAW es decir que el arco no es constante si no que es pulsado, una de las ventajas que tiene este proceso es la transferencia por espreado con una corriente baja. Los parámetros principales de esta variación del proceso GMAW, pico de corriente ( $I_p$ ), corriente de fondo ( $I_b$ ), tiempo de pulsado ( $t_p$ ), tiempo fuera de pulso ( $t_b$ ), y frecuencia de pulso ( $f$ ). Ver figura 2.50.





**Figura 2.50.** Diagrama tiempo corriente en el proceso P-GMAW. [24]

La corriente pulsada reduce la entrada de calor en general, sin ninguna salpicadura, es una variación del proceso de corriente constante el cual involucra un ciclo donde la corriente de soldadura va de un nivel alto a uno bajo a una frecuencia regular seleccionada, este proceso funciona por la formación de una gota de metal fundido en la punta del electrodo por el efecto del pulso.

La correcta cantidad de corriente es agregada para empujar la gota de metal fundido dentro del charco de soldadura. El tiempo de apagado es inversamente proporcional a la magnitud de pico de corriente.

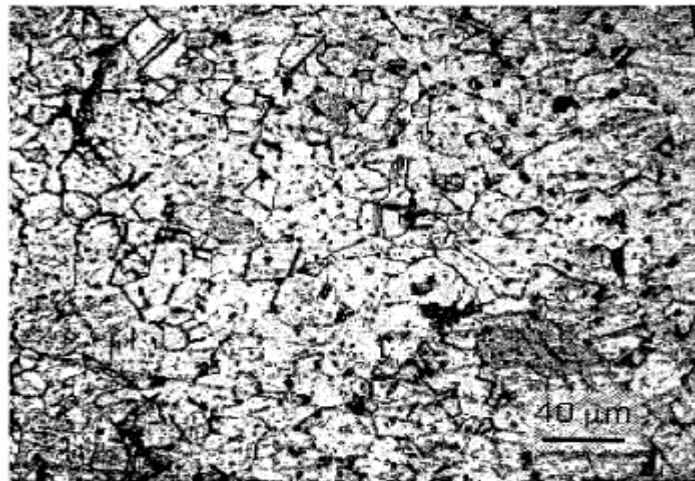
El alto nivel del pico de corriente es generalmente seleccionada para obtener una adecuada penetración y refuerzo de raíz, mientras que un bajo nivel de corriente de fondo, es establecida a un nivel suficiente para mantener un arco estable, en contraste con la soldadura de corriente constante la energía de calor requerida para fundir el material base es suministrada durante el pico de corriente pulsado por pequeños intervalos de tiempo para permitir que el calor

se disipe dentro del material base permitiendo una delgada zona afectada por el calor. [24]

Kamal Pal (2011) [24] encontró que al utilizar proceso P-GMAW para soldar acero inoxidable con una frecuencia de 1-500 Hz una estructura austenítica celular aparecerá en el centro de la zona de fusión y una estructura columnar austenítica aparecerá en el límite de fusión, las cuales serán onduladas debido a la pulsación del arco.

La formación de perlita indica una conversión parcial del acero inoxidable a acero al carbono debido al movimiento colectivo del charco por la acción pulsante. Sin embargo la completa conversión en acero inoxidable ha sido lograda con un diámetro grueso del material de aporte y una frecuencia de pulsado alta, debido a la consecuencia acumulativa de fusión múltiple con baja dilución.

Han existido muchos esfuerzos por mantener el contenido de la ferrita delta dentro de la soldadura de aceros inoxidables para prevenir la fractura en caliente, tales como la adición de nitrógeno (estabilizador de austenita). Sin embargo la corriente de pulsado decrece con la adición de nitrógeno dado a la menor energía de ionización del nitrógeno que el argón puro. Ver figura 2.51. [24]



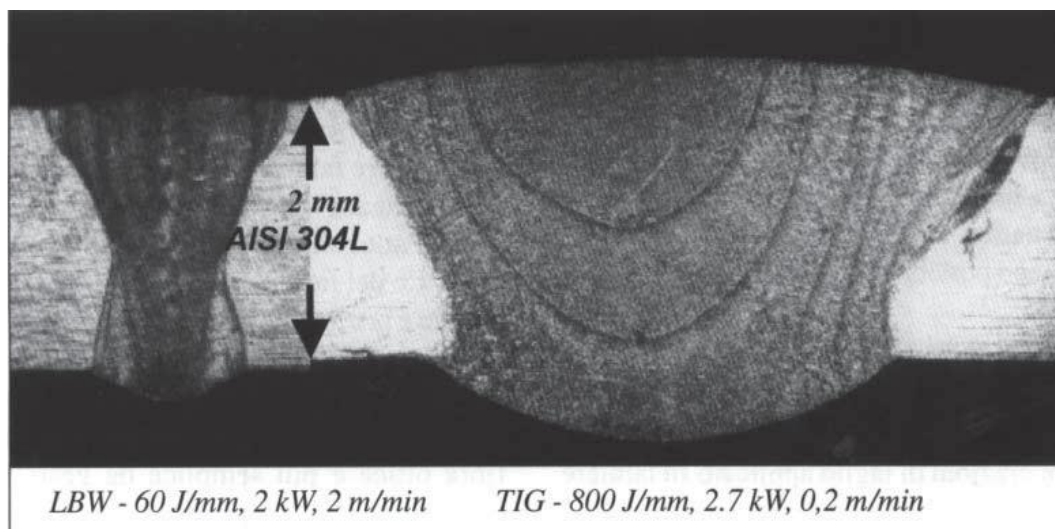
**Figura 2.51.** Microestructura de soldadura de acero inoxidable 316L, matriz austenítica con trazos de ferrita. [24]

### 2.5.2.3 SOLDABILIDAD DE ACEROS AUSTENITICOS INOXIDABLES POR SOLDADURA LÁSER (LBW)

Penasa y Rivela (2010) [25] descubrieron que en términos generales de soldabilidad la zona de fusión de estos aceros es una microestructura austenita-ferrita a temperatura ambiente. La presencia de ferrita se hace más importante cuando más rápido es el enfriamiento en campos superiores de temperatura de 1250 °C. La estructura final que resulta es dendrítica con ferrita y austenita. A pesar de que el contenido de carbono es bajo, pueden formarse carburos y ser precipitados durante el enfriamiento en la zona de fusión y en la zona de afectada por el calor, las cuales serían precipitados de cromo en los límites de los granos y carburos de niobio o titanio serían precipitados en el cuerpo de los granos. [25]

También hay que poner mayor atención cuando estos aceros tengan un alto contenido de aglutinantes como lo son el selenio o el azufre los cuales tienden a causar fracturas en caliente. Estos aceros tienen un tercio de conductividad térmica que los aceros al carbono y una alta absorción de la radiación de láser. Como resultante, usando los mismos parámetros, la penetración de láser es más alta en aceros inoxidable austeníticos que en aceros al carbono. [25]

Aparte de la facilidad de soldadura, el láser es particularmente utilizado para unir aceros inoxidable debido a que la entrada de calor y su velocidad de avance reduce el tipo de daño metalúrgico que puede debilitar la resistencia a la corrosión de la zona de fusión. [25] Ver figura 2.52.



**Figura 2.52.** Comparación de la zona de fusión de un acero 304L por los procesos LBW y TIG. [25]

De hecho si estos aceros son mantenidos a temperaturas entre 450 y 870 °C durante largos periodos de tiempo, carburos de cromo empezaran a precipitar en los límites de los granos reduciendo la resistencia a la corrosión, lo cual también pasa cuando se utiliza una técnica de alta entrada de calor.

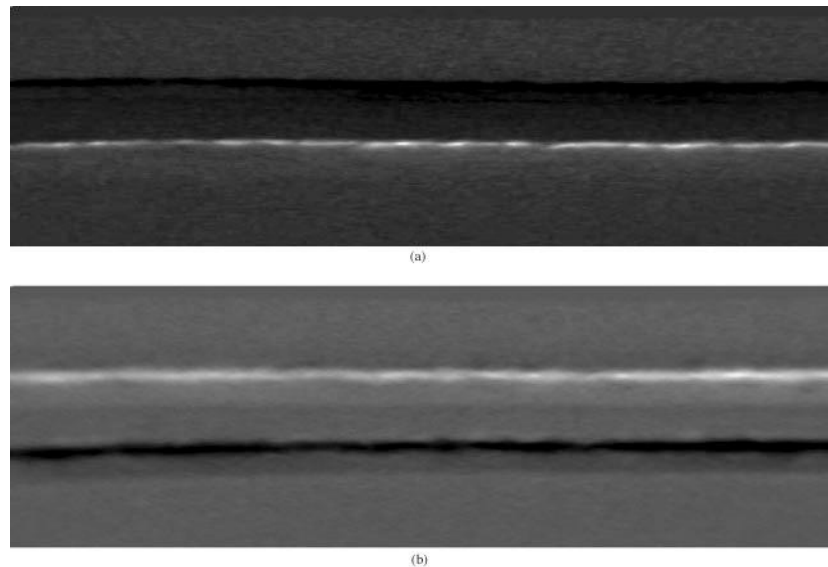
Otras de las ventajas de las técnicas de láser es una baja distorsión del material, los aceros austeníticos inoxidable tienen un coeficiente térmico 50% más alto que le de los aceros al carbono y este factor junto con una baja conductividad térmica causan expansión no uniforme y distorsión si se utiliza un proceso de alta entrada de energía como los procesos de arco. [25]

Por ejemplo el láser PIL ofrece mucha más luminosidad que los láser de CO<sub>2</sub> y YAG además de que te permite reducir los problemas típicos de soldadura por los otros dos láseres en láminas delgadas como lo son pérdida de material por evaporación, contaminación, porosidad, discontinuidad del cordón, inclusiones, distorsiones, esfuerzos residuales, falta de fusión y socavados. [26]

Farid y Morian (2010) [26] soldaron laminas de acero inoxidable 316 de 0.1 mm de espesor y de 150 mm X 50 mm en la configuración a traslape, debido a que la configuración a tope no es muy recomendada para este espesor. La composición química de este acero es la siguiente (16%Cr-13%Ni-2.5%Mo-

0.08%C), ellos encontraron una muy pequeña zona afectada por el calor. Con el fin de incrementar la velocidad de soldadura se agregó una pequeña cantidad de argón, como gas de protección a la soldadura.

También el oxígeno permite aumentar la velocidad de soldadura, incrementa la dureza y elimina las discontinuidades de la soldadura. Sin embargo las pruebas de tensión indicaron que el oxígeno reduce la capacidad de carga de la soldadura por las formaciones de inclusiones de oxígeno. [26] Ver figura 2.53.



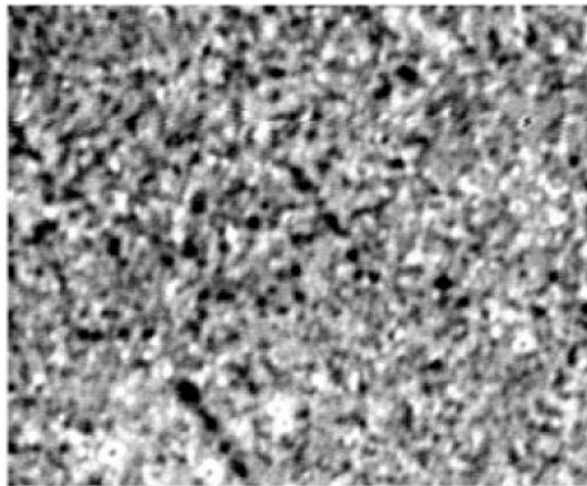
**Figura 2.53.** Sección transversal de soldadura en comparación con la eliminación de las turbulencias por la adición de oxígeno a el gas de protección. [26]

Tres factores contribuyen al mejoramiento de la resistencia y dureza de las uniones por láser PIL: estructura fina celular asociada con una rápida solidificación, estrecha zona afectada por el calor y fases presentes en la microestructura. La zona de fusión de las uniones realizadas con láser PIL exhiben estructuras extremadamente finas por un alto G/R asociada con una rápida solidificación, la zona afectada por el calor al ser muy estrecha previene los indeseados defectos de grano grueso y esfuerzos residuales. [26]

Las uniones realizadas con láser PIL contienen una microestructura completamente austenítica en la zona de fusión Ver figura 2.54, se cree que esto es debido a que el rápido enfriamiento genera un gran sobre enfriamiento

que inhibe la formación de ferrita, hay que recordar que aunque la ferrita ayuda a prevenir los problemas de fractura en caliente en la soldabilidad de los aceros austeníticos inoxidable, disminuye la capacidad de estos aceros contra la corrosión, por lo tanto es deseable producir estructuras completamente austeníticas sin fracturas en caliente por lo cual la soldadura con láser PIL sería una excelente opción.

Las uniones realizadas con láser PIL no padecen ruptura en caliente a pesar de la ausencia de ferrita debido a que el rápido enfriamiento minimiza la segregación de impurezas y produce un tamaño de grano fino. [26]



**Figura 2.54.** Microestructura austenítica en zona de fusión de acero 316 unido por láser PIL.[26]

#### 2.5.2.4 SOLDABILIDAD DE ACEROS AUSTENÍTICOS INOXIDABLES POR EL PROCESO FSW

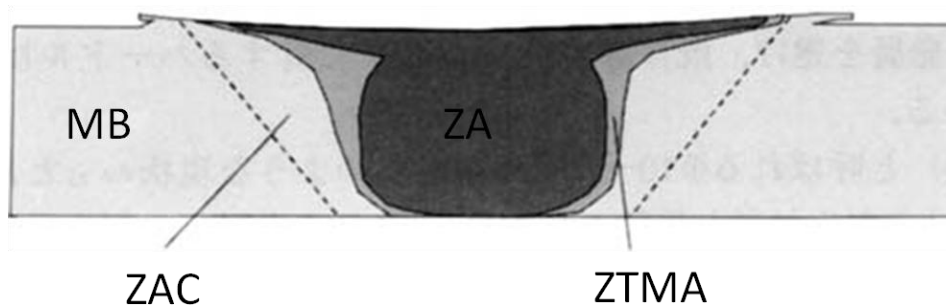
Las investigaciones de soldadura por fricción agitación son mucho menores en aceros en comparación a las que existen en aluminio aunque ya existe un gran interés en la investigación de este proceso aplicado en los aceros martensíticos y doble fase en los TWIP existe nula información, la principal causa es que no existen adecuadas herramientas para la unión de estos materiales.

Los requerimientos para estas herramientas de unión son una alta resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste. Aleaciones de tungsteno carburo

cementado y aleaciones de molibdeno fueron empleadas como materiales de herramientas durante el incipiente inicio de la investigación de FSW en aceros. Sin embargo existía una marcada ocurrencia de abrasión y deformación de las herramientas de estas herramientas de soldadura, las cuales sucedían durante la inserción de la herramienta en el material.

Recientemente herramientas cerámicas han sido empleadas, buenos resultados han sido mostrados en investigación de FSW con aceros utilizando herramientas de nitruro de boro cúbico poli cristalino (PCBN), el cual tiene una mayor resistencia al desgaste. Las uniones realizadas con herramientas elaborados con este material muestran una óptima resistencia a pesar de que la temperatura de unión de los aceros austeníticos inoxidables y las aleaciones base níquel es alrededor de  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a lo cual el herramental no presentó abrasión. [27]

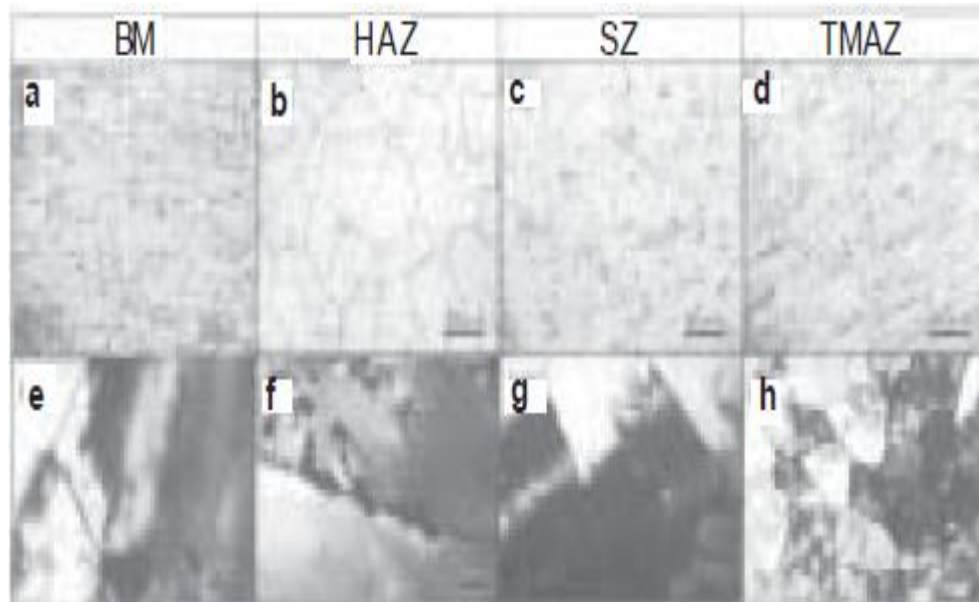
En la figura 2.55 se muestra la sección perpendicular a la dirección de la soldadura. La cual muestra que existe formación de hondas perfectas en el zona de unión.



**Figura 2.55.** Sección transversal de área de unión de acero 304 unido por FSW. [27]

En la figura 2.56 se muestra el material base, el cual presenta una estructura recocida de baja densidad de dislocación y el porcentaje de tamaño de grano es aproximadamente de  $20\text{ }\mu\text{m}$ , por el contrario carburos de cromo de alrededor  $100\text{ nm}$  fueron formados en los límites de granos de la zona afectada por el calor por lo cual se asume que existe un sensibilización.

La zona agitada fue refinada en comparación con el metal base y posee una estructura de grano equiaxial recristalizada, en promedio 14mm. Por el contrario la zona afectada termomecánicamente, presenta una relativa densidad de dislocación al igual que muchos sublímites de grano. [27]



**Figura 2.56.** Sensibilización en área de soldadura de acero 304 unido por FSW. [27]

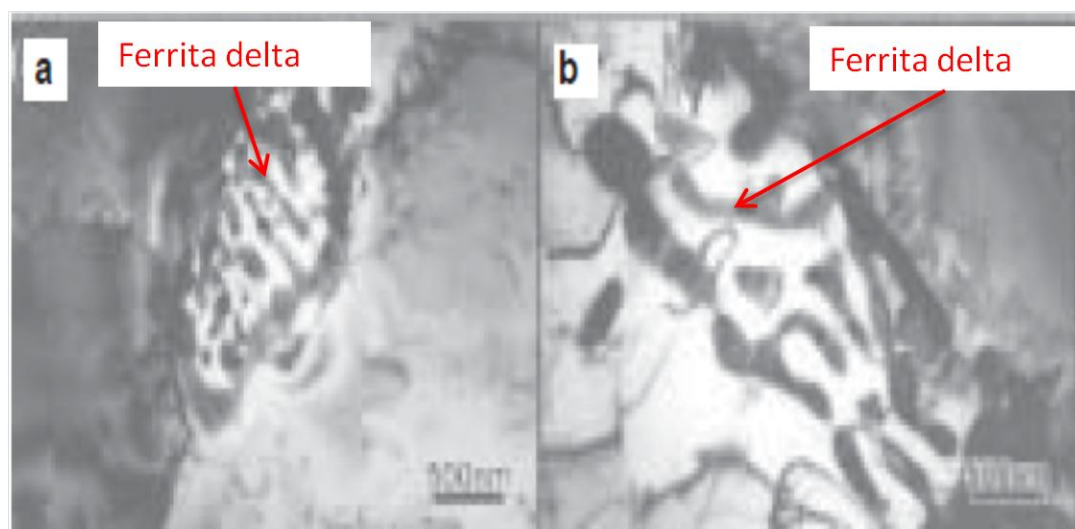
Park y sus colaboradores (2010) encontraron que la fase sigma es formada rápidamente en el lado de avance en la zona de agitación en la soldadura del acero 304 por el proceso FSW. Se reconoce en general que la precipitación de la fase sigma de la fase austenítica, requiere una larga duración entre los 500 y 800 °C. Se cree que es poco probable que se esta fase se forme durante periodos muy cortos como lo es el proceso de soldadura.

La formación de ferrita delta a altas temperaturas durante el proceso de soldadura FSW es considerada como la causa por la cual la formación de la fase sigma es acelerada. La fase sigma es susceptible a ser formada en la interfase de la ferrita delta y la austenita por la fluctuación del contenido de cromo.

La temperatura máxima de calentamiento en la zona de agitación es un poco más que 1200 °C y existe suficiente posibilidad para que la ferrita delta sea



formada por un intervalo pequeño de tiempo como se puede ver en la figura 2.57.



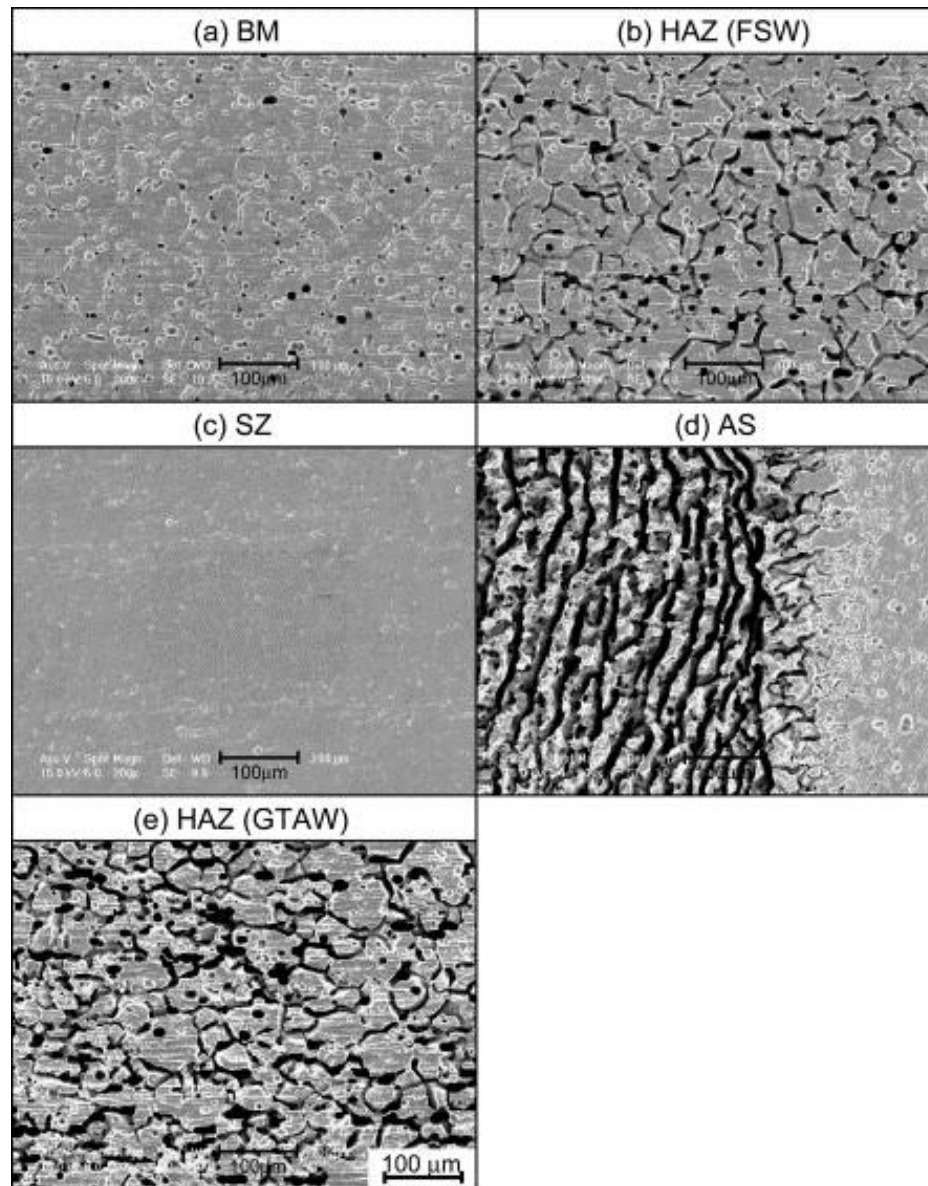
**Figura 2.57.** Ferrita delta en la zona de agitación de acero 304 unido por FSW a) 100 X b) 200 X. [27]

Entonces se asume que la formación de fase sigma es acelerada a la formación de ferrita delta. En la zona de agitación en adición con el calentamiento por fricción y un intenso flujo plástico causados por la rotación de la herramienta, hay una posibilidad para que estructuras de dos fases de ferrita delta y austenita, formadas durante el proceso de FSW, sean movidas hacia el lado de avance por el efecto de la agitación.

Cuando la temperatura este en el rango entre 500 – 800 °C durante el proceso de enfriamiento se asume que la ferrita delta se descompone dentro de la fase sigma y austenítica, para que esto ocurra se requiere un tiempo mayor de 30 minutos. Por el contrario los autores también encontraron que la formación de la fase sigma es facilitada por la alta resistencia y recristalización. [27]

Como ya vimos en los procesos anteriores uno de los problemas que existen al soldar aceros austeníticos inoxidable es la pérdida de la resistencia a la corrosión, Park y sus colaboradores (2010) [27] también soldaron laminas por el proceso GTAW para compararlas con el proceso de fricción agitación, ellos encontraron que la corrosión intergranular en la zona afectada por el calor del

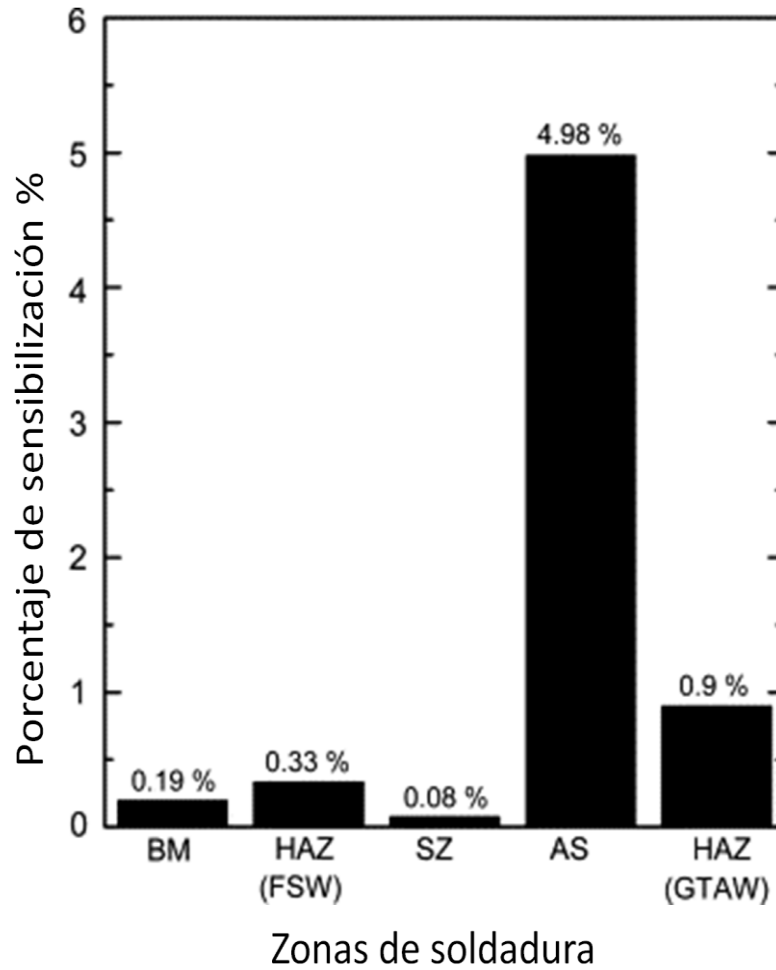
proceso FSW es despreciable en comparación con la soldadura por el proceso de fusión. Por el contrario los límites de grano del lado de avance de la zona de agitación estaban profundamente corroídos y la resistencia a la corrosión degradada. Ver figura 2.58. [27]



**Figura 2.58.** Grados de sensibilización de acero 304 unido por FSW y GTAW. [27]

El grado de sensibilización en el metal base es bajo, el grado de sensibilización en la zona afectada por el calor es ligeramente más alto que el del metal base pero indica un valor de aproximadamente un valor de 1/3 de la zona afectada por el calor del proceso de fusión. Se hace evidente que la sensibilización en la

zona afectada por el calor del proceso FSW fue es significativamente moderado. Por el contrario el grado de sensibilización del lado de avance es aproximadamente del 5% y es notablemente mayor. Ver figura 2.59. [27]



**Figura 2.59.** Porcentajes de sensibilización de acero 304 unido por FSW y GTAW. [27]

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

Debido a la necesidad de hacer más eficiente el consumo de energía actualmente se requieren elementos estructurales con menor peso pero mayor resistencia, por tal motivo se ha comenzado el desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia, en los cuales es posible utilizar espesores de material más delgado, logrando; en el caso de los automóviles, que las unidades requieran de un menor consumo de combustible para desplazarse sin sacrificar la seguridad.

Este tipo de aceros se clasifican de acuerdo al tipo de microestructura, propiedades mecánicas y parámetros de formabilidad, además que también son clasificados en primera, segunda y tercera generación dependiendo del orden de aparición en el mercado.

Actualmente en las carrocerías de los automóviles se están utilizando acero martensíticos o TRIP los cuales se pretende que sean unidos con los aceros TWIP y estos al ser lo último en aceros avanzados de alta resistencia, existe un desconocimiento de los efectos en la calidad del producto cuando sean unidos por un proceso ya sea de fusión o de estado semisólido.

Debido al espesor de la lámina utilizado en la industria automotriz los procesos más utilizados para unión de metales son el proceso GMAW, RSW y LBW. Ya que son procesos que tienen una alta tasa de productividad debido a que pueden ser fácilmente automatizados. Tienen también poca afectación térmica en comparación de otros procesos.

Los aceros TWIP son aceros altamente aleados con alto contenido de manganeso por lo general alrededor de 18% lo que ayuda a que exista martensita a temperatura ambiente de ahí el concepto de que su microestructura es completamente austenítica, se les denomina TWIP, aceros de

plasticidad inducida por maclaje. Al ser soldados esos aceros existe un endurecimiento debido a la aparición de segundas fases como la martensítica, debido al decremento del manganeso por los fenómenos de dilución segregación y evaporación.

Para poder mitigar estos defectos en la soldabilidad de estos aceros se recomienda seguir las siguientes indicaciones.

- 1.- Baja entrada de calor instantáneamente en los procesos de fusión.
- 2.- Soldar asimétricamente.
- 3.- Al realizar una soldadura disímil (TWIP-baja aleación), utilizar un material de aporte con el mismo contenido de cromo equivalente al del acero TWIP y al de baja aleación y además que el contenido de níquel equivalente debe de estar en rangos dentro del acero TWIP y baja aleación y dispersar los carbonitruros y además dificultar el crecimiento de grano en la zona de fusión y en la zona afecta por el calor.

En el caso de la soldadura por láser las placas deben ser cortadas de preferencia con láser o agua, debido a que cualquier imperfección en la geometría del material el momento de soldar en la configuración a tope existirá una falta de fusión del material.

Con respecto a la soldabilidad de los aceros austeníticos inoxidables se puede decir que la calidad de la unión depende principalmente a la cantidad de calor que se aplica o al material de aporte a utilizar el cual debe ser un material que promueva la formación de la fase austenítica. También es de vital importancia recordar que estos aceros llegan a perder resistencia a la corrosión si se les calienta en demasía por largos periodos de tiempo es por eso que se debe tener mayor cuidado con los tipos de procesos que se utilizan para unirlos, en la bibliografía se encontró que los proceso de fusión (Láser, GMAW) por su naturaleza son los que disminuyen mas la resistencia la corrosión, después el proceso de resistencia (RSW) y por último el de estado semisólido (FSW), esto debido al poco aporte térmico que tiene este proceso en comparación con los

tres anteriores. Para poder minimizar los problemas ocasionados por el alto aporte térmico se recomienda utilizar en lugar de un sistema de corriente constante un sistema de corriente pulsante o rectificación de corriente, esto para los casos de los procesos de fusión.

# CAPÍTULO 4

## CASO DE ESTUDIO

Para la realización del caso de estudio se utilizó dos tipos de acero TWIP y austenítico inoxidable 304L, el acero TWIP tiene un esfuerzo mínimo de tensión de 1162 Mpa y 600 de esfuerzo a la cedencia con un espesor de 1.274 mm, el acero austenítico inoxidable 304L tiene 310 Mpa mínimo de esfuerzo de tensión y 490 Mpa de esfuerzo de cedencia mínimo, también con un espesor de 1.5 mm. A continuación se presentan las figuras con los análisis químicos de estos aceros.

**Composición química (en %)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,00 19,50	-	8,00 10,50

**Figura 4.0.** Composición química de acero austenítico inoxidable 304L. [28]

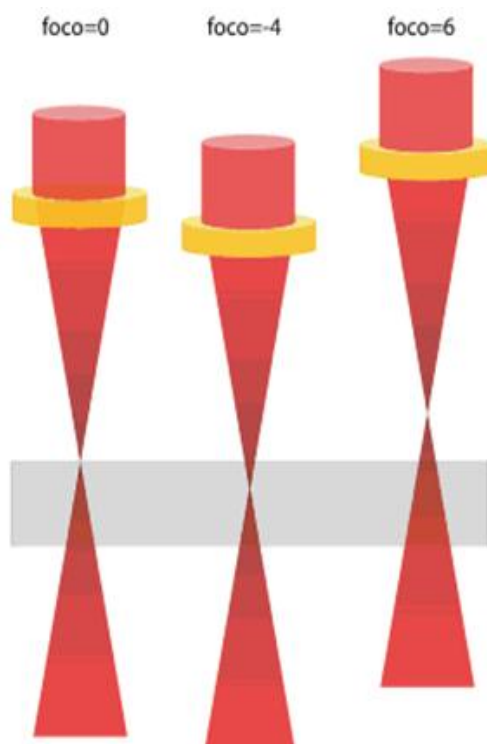
Material	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Ni (%)	Cr (%)	Ti (%)	Cu (%)	S (%)	Mo (%)
<b>TWIP</b>	0.61	15.40	0.057	≤0.05	00.28	0,008	0.10	0.010	0.002	0.002

**Figura 4.1.** Composición química de acero TWIP. [29]

### 4.1 DETERMINACION DE VARIABLES

De acuerdo con el estado del arte para el proceso de soldadura por láser aplicado en unión de aceros, las principales variables del proceso son: Potencia (watts), velocidad de avance (mm/seg o mm/min) y posición del foco o focal. El foco es el mayor punto de concentración de energía, dicho punto está igual a la

distancia focal desde la cara inferior de la lente. Sin embargo la posición que dicho punto adquiera dentro del espesor de la lámina posibilitará la realización de una buena o mala soldadura. Para ello la posición del punto focal suele representarse con un valor numérico, que si es positivo, indica que dicha concentración del haz está situado tantos milímetros como indique el valor numérico por encima de la cara superior de la lámina. El valor cero corresponde a que la concentración del haz esta exactamente en la cara superior de la lámina y los valores negativos dan a entender cuantos milímetros hay que introducir la concentración del haz en el diámetro de la placa. Ver figura 4.2.



**Figura 4.2.** Focal de Laser. [29]

## 4.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE SOLDADURA

Para la elaboración de las probetas de soldadura, se utilizaron placas de acero inoxidable 304 de 100 X 200 X 1.5 mm y acero TWIP de 177.8 X 25.4 X 1.5 mm. En la tabla 4.1 se muestran los parámetros utilizados en la unión de las placas de acero inoxidable.



**Tabla 4.0.** Parámetros de soldadura para acero inoxidable 304L.

PARÁMETRO	VALOR
Potencia	4 Kilowatts
Velocidad	85 mm/s
Focal	+ 3 mm

Para la unión del acero TWIP en el láser de Yag se utilizaron los parámetros mostrados en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Parámetros de soldadura para acero TWIP.

PARÁMETRO	VALOR
Potencia	4 Kilowatts
Velocidad	75 mm/s
Focal	+ 3 mm

Las probetas de soldadura fueron realizadas con el siguiente equipo: Fuente láser DY044 de ROFIN, láser de Nd: YAG bombeado por diodos de 4,4kW de potencia máxima y una calidad de haz de 12mm×mrad. El haz láser emitido por la fuente se acopló a una fibra óptica de 400 micras de diámetro, y se condujo por ella a una de las dos celdas de procesamiento, que por motivos de seguridad son contenedoras de la luz del láser empleado. La fibra óptica permite guiar la luz del láser hasta el cabezal de soldadura colocado en la muñeca de un robot ABB 6600 175/2.8. El cabezal de soldadura consta principalmente de una óptica de colimación y de una óptica de focalización. Se ha utilizado una óptica de focalización de 200mm que permite enfocar toda la potencia del haz láser en un punto de diámetro mínimo 0,4mm. En la figura 4.3 se muestra una imagen de la instalación láser de la fuente láser de Nd:YAG.



**Figura 4.3.** Láser Nd:YAG rofin en CAL AIMEN.

## 4.3 EVALUACIÓN DE UNIONES SOLDADAS

Para la evaluación de las uniones de soldadura se utilizó una probeta de tensión, microdureza y 2 metalografías para el acero TWIP, cabe señalar que por la limitante de la poca cantidad de material que se contaba no se pudieron realizar más probetas de soldadura por ende tampoco fue posible realizar más pruebas. Para el acero inoxidable 304 se realizaron tres ensayos de tensión, los cuales se realizaron con una máquina universal MTS 250 Kn. y dos ensayos de metalografía por microscopía óptica.

### 4.3.1 PRUEBA DE TENSIÓN

Este ensayo consiste en someter las láminas unidas por el cordón de soldadura a una prueba de tensión, en una máquina universal de pruebas mecánicas y registrar la carga máxima aplicada hasta la ruptura de la probeta, para que la evaluación sea exitosa la probeta debe de fracturar en el material base.

### 4.3.2 PRUEBA DE MICRODUREZA

Con este ensayo se obtiene un perfil de microdurezas en forma diagonal a intervalos de 0.4 mm o menor. Para el caso de estudio realizado en este trabajo

esta prueba se realizó de forma longitudinal a la probeta por el espesor tan reducido.

### 4.3.3 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Este ensayo consiste cortar la zona de fusión, ZAC y material base y realizar la preparación metalográfica correspondiente para el análisis de la morfología de de la microestructura en las zonas antes mencionadas.

### 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Los ensayos de tensión realizados a las probetas de acero inoxidable 304L soldadas por láser de Nd:YAG, fracturaron por el metal base pero la probeta de acero TWIP fracturó por la soldadura, debido a la alta microsegregación esta a consecuencia del rápido proceso de enfriamiento inherente al proceso de soldadura por láser, como se podrá verificar en las metalografías posteriores. Ver tablas 4.2 y 4.3.

**Tabla 4.2.** Resultados de ensayo de tensión en acero 304L.

Identificación	Espesor	Ancho	Sección	Resistencia a la tracción (Rm)	Identificación
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	MPa	
AC1Nd:YAG-1	1.48	25.091	37.13	347	Metal base
AC1Nd:YAG-2	1.48	25.088	37.13	349	Metal base
AC1Nd:YAG-3	1.48	25.066	37.1	348	Metal base
Incertidumbres (K=2)	3.00%				

**Tabla 4.3.** Resultados de ensayo de tensión en acero TWIP.

Identificación	Espesor	Ancho	Sección	Resistencia a la tracción (Rm)	Zona de rotura
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	MPa	
103589-01	1.214	25.038	30.40	572	Soldadura
Incertidumbres (K=2)				3.0 %	

En lo que respecta al análisis metalográfico, en el acero inoxidable 304L se presenta ZAC muy angosta, la cual presenta una composición ferrítica que puede observarse en la Figura 4.4.



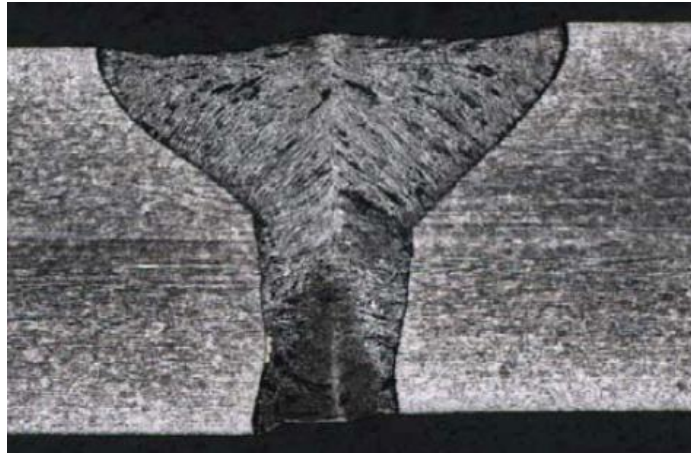
**Figura 4.4.** Microestructura en la línea de fusión del acero 304L con láser de Nd:YAG 100X

En el caso de la zona de fusión existe una microestructura ferrítico austenítica, habría que determinar en qué cantidad se presenta cada una de las fases para poder medir el grado de sensibilización presente, aunque se puede ver que en la zona de fusión es mayor la sensibilización intergranular y en la zona afectada por el calor es mayor la corrosión transgranular. Ver figura 4.5.



**Figura 4.5.** Microestructura en la zona fundida del acero 304L 100X.

Continuando con los aceros inoxidable se muestra el cordón soldado con láser de CO<sub>2</sub> en el cual se aprecia una adecuada morfología geométrica, a pesar de la presencia de un ligero des alineamiento entre las láminas que conforman la unión a tope, Ver figura 4.6.



**Figura 4.6.** Metalografía de acero inoxidable 304L, con láser de Nd:YAG 10X

En el caso del acero TWIP, solo se soldó mediante tecnología Nd:YAG (se seleccionó por ser la tecnología empleada de forma habitual para soldadura en el sector automotriz, mercado nicho de este tipo de material de ultra-alta resistencia) debido a la limitación de material que se contaba para ello. Como ya se mencionó previamente, la probeta de tracción fracturó en la zona de fusión, debido probablemente a la formación de bandas de ferrita columnar por el rápido enfriamiento inherente en el soldeo láser y la dilución y segregación del manganeso lo que hace que no exista una coacción de grano debilitando la unión, en la zona de fusión, ver Figura 4.7.



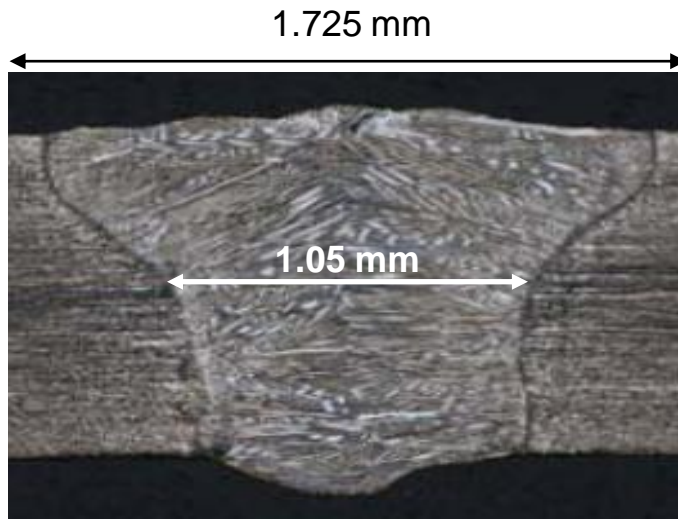
**Figura 4.7.** Microestructura en la zona fundida del acero TWIP 200X

En este material, se presenta una zona afectada por el calor muy fina, y el tipo de grano presente hace prever una menor dureza respecto a la zona de fusión, Ver Figura 4.8.



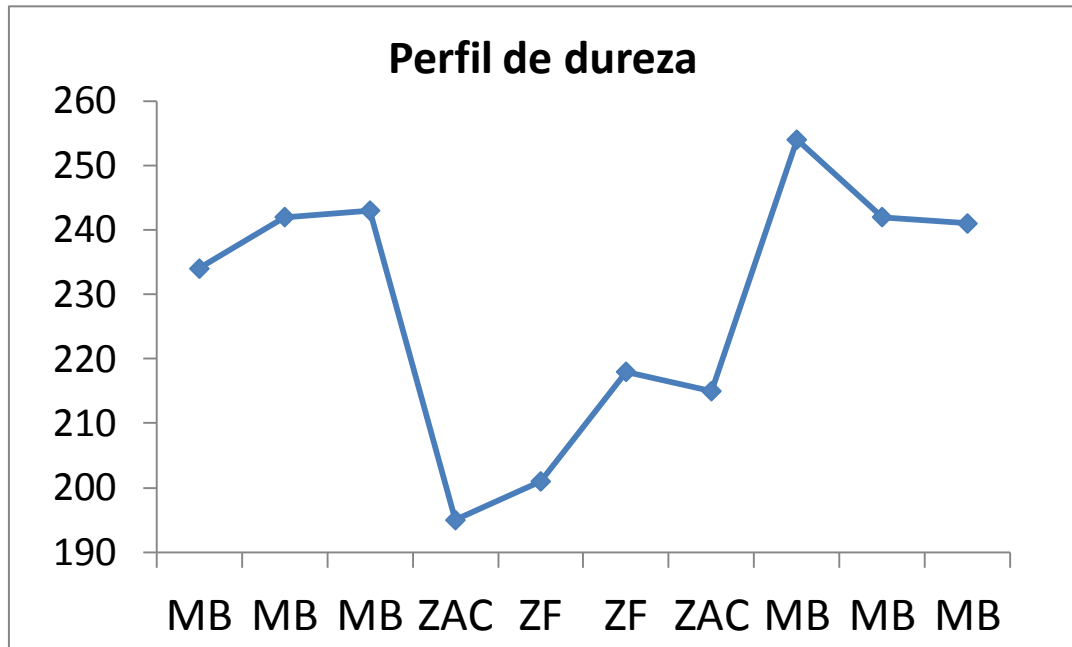
**Figura 4.8** Microestructura en la línea de fusión del acero TWIP 200X

Continuando con las metalografías del acero TWIP, se pueden observar las dimensiones del cordón láser, tanto del ancho en la cara (1,7mm) como en la zona intermedia del espesor (de aproximadamente 1mm). Ver figura 4.9.

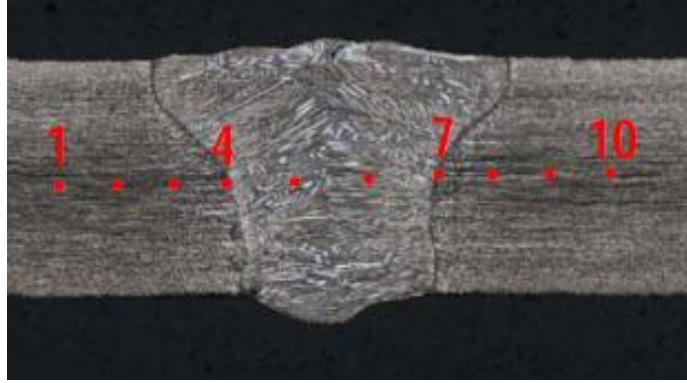


**Figura 4.9.** Dimensiones de ancho de cara y zona intermedia de zona de fusión en acero TWIP 10X.

A continuación se presenta los resultados de microdureza realizados a la soldadura del acero TWIP y la posición de cada uno de los puntos de medición durante el ensayo. Ver figura 4.10. y 4.11.



**Figura 4.10.** Resultados de microdurezas en acero TWIP.



**Figura 4.11.** Zonas de indentados para microdureza de acero TWIP



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

- 1.- Los aceros inoxidables austeníticos pueden ser soldados por cualquier proceso que se mencionó en este trabajo monográfico, como lo son los de fusión MIG, láser, resistencia y estado semisólido fricción agitación.
- 2.- No mantener por largos periodos de tiempo dentro de los rangos de temperatura de 450 y 850 °C.
- 3.- Utilizar un material de aporte que promueva la fase austenítica.
- 4.- Los aceros TWIP, son soldables siempre y cuando exista un aporte instantáneo de bajo aporte térmico en la zona de fusión.
- 5.- Para prevenir la formación de martensita o ferrita columnar en la zona de fusión que es de los máximos problemas que se presenta al soldar aceros TWIP, se puede agregar un material de aporte que promueva la fase austenítica o aplicar un postcalentamiento.

## Bibliografía:

- [1]. Jacek Senkara 2011. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding. *Welding International* [Internet]. [cited 2011 Dec 10]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2011.600028>
- [2]. Ding Hao, Ding Hua Qiu Chun-lin, Tang Zhang-you, Zeng Jian-min, YANG Ping 2011. Formability of TRIP/TWIP Steel Containing Manganese of 18.8%. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2011, 18(1): 36-40. [Internet]. [cited 2011 Dec 13]; Available from: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [3]. Kwansoo Chung, Kanghwan Ahn, Dong-Hoon Yoo, Kyung-Hwan Chung, Min-Hong Seo, Sung-Ho Park 2010. Formability of TWIP (twinning induced plasticity) automotive sheets. *International Journal of Plasticity* 27 (2011) 52–81, [Internet]. [cited 2011 Dec 2]; Available from: [www.elsevier.com/locate/ijplas](http://www.elsevier.com/locate/ijplas)
- [4]. O. Bouaziz S. Allain C.P. Scott P. Cugy D. Barbier 2011. High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 15 (2011) 141–168. [Internet]. [cited 2011 Dec 1]; Available from: [www.elsevier.com/locate/cossm](http://www.elsevier.com/locate/cossm)
- [5]. S. Maggi, M. Murgia 2008. Introduction to the metallurgical characteristics of advanced high-strength steels for automobile applications. *Welding International*, 22:9, 610-618. [Internet]. [cited 2011 Dec 17]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/09507110802413001>
- [6]. Kou, Sindo. 2003. *Welding metallurgy* second edition. Hoboken, New Jersey. p. 1-29.
- [7]. Rodríguez A. Z. 2011. Caracterización y determinación del porcentaje de fases mediante la técnica metalográfica “*Color tint teching*” para acero trip800

soldado por proceso GMAW y laser  $\text{CO}_2$  [disertación]. [Saltillo Coahuila]: Instituto Tecnológico de Saltillo. p. 23,28-34.

**[8].** Juan Francisco Buendía Guía. 2010. Reparación de aceros avanzados AHSS unidos mediante procesos de soldadura por arco eléctrico. [disertación]. [Saltillo Coahuila]: Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S. A de C. V. p. 50-56.

**[9].** Víctor Hugo López Cortez. 2009. Soldabilidad de Aceros avanzados de alta resistencia AHSS martensíticos mediante soldadura de puntos por resistencia RSW en componentes automotrices. [Disertación]. [Saltillo Coahuila]: Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S. A de C. V. p. 1-3, 43-52.

**[10].** Wei Liu, Runjiao Wang, Junlei Han, Xiangyang Xu, Qiang Li. 2010. Microstructure and mechanical performance of resistance spot-welded cold rolled high strength austenitic stainless steel. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1956–1961. [Internet]. [cited 2011 Dec 3]; Available from: [www.elsevier.com/locate/jmatprotec](http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec).

**[11].** L. Mujica, S. Weber, H. Pinto, C. Thomy, F. Vollertsen. 2009. Microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of TWIP and TRIP steels. Materials Science and Engineering A 527 (2010) 2071–2078. [Internet]. [cited 2011 Dec 3]; Available from: [www.elsevier.com/locate/msea](http://www.elsevier.com/locate/msea).

**[12].** Friction Stir link. 2010. FRICTION STIR WELDING PROCES [Internet]. [cited 2011 December 22]; 11:00. Available from: <http://www.frictionstirlink.com/desc.html>

**[13].** Jody N. Hall. 2011. Evolution of Advanced High Strength Steels in Automotive Applications. General Motors Company Chair, Joint Policy Council, Auto/Steel Partnership. 2011. 20,23,25. [Internet]. [cited 2011 Dec 11]; Available from: [www.autosteel.org](http://www.autosteel.org)

**[14]** An F, Earley R, Green-Weiskel L. 2011. global overview on fuel efficiency and motor vehicle emission standards: policy options and perspectives for international cooperation. united nations department of economic and social affairs commission on sustainable development nineteenth session: 1-3.

**[15]** Lauro A, Mandina M. 2010. Welding and weldability of the 'super-austenitic' and 'supermartensitic' stainless steels. *Welding International*, the Italian Welding Institute of Genoa. 2010, 20(9): 710-720. [Internet]. [cited 2011 Dec 9]; Available from: <http://www.tandfonline.com/loi/twld20>

**[16]** Lauro A, Mandina M. 2010. Welding and weldability of the 'super-austenitic' and 'supermartensitic' stainless steels. *Welding International*, the Italian Welding Institute of Genoa. 2010, 20(9): 710-720. [Internet]. [cited 2011 Dec 9]; Available from:

**[17]** Donal R. Askeland. 1998. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Internatioinal Thompson editores. 1998.

**[18]**. L. Mújica, S. Weber, W Theisen. 2011. Welding of twinning-induced plasticity steels. *Scripta Materialia* xxx (2011) xxx–xxx. [Internet]. [cited 2011 Dec 3]; Available from: [www.elsevier.com/locate/scriptamat](http://www.elsevier.com/locate/scriptamat)

**[19]**. R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia. 2008. Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Progress in *Materials Science* 53 (2008) 980-1023.

**[20]**. AWS. 2007. D8.8 Specification for automotive weld Quality-Arc welding of the steel. AWS (2012) 12-25.

**[21]**. AWS. 1997. *Welding Handbook*. AWS (2012) capitulo 12 y 25.

**[22].** U bernabai, A brotzu. 2011. Analysis of the problems in spot -welding AISI 301 high-strength austenitic stainless steels and galvanized steel plates *Reristro Italiann della Saldatura* [Internet]. [cited 2011 Nov 30]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/09507119709454426>

**[23].** Pilar De Tiedra, Óscar Martín, Manuel López. 2011. Combined effect of resistance spot welding and post-welding sensitization on the degree of sensitization of AISI 304 stainless steel *Corrosion Science* 53 (2011) 2670 2675 [Internet]. [cited 2011 Nov 30]; Available from: [www.elsevier.com/locate/corsci](http://www.elsevier.com/locate/corsci)

**[24].** Kamal Pal and Surjya K. Pal. 2011. Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: A Review. *ASM International* (20) 918-931 [cited 2012 Jun 11];

**[25].** M Penasa & C Rivela. 2010. Application of the laser welding process to low thickness stainless steels. *Rivista Italiana della Saldatura* 54 (2010) 737–747. [Internet]. [cited 2012 Jun 13]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2003.3202>

**[26].** M. FARID, P. A. MOLIAN. 2010. High-brightness laser welding of thin-sheet 316 stainless steel. *journal of materials science* 35 (2010) 3817 – 3826. [Internet]. [cited 2012 Jun 15];

**[27].** S H C Park, Y S Sato, H Kokawa, K Okamoto, S Hirano & M Inagaki. 2010. Microstructures and properties of friction stir welded 304 austenitic stainless steel *Welding International* [Internet]. [cited 2011 Dec 7]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2005.3518>

**[28]**. Thyssenkrupp Fotinox. 2007. Especificaciones técnicas de acero austenítico inoxidable 304. [Internet]. [cited 2012 Jul 12]; Available from:

<http://www.tkfortinox.com/pdf/inoxidables/austeniticos/304.pdf>.

**[29]** Alberto Cuesta Arranz. 2011. Tecnología láser y sus aplicaciones industriales. Marcombo. 2012.

**[30]**. AWS. 1999. D1.6 Structural Welding Code— Stainless Steel. AWS (2012).

**[31]**. AWS. 1998. D1.3 Structural welding code – sheet steel. AWS (2012).

# ÍNDICE DE FIGURAS:

**Figura 2.1.** Clasificación de los aceros estructurales según los conocimientos actuales. [1]

**Figura 2.2.** Clasificación de los aceros estructurales según las compañías acereras. [13]

**Figura 2.3.** Clasificación de los aceros estructurales según las compañías automotrices. [13]

**Figura 2.4.** Clasificación de los aceros estructurales según algunos autores. [13]

**Figura 2.5.** Microestructura de Martensita y Austenita retenida 100X. [1]

**Figura 2.6.** Microestructura de Bainita 100X. [1]

**Figura 2.7.** Macla. [17]

**Figura 2.8.** Diferencia entre deslizamiento y macla. [17]

**Figura 2.9.** Micro estructura aceros TWIP. [7]

**Figura 2.10.** Microestructura aceros TWIP con límites de maclas (líneas rojas). [4]

**Figura 2.11.** Microestructura de acero austenítico inoxidable 304. [10]

**Figura 2.12.** Equipo para el proceso de soldadura GMAW. [6]

**Figura 2.13.** Proceso de soldadura GMAW. [6]

**Figura 2.14.** Tipos de electrodos y corrientes utilizados en el proceso GMAW. [6]

**Figura 2.15.** Tipos de electrodos y corrientes utilizados en el proceso GMAW. [8]

**Figura 2.16.** Tipos de penetración dependiendo del gas protector utilizado en GMAW. [6]

**Figura 2.17.** Mezclas de gases protectores y sus aplicaciones en el proceso GMAW. [8]

**Figura 2.18.** Tipos de transferencia de metal utilizados en el proceso GMAW. [6]

**Figura 2.19.** Metales con sus modos de transferencia de metal y mezcla de gases para su unión por el proceso GMAW. [8]

**Figura 2.20.** Proceso de soldadura láser. [7]

**Figura 2.21.** Tipos de focalización para soldadura láser. [21]

**Figura 2.22.** Densidades de potencia asociadas a penetración. [21]

**Figura 2.23.** Método key hole. [21]

**Figura 2.24.** Redistribución de calor en el proceso de soldadura RSW. [21]

**Figura 2.25.** Ciclo de soldadura de puntos. [21]

**Figura 2.26.** Equipo básico utilizado en el proceso de soldadura RSW. [21]

**Figura 2.27.** Proceso de soldadura FSW. [12]

**Figura 2.28.** Tipos de uniones compatibles y no compatibles con FSW. [12]

**Figura 2.29.** Incremento en la temperatura por el incremento en la velocidad de rotación. [19]

**Figura 2.30.** Configuración de herramientas para FSW. [19]

**Figura 2.31.** Regiones de una soldadura por fricción agitación. A) Material Base, B) Zona afectada por el calor, C) Zona termo mecánicamente afectada, D) Botón de soldadura. [19].

**Figura 2.32.** Especificación de dimensiones de la soldadura de filete. [20]



**Figura 2.33.** Defectos más comunes en los proceso de ensamble. [20]

**Figura 2.34.** Claros en soldadura. [20]

**Figura 2.35.** Defecto de socavado en soldadura. [20]

**Figura 2.36.** Defecto de porosidad en soldadura. [20]

**Figura 2.37.** Soldadura de acero Fe–25Mn–3Al–3Si. [18]

**Figura 2.38.** Soldadura de acero TWIP disímil. [18]

**Figura 2.39.** Soldadura de acero TWIP TRIP (bandas martensíticas). [18]

**Figura 2.40.** Segregación y de soldadura de aceros TWIP. [18]

**Figura 2.41.** Curvas de deformación de aceros 301 y 304. [22]

**Figura 2.42.** Composición química de acero A y B. [22]

**Figura 2.43.** Micrografía óptica de acero A y B. [22]

**Figura 2.44.** Vista general de zona de fusión soldadura de acero A con placa galvanizada. [22]

**Figura 2.45.** Rechupe e inclusión en la zona de fusión. [22]

**Figura 2.46.** Composición química de acero inoxidable 304. [23]

**Figura 2.47.** Grado de sensibilización en comparación con el tiempo de sensibilizado. [23]

**Figura 2.48.** Corrosión intergranular y transgranular en la zona afectada por el calor. [23]

**Figura 2.49.** Corrosión interdendrítica en el botón de la soldadura. [23]

**Figura 2.50.** Diagrama tiempo corriente en el proceso P-GMAW. [24]

**Figura 2.51.** Microestructura de soldadura de acero inoxidable 316L, matriz austenítica con trazos de ferrita. [24]

**Figura 2.52.** Comparación de la zona de fusión de un acero 304L por los procesos LBW y TIG. [25]

**Figura 2.53.** Sección transversal de soldadura en comparación con la eliminación de las turbulencias por la adición de oxígeno al gas de protección. [26]

**Figura 2.54.** Microestructura austenítica en zona de fusión de acero 316 unido por láser PIL. [26]

**Figura 2.55.** Sección transversal de área de unión de acero 304 unido por FSW. [27]

**Figura 2.56.** Sensibilización en área de soldadura de acero 304 unido por FSW. [27]

**Figura 2.57.** Ferrita delta en la zona de agitación de acero 304 unido por FSW. [27]

**Figura 2.58.** Grados de sensibilización de acero 304 unido por FSW y GTAW. [27]

**Figura 2.59.** Porcentajes de sensibilización de acero 304 unido por FSW y GTAW. [27]

**Figura 4.0.** Composición química de acero austenítico inoxidable 304L. [28]

**Figura 4.1.** Composición química de acero TWIP. [29]

**Figura 4.2.** Focal de láser. [29]

**Figura 4.3.** Láser Nd:YAG rofin.

**Figura 4.4.** Microestructura en la línea de fusión del acero 304L con láser de Nd:YAG

**Figura 4.5.** Microestructura en la zona fundida del acero 304L

**Figura 4.6.** Macrografía de acero inoxidable 304L, con láser de Nd:YAG

**Figura 4.7.** Microestructura en la zona fundida del acero TWIP

**Figura 4.8.** Microestructura en la línea de fusión del acero TWIP

**Figura 4.9.** Dimensiones de ancho de cara y zona intermedia de zona de fusión en acero TWIP.

**Figura 4.10.** Resultados de microdurezas en acero TWIP.

**Figura 4.11.** Zonas de indentados para microdureza de acero TWIP.

# ÍNDICE DE TABLAS:

**Tabla 2.1.** Proceso de sensibilización. [23]

**Tabla 4.0.** Parámetros de soldadura para acero inoxidable 304L.

**Tabla 4.1.** Parámetros de soldadura para acero TWIP.

**Tabla 4.2.** Resultados de ensayo de tensión en acero 304L.

**Tabla 4.3.** Resultados de ensayo de tensión en acero TWIP.

**Tabla 4.4.** Resultados de microdurezas en acero TWIP.