

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO TRIP AL SER SOMETIDO  
AL PROCESO DE SOLDADURA RSW**

**POR**

**ABRAHAM LAUREANO SIFUENTES VILLEGAS**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**FEBRERO DE 2021**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO TRIP AL SER SOMETIDO  
AL PROCESO DE SOLDADURA RSW**

**POR**

**ABRAHAM LAUREANO SIFUENTES VILLEGAS**

**MONOGRAFÍA**

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

**SALTILLO, COAHUILA**

**FEBRERO DE 2021**

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO TRIP AL SER SOMETIDO AL PROCESO DE SOLDADURA RSW**, realizada por el alumno **ABRAHAM LAUREANO SIFUENTES VILLEGAS** con número de matrícula **20ES-266** sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

---

**Dra. Rocío Saldaña Garcés**  
Tutor Académico

---

**Dr. Emmanuel José Gutiérrez Castañeda**  
Asesor Externo

---

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

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

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ABRAHAM LAUREANO SIFUENTES VILLEGAS**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO TRIP AL SER SOMETIDO AL PROCESO DE SOLDADURA RSW**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente el día 26 de Febrero del 2021.

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez  
Medina  
Presidente**

---

**Dr. Humberto Hernández  
Belmontes  
Secretario**

---

**Dra. Rocio Saldaña Garcés  
Vocal**

## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Abraham Laureano Sifuentes Villegas, estudiante con matrícula **20ES-266**, del Programa de Posgrado en Tecnología de la Soldadura Industrial de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA), declaro que el presente trabajo terminal con título **ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO TRIP AL SER SOMETIDO AL PROCESO DE SOLDADURA RSW** es original, de mi autoría y producto de mi contribución intelectual y de investigación.

Así mismo, manifiesto que los datos, imágenes y textos tomados de fuentes publicadas, como artículos y tesis, están debidamente citados y referenciados, dando el crédito a los investigadores y fuentes originales.

Abraham Laureano Sifuentes Villegas

Nombre y Firma del estudiante

# AGRADECIMIENTOS

A Dios por la oportunidad e inspiración.

A la Dra. Rocío Saldaña Garcés por su ayuda y disposición para la realización de este trabajo, ya que con su apoyo se vio materializada esta investigación.

Al Dr. Emmanuel José Gutiérrez Castañeda del Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por su disposición y apoyo para este trabajo mediante el proyecto de CB-2017/2018, No. A1-S-35877; UASLP, No.C19-FRC-08-10.10.

Al CONACYT por el apoyo brindado para sustentar la elaboración de este proyecto como becario CVU 1035574.

Al personal de COMIMSA, por las facilidades, la paciencia y la buena voluntad para la capacitación y formación de los estudiantes. A todos y a cada uno de ustedes... ¡Muchas Gracias!

# DEDICATORIA

A mi padre y a mi madre.

# CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA .....	ii
CONTENIDO .....	iii
SÍNTESIS .....	1
CAPÍTULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN.....	3
<b>1.1 Antecedentes</b> .....	3
<b>1.2 Objetivo general</b> .....	6
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b> .....	6
<b>1.3 Justificación</b> .....	7
<b>1.4 Planteamiento del problema</b> .....	7
<b>1.5 Aportación industrial</b> .....	8
<b>1.6 Alcance</b> .....	9
CAPÍTULO 2.....	10
MARCO TEÓRICO .....	10
<b>2.1 Acero</b> .....	10
<b>2.1.1 Aceros avanzados de alta resistencia</b> .....	10
<b>2.1.2 Aceros TRIP</b> .....	13
<b>2.1.3 Aplicaciones de aceros TRIP</b> .....	19
<b>2.2 Proceso de soldadura RSW</b> .....	22
<b>2.2.1 Principios de operación</b> .....	23
<b>2.2.1.1 Ciclo de soldadura</b> .....	28
<b>2.2.2 Diseño de uniones</b> .....	30
<b>2.2.2.1 Distancia del borde</b> .....	30
<b>2.2.2.2 Traslape de la junta</b> .....	31
<b>2.2.2.3 Embonamiento y espaciado de soldadura</b> .....	32
<b>2.2.2.4 Acceso a la unión</b> .....	32
<b>2.2.2.5 Resistencia mecánica de la soldadura</b> .....	33
<b>2.2.3 Generación de calor</b> .....	34
<b>2.2.3.1 Balance calórico y disipación de calor</b> .....	36
<b>2.2.4 Variables del proceso</b> .....	38

<b>2.2.4.1 Corriente eléctrica</b> .....	38
<b>2.2.4.2 Tiempo de soldadura</b> .....	40
<b>2.2.4.3 Presión de los electrodos</b> .....	42
<b>2.2.5 Electrodo</b> .....	42
<b>2.2.6 Defectos en la soldadura</b> .....	45
CAPÍTULO 3.....	47
ESTADO DEL ARTE .....	47
<b>3.1 Acero TRIP</b> .....	47
<b>3.1.1 Clasificación y propiedades</b> .....	47
<b>3.1.2 Procesos de endurecimiento</b> .....	49
<b>3.1.3 Efecto del manganeso y aluminio</b> .....	51
<b>3.2 Soldadura de aceros TRIP</b> .....	54
<b>3.3 Defectos en soldadura de aceros TRIP</b> .....	85
CAPÍTULO 4.....	99
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA .....	99
CAPÍTULO 5.....	103
CONCLUSIONES .....	103
Tablas.....	106
Figuras.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	111

# SÍNTESIS

El presente trabajo es una investigación en la cual se llevó a cabo el análisis del estado del arte, acerca del estudio de la soldabilidad de aceros TRIP 1000 por el proceso de soldadura RSW aplicado en láminas de acero de calibre menor a 2 mm.

Se analizaron cinco casos experimentales reportados en la literatura acerca de la soldabilidad de dichos aceros, dos experimentos realizados para espesores de 1 mm, uno para espesores de 0.8 mm y dos más para espesores de 1.5 mm.

Se identificaron los parámetros principales del proceso RSW: la intensidad de corriente eléctrica, la presión de soldadura y el tiempo de soldadura. Se encontró que el parámetro de corriente eléctrica aporta la mayor influencia en las propiedades mecánicas del botón de soldadura, seguido de la presión de soldadura y finalmente el tiempo.

Dichos parámetros, cuando se utilizan por debajo de los rangos óptimos establecidos, generan un botón de soldadura pequeño con baja resistencia mecánica y que no cumple con los requisitos mínimos de aceptabilidad.

Por otro lado, se encontró que el uso de los parámetros en magnitudes por encima de los valores óptimos genera un botón de soldadura grande acompañado del fenómeno de expulsión de metal líquido, en este caso la resistencia mecánica se ve afectada y se genera un concentrador de esfuerzos indeseable en la zona de expulsión del metal.

En base a lo anterior, se encontró en la literatura que la implementación de parámetros de soldadura como la corriente eléctrica en el rango de 4.75 a 8 kA; tiempo de soldadura de 0.30 a 0.60 segundos; y una presión ejercida por los

electrodos entre 0.345 a 6 kN permiten fabricar soldaduras de acero TRIP de buena calidad.

Por otro lado, en estos trabajos también se analizaron los diferentes modos de fractura ocurridos en las uniones soldadas de acero TRIP mediante el proceso RSW, de los cuales se establecieron tres: interfacial, interfacial parcial y extracción del botón de soldadura.

Además, se analizó la microestructura de las uniones soldadas, donde el botón de soldadura presentó una microestructura martensítica.

Así mismo, se analizó la dureza en la zona del botón de soldadura, zona afectada por el calor y material base, donde el botón de soldadura presentó mayor endurecimiento, con ablandamiento gradual a través de la zona afectada por el calor en dirección al material base.

Por otro lado, se encontró que el carbono y los elementos aleantes en el acero TRIP reducen la soldabilidad del acero por el proceso RSW, ya que afectan las propiedades termo-físicas. Estos elementos de aleación aumentan la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica, y disminuyen la conductividad térmica.

La afectación de las propiedades termo-físicas genera y conserva una gran cantidad de calor más allá de los parámetros establecidos, aunado a la alta presión del botón de soldadura; estos dos factores, promueven la formación de defectos en la soldadura de aceros TRIP.

**PALABRAS CLAVE:** Aceros TRIP, Proceso RSW, Parámetros óptimos, Soldabilidad, Defectos en soldadura.

**CAMPO ESPECÍFICO:** Soldabilidad de aceros TRIP para industria automotriz.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La industria automotriz ha experimentado grandes cambios desde hace algunas décadas, hasta hace algunos años los chasis de los vehículos automotores eran grandes y pesados, ya que la materia de fabricación era acero de proporciones robustas y de gruesos calibres, y aunque tenían una resistencia extraordinaria, también es cierto que debido a su falta de tenacidad carecían de cierta seguridad para el usuario. Aunado a esto y debido a este gran peso de los automotores, el consumo de combustible era considerable y por ende las emisiones contaminantes al ambiente también lo eran. Estas emisiones contaminan las zonas urbanas y sus alrededores, provocando cuestiones ambientales, económicas y sanitarias cada vez más importantes [1] [2].

Con el paso del tiempo, dicha industria ha ido mejorando la materia prima de fabricación, diseñando y creando nuevos aceros de vanguardia e innovadores, como los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) en los cuales se ha conservado la resistencia mecánica, pero absorbiendo una elevada energía de impacto, haciéndolos así altamente deformables, esto contribuyó a disminuir el problema de riesgo en la seguridad de los usuarios. Además, con estos nuevos aceros se ha logrado disminuir considerablemente el peso por unidad y esto redujo el gasto de combustible y disminuyó la cantidad de emisiones contaminantes [3] [4]. De hecho, se estima que una reducción del 10% en el peso del vehículo resulta hasta en un 4% de economía en el combustible [5]. La disminución del peso total de los vehículos se logró por la reducción de los espesores de las láminas, ya que los elementos fabricados con este tipo de acero poseen la misma resistencia mecánica que elementos más robustos fabricados con aceros convencionales.

Otro aspecto que se puede señalar es el creciente uso de motores propulsores a base de energía eléctrica, en los cuales las emisiones contaminantes se eliminan por completo, y para que sus beneficios sean aprovechados al máximo requieren un chasis metálico más ligero, propiedad que pueden brindar los aceros AHSS [6].

Dentro de la clasificación de aceros AHSS se encuentran los aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP, por sus siglas en inglés), que cuentan con propiedades mecánicas mejoradas para la industria automotriz. Estos aceros cuentan con una microestructura multifásica consistente principalmente de ferrita, bainita y austenita retenida, aunque también pueden contener pequeñas cantidades de martensita. Contienen elementos aleantes importantes como el manganeso y el silicio, los cuales por un lado permiten estabilizar la austenita a temperatura ambiente, pero por otro lado afectan las propiedades termo-físicas del acero. Tienen un rango de resistencia a la tensión de 500 a 1,600 MPa y una elongación del 5 al 30%.

Actualmente, la industria automotriz requiere materiales como los aceros TRIP por las características antes mencionadas, de igual manera, requiere de procesos de manufactura rápidos, eficientes y que sean amigables con el medio ambiente. Dichos procesos deben garantizar la unión de los componentes y cumplir con un amplio margen de seguridad y calidad. El proceso de unión debe ser tal que modifique lo menos posible la naturaleza de los materiales a unir, específicamente la microestructura, garantizando así la homogeneidad de sus propiedades mecánicas. Para este fin, los procesos de soldadura por fusión son ampliamente usados en la industria, porque cumplen con los requisitos mencionados.

Es importante señalar que, en la industria automotriz, el proceso de soldadura RSW es un factor fundamental para el ensamble y fabricación de chasis y accesorios del vehículo, el proceso cuenta con ventajas ampliamente aprovechables en la fabricación de las unidades. El ajuste de los parámetros del proceso puede brindar una soldadura de buena calidad y propiedades mecánicas en aceros TRIP que satisfagan los estándares de fabricación.

La soldadura realizada por el proceso RSW en aceros TRIP tiene la característica de elevar la temperatura de manera rápida y focalizada en el lugar de la unión, pero así mismo, posee la cualidad de enfriar de manera inmediata, generando con esto un proceso de templado promoviendo la transformación a martensita, elementos aleantes como el carbono mejoran la templabilidad y la dureza [7]. Es por eso, que la microestructura en la zona del botón de soldadura generalmente se transforma a una fase martensítica. Este proceso de cambio de fase en la zona soldada introduce una porción dura dentro de la homogeneidad blanda del material, sin embargo, el cambio de dureza es paulatino, desde los valores propios del material base y conforme se acerca hasta el botón de soldadura alcanza progresivamente la magnitud máxima. Es por esto que, al no existir un cambio brusco de la dureza en el material, las repercusiones de este fenómeno, aunque existentes, no son de altas consideraciones. Se conservan las

magnitudes de los esfuerzos soportados en un rango completamente aceptable para el mercado automotriz y otras industrias, por lo tanto, dicho proceso es uno de los más deseables para la unión de láminas de acero de calibres delgados [8] [9].

## **1.2 Objetivo general**

Analizar el estado del arte de los efectos mecánicos y microestructurales de uniones de láminas de aceros TRIP menores a 2 mm de espesor mediante el proceso de soldadura RSW.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- a) Analizar el estado del arte de aceros TRIP y el proceso de soldadura RSW.
- b) Realizar una revisión bibliográfica acerca de los parámetros empleados para la soldabilidad de láminas de acero TRIP mediante el proceso RSW.
- c) Obtener los parámetros recomendables para uniones de láminas de aceros TRIP menores a 2 mm de espesor por el proceso RSW.
- d) Realizar un análisis de la información recopilada, para describir los efectos de dichos parámetros sobre las propiedades mecánicas y las características microestructurales de la unión; además de los defectos que pueden generarse y las medidas para evitar o disminuir su presencia.

### **1.3 Justificación**

Los aceros TRIP son considerados ante la vista de los propios ejecutivos de la industria automotriz como la mejor alternativa en términos de sustentabilidad, seguridad y costo. Estos aceros ofrecen buenas propiedades mecánicas con espesores relativamente delgados; permitiendo además de la seguridad de los pasajeros, reducir en gran medida el peso de los vehículos; lo cual se traduce en un consumo más eficiente del combustible y menores emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, al ser sometidos a un proceso de manufactura tal como la soldadura, pueden cambiar o perder por completo las propiedades mecánicas y microestructurales.

Debido a lo anterior, es importante recabar información con la finalidad de conocer cuáles parámetros del proceso RSW son los que tienen mayor influencia en las propiedades mecánicas y microestructurales de estos aceros, con la finalidad de mantener los estándares de calidad que se requieren en la industria automotriz.

### **1.4 Planteamiento del problema**

Los aceros avanzados de alta resistencia, como los aceros TRIP, son empleados en la industria automotriz debido a la combinación de ligereza y elevada resistencia mecánica. La fabricación de estos materiales se lleva a cabo bajo ciclos térmicos controlados en los que, dependiendo de la composición química y la condición metalúrgica del acero, deben establecerse las condiciones óptimas de tratamiento térmico (temperatura, tiempo, velocidades de calentamiento y enfriamiento) para obtener la microestructura y propiedades finales deseadas.

El proceso de soldadura RSW es considerado como uno de los más utilizados dentro de la industria automotriz para la unión de diferentes tipos de acero, sin embargo, al hablar de la soldabilidad de aceros TRIP por este proceso, es necesario decir que existe todavía un gran campo de investigación. La facilidad para unir dichos aceros se ve afectada por algunos factores que presentan un gran reto en la actualidad; uno de ellos, es el alto porcentaje de carbono, silicio y manganeso, como es bien conocido, a mayor cantidad de estos elementos, menor será la soldabilidad en el acero.

Otro punto no menos importante, es que los productos planos de alta resistencia desarrollados para disminuir el peso de los vehículos, poseen calibres que cada vez tienden a ser más delgados. Por este motivo, el control de la entrada de calor para el proceso de unión es fundamental, en el proceso RSW, al controlar sus parámetros, el calor de aporte puede controlarse hasta llegar solamente un poco más allá del punto de fusión de los materiales, haciendo con esto una afectación térmica menor y altamente localizada.

Debido a lo anterior, se realizará un análisis bibliográfico para obtener los parámetros del proceso RSW para uniones de láminas delgadas de aceros TRIP 1000 menores a 2 mm de espesor, y conocer sus efectos a nivel mecánico y microestructural en dichas uniones empleadas en la industria automotriz.

## **1.5 Aportación industrial**

La aportación industrial que se obtendrá con este proyecto es la recopilación y el análisis de la información obtenida de la revisión bibliográfica, para obtener los parámetros del proceso RSW que son utilizados para la unión de láminas de aceros TRIP 1000 menores a 2 mm de espesor. Adicionalmente, se describirán los efectos de estos parámetros sobre los cambios en la microestructura y en las

propiedades mecánicas, para de esta manera, evaluar la factibilidad de usarse en la industria automotriz.

## **1.6 Alcance**

Se recopilará información del estado del arte referente a las uniones soldadas de láminas de aceros TRIP 1000 menores a 2 mm de espesor por el proceso RSW, para encontrar los parámetros adecuados que brinden una soldadura de calidad con las propiedades mecánicas y microestructurales aceptables para el ramo automotriz.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Acero

Se le llama acero o acero al carbono a la aleación constituida principalmente por hierro y carbono, en donde los porcentajes de este último elemento varían de 0.2 al 2.11%. Adicionalmente, esta aleación además consta de elementos tales como manganeso, silicio, fósforo y azufre, entre otros. Los aceros al carbono suelen clasificarse en función del contenido de carbono [10] [11].

#### 2.1.1 Aceros avanzados de alta resistencia

Hasta hace algunos años, algunos componentes automotrices como carrocerías y partes de refuerzo eran fabricados utilizando aceros convencionales tales como [12] Figura 2.1:

- Aceros de bajo carbono (mild Steels,).
- Aceros libres de intersticiales (Interstitial free, IF).
- Aceros isotrópicos (isotropic steels, IS)
- Aceros endurecidos por horneado (Bake Hardening, BH).
- Aceros reforzados por solución sólida (Solid Solution Strengthened, SSS).
- Aceros de alta resistencia y baja aleación (High Strength Low Alloy, HSLA).

Sin embargo, las exigencias actuales de la industria automotriz están encaminadas a mejorar la seguridad de los pasajeros y reducir el consumo de combustible, y al mismo tiempo a reducir los costos y el impacto ambiental. Estos requerimientos, demandan modificaciones tanto en el diseño del vehículo como en la selección de los materiales utilizados para la fabricación de sus componentes. Los AHSS son candidatos prometedores para satisfacer esta necesidad debido a que permiten reducir en gran medida el peso de muchas de las partes que constituyen a un automóvil (Figura 2.1) [12].

Estos aceros son el resultado de los proyectos como el ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body, Carrocerías para Automóvil Ultraligeras de Acero) y AVC (Advanced Vehicules Concepts, Conceptos avanzados para vehículos) que son asistidos por empresas fabricantes de acero a nivel mundial y que enfocan sus avances en los conceptos de diseño de bajo peso y el uso extensivo de los AHSS para la fabricación de componentes de menor peso [12].

Los AHSS como los CP (complex phase), DP (dual phase), TRIP (transformation induced plasticity) y MART (martensitic) (Figura 2.1), difieren de los aceros al carbono convencionales en su composición química y microestructura.

Las altas resistencias obtenidas son logradas principalmente a través de la modificación de su microestructura durante el proceso de fabricación. Los AHSS se distinguen por tener resistencias al límite de fluencia mayores a 300 MPa y resistencias a la tensión mayores a 600 MPa. Son aceros multifásicos que

contienen ferrita, bainita, austenita retenida y martensita en cantidades apropiadas para producir propiedades mecánicas excepcionales [12].

A diferencia de los aceros de alta resistencia convencionales (HSS), en los que la ductilidad disminuye conforme aumenta la resistencia, los AHSS combinan una alta resistencia y alta formabilidad (Figura 2.1) [12] [13]. Estos aceros, son utilizados para la fabricación de carrocerías para automóvil o componentes en donde se requiera alta resistencia al impacto, rigidez y resistencia a la tensión, que se traducen en una mayor tenacidad [12].

La alta resistencia se deriva de efectos acumulativos tales como tamaño de grano fino, endurecimiento por solución sólida sustitucional e intersticial de elementos tales como C, Mn, Si y B, endurecimiento por precipitación de carburos y nitruros de Ti, Nb, V y/o B, endurecimiento por transformación de fase y endurecimiento por deformación.

En la actualidad estos aceros han sido clasificados en tres generaciones. Los aceros AHSS de 3ra. generación combinan las ventajas de microestructuras multifásicas (característica de los AHSS de 1ra. generación) y la fase austenita (adecuada para mejorar diferentes mecanismos de endurecimiento), la transformación martensítica inducida por deformación y el maclaje inducido por plasticidad (característica de los AHSS de 2da. generación) [12].

Los AHSS de 3ra. generación se encuentran todavía en desarrollo por los productores de acero. El enfoque clásico para el desarrollo de los diversos grados de AHSS se da en dos vías: (i) el uso de combinaciones especiales de elementos aleantes y (ii) control de los ciclos térmicos, con el fin de desarrollar la formación de la microestructura requerida [12].

Una característica de los aceros de primera generación es que, mientras su resistencia se incrementa la ductilidad disminuye, lo cual limita el uso de estos aceros para aplicaciones en las que se requiere alta tenacidad como en barras de refuerzo y piezas de herramientas [12]. Los aceros austeníticos inoxidables (Austenitic based steels) corresponden a la segunda generación de AHSS. Estos aceros pueden presentar la transformación de austenita a martensita durante la

deformación plástica resultando en una excelente combinación de resistencia y ductilidad, resistencia por dicha transformación y ductilidad por la matriz de fase ferrita (Figura 2.1). La desventaja principal de estos aceros es su elevado costo y su baja capacidad de soldabilidad y galvanizado debido a que contienen altos contenidos de manganeso. La tercera generación de AHSS busca que tengan mejores combinaciones de resistencia y ductilidad que los de primera generación, pero a un menor costo y con mejor capacidad de soldabilidad que los de segunda generación [12].

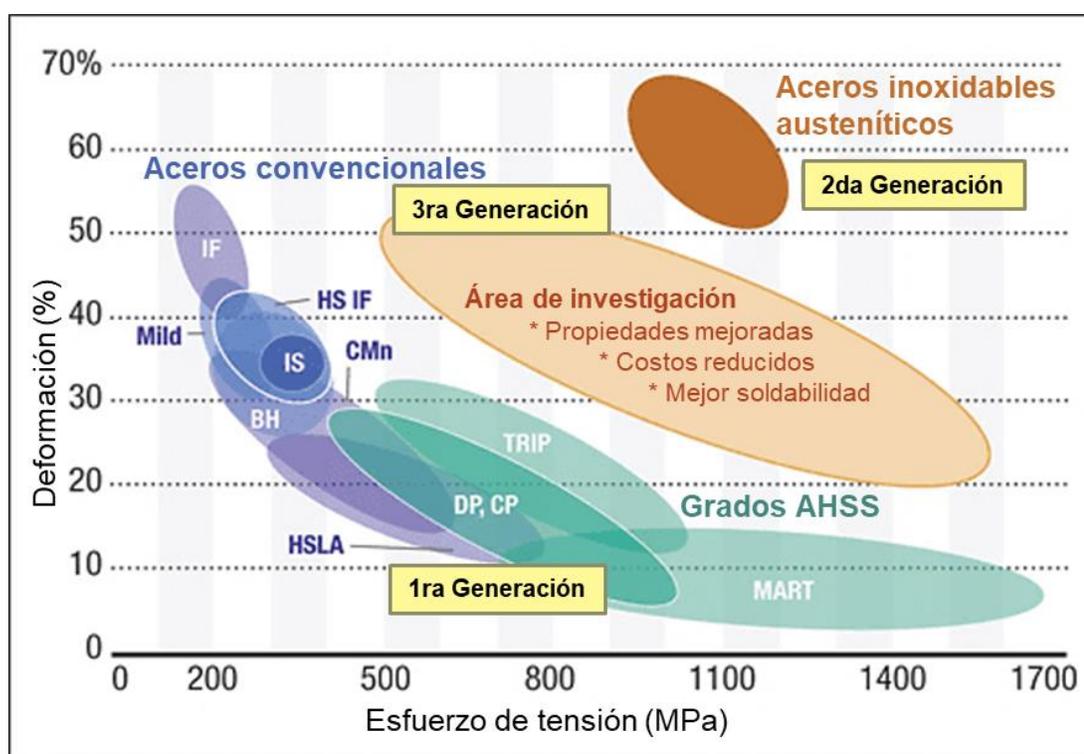


Figura. 2.1 Relación entre la ductilidad y resistencia a la tensión para diferentes aceros de grado automotriz [13].

### 2.1.2 Aceros TRIP

El término TRIP se deriva de las siglas en inglés Transformation Induced Plasticity indicando el fenómeno de plasticidad inducida por transformación. Este

fenómeno está asociado a la transformación de austenita a martensita durante la deformación plástica [14]. La microestructura de los aceros TRIP consiste en una mezcla de austenita retenida del orden del 10 al 15% y bainita en una matriz de ferrita, también pueden presentar martensita en pequeñas cantidades [15].

En la Figura 2.2 se observa un esquema de la microestructura típica de aceros TRIP.

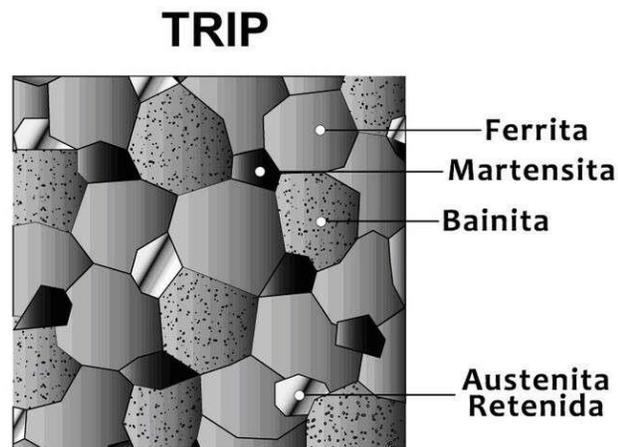


Figura 2.2 Microestructura típica de aceros TRIP [16].

Para que la austenita retenida sea estable a temperatura ambiente, los aceros TRIP requieren altas cantidades de carbono, silicio y/o aluminio. El Si y Al aceleran la formación de ferrita y bainita, y propician que el carbono se mantenga dentro de la austenita facilitando que sea retenida a temperatura ambiente. Evitar la formación de carburos durante la transformación bainítica es vital para los aceros TRIP, el silicio y el aluminio ayudan a prevenir dicha formación en la región bainítica facilitando el enriquecimiento de austenita en carbono [12].

Las Figuras 2.3 y 2.4 muestran imágenes de un acero TRIP obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido; se observa la presencia de ferrita, bainita, austenita retenida y martensita.

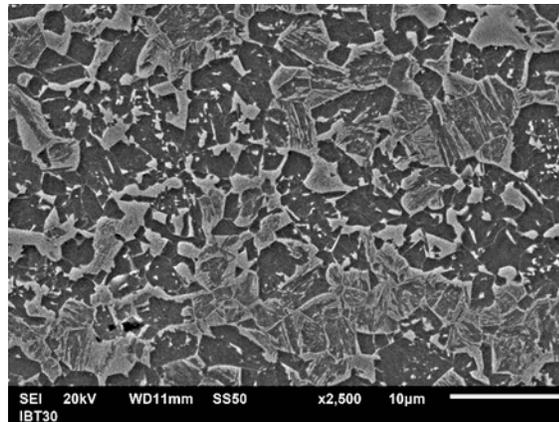


Figura 2.3 Micrografía de acero TRIP 1000. Magnificación 2500X [17].

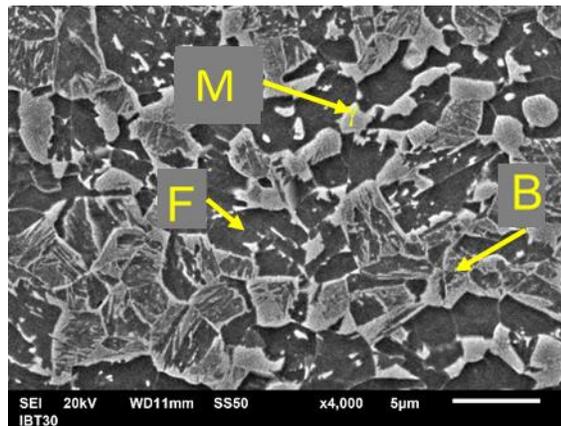


Figura 2.4 Micrografía de acero TRIP 1000. Magnificación 4000X [17].

La composición química del acero TRIP 1000 correspondiente a las Figuras anteriores se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química de acero TRIP 1000 [18].

TRIP 1000 (% e.p.)							
C	Mn	Si	Cr	P	Al	Ni	Fe
0.16	1.58	1.47	0.2	0.087	0.048	0.04	Balance

El efecto de los elementos de aleación se menciona a continuación [19] [20]:

Carbono.- actúa como estabilizador de la austenita a temperatura ambiente. A mayores cantidades dentro de la austenita evita la transformación a martensita. A mayor contenido de carbono disminuye la soldabilidad en los aceros, aumentan la dureza del material, la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica [19] [20].

Manganeso.- desoxidante del acero, mejora la resistencia a la oxidación, eleva el esfuerzo de fluencia sin reducir tenacidad, neutraliza la influencia del azufre, incrementa la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica, disminuye la conductividad térmica [20].

Silicio.- acelera la formación de las fases bainita y ferrita, hace que permanezca el carbono dentro de la austenita para estabilizarla, evita la precipitación de carburos, tiene efecto desoxidante, incrementa la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica, disminuye la conductividad térmica [19] [20].

Cromo.- incrementa la resistencia mecánica por carburos y eleva la resistencia a la corrosión, puede causar dureza excesiva y fisuras adyacentes a la soldadura, también puede formar óxido de cromo que dificulta la soldabilidad.

Fósforo.- es considerado como una impureza, forma fosfuro de hierro en la soldadura al momento de la solidificación haciendo frágil al metal, produce en la microestructura la formación de grano de tamaño grande y reduce la soldabilidad.

Aluminio.- acelera la formación de ferrita y bainita, conserva el carbono dentro de la austenita, evita la precipitación de carburos, fuerte desoxidante, elemento eficaz para controlar el crecimiento de grano antes del enfriamiento, incrementa

la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica, disminuye la conductividad térmica [19] [20].

Níquel.- incrementa el endurecimiento, en las uniones soldadas mejora la tenacidad y ductilidad del acero, a medida que aumenta la concentración disminuye la soldabilidad.

Por otro lado, la intensidad de la deformación en que la austenita retenida se transforma en martensita es controlada por la cantidad de carbono dentro de la austenita. Si la cantidad de carbono es baja, la austenita retenida se transforma en martensita casi inmediatamente al experimentar la deformación, esto aumenta la velocidad de endurecimiento por trabajo y la formabilidad durante el proceso de estampado. Con mayores contenidos de carbono, la austenita retenida es más estable y comienza a transformarse en martensita solo a niveles de deformación más allá de los producidos con el proceso de estampado, esta transformación ayuda a retrasar la inestabilidad del cuello, que es un adelgazamiento en la sección del material durante los procesos de deformación [15].

Durante la deformación de aceros TRIP se dispersan segundas fases duras en una matriz de ferrita blanda ocasionando alto endurecimiento. Además, la austenita retenida al experimentar un trabajo por tensión uniaxial que va en aumento transforma a martensita, lo que hace que aumente el endurecimiento por deformación en el elemento, pero sin llegar a romperse. En la Figura 2.5 se observa el comportamiento esfuerzo-deformación de aceros HSLA, DP y TRIP con límites de elasticidad aproximadamente iguales; se aprecia que el endurecimiento del acero TRIP persiste en deformaciones más altas.

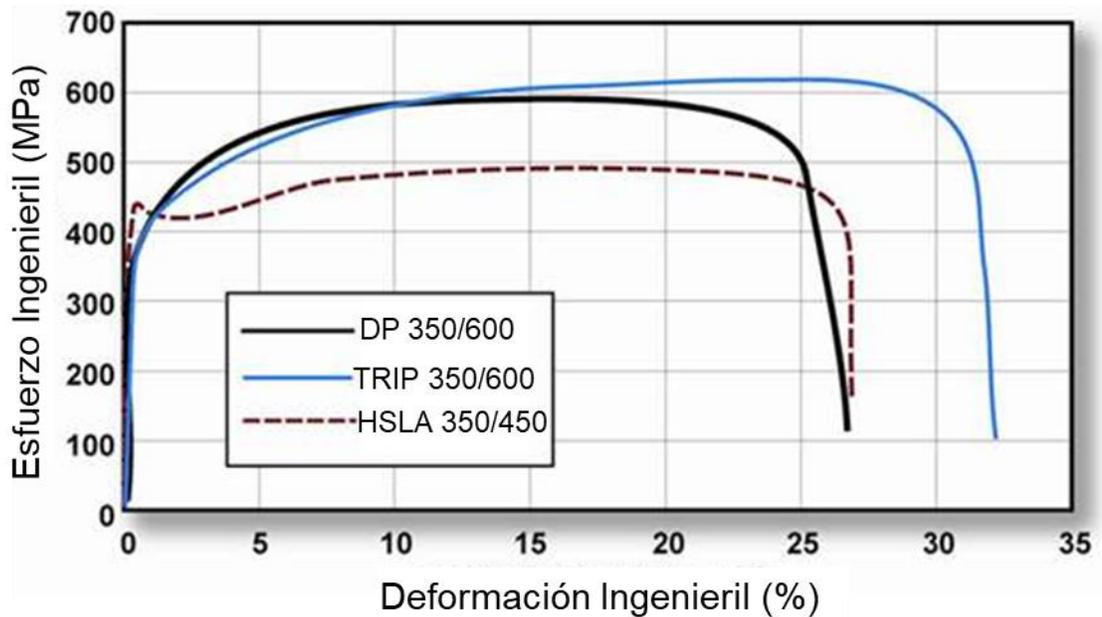


Figura 2.5 Gráfica esfuerzo vs deformación para HSLA, DP y TRIP [16].

Las tasas de endurecimiento por trabajo de los TRIP son extremadamente más altas que las del acero convencional y significativamente más altas que algunos aceros avanzados, lo que genera un ventajoso alargamiento significativo. Esta característica es extremadamente útil para el diseño de elementos, aprovechando la alta tasa de endurecimiento por deformación cuando se crea una pieza, lo cual los hace idóneos para aplicaciones extremas de conformado por estiramiento.

Para el ramo automotriz, los aceros TRIP son altamente recomendables para el diseño de piezas complejas por proporcionar una excelente formabilidad, además, estos aceros muestran una alta capacidad de endurecimiento durante la deformación que le produciría un evento de colisión, para una excelente absorción de la energía durante el impacto [14] [16].

### 2.1.3 Aplicaciones de aceros TRIP

Una de las aplicaciones de los aceros TRIP es para el sector automotriz. Dicha industria requiere materiales que sean resistentes, livianos y con una alta capacidad de absorber energía. El enfoque del diseño actual para la carrocería del automóvil, basado principalmente en la seguridad del tripulante, requiere que los aceros TRIP posean alta resistencia para soportar cargas dinámicas generadas en un evento de colisión del vehículo. La ensambladora automotriz Honda utiliza aceros TRIP para la fabricación de automóviles [21]. La Figura 2.6 muestra una pieza de carrocería llamada refuerzo de columna tipo B, fabricada con acero TRIP 780 electro galvanizado de 1.2 mm de espesor [22].

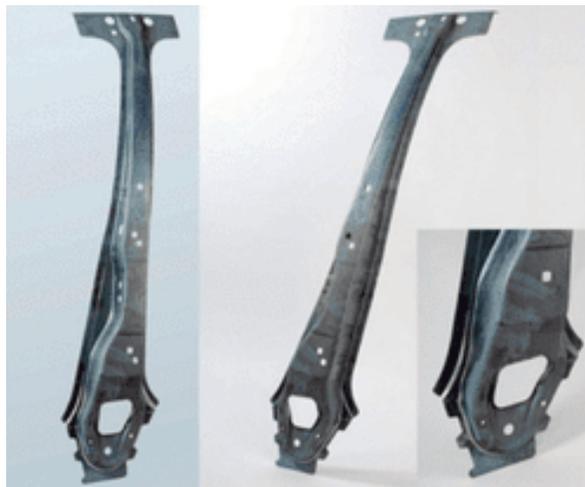


Figura 2.6 Piezas de carrocería de acero TRIP 780 electro galvanizado.  
Refuerzo de columna tipo B de 1.2 mm de espesor [22].

Los aceros TRIP poseen una alta capacidad de elongación, de hasta alrededor del 30%, esta cualidad les brinda una alta capacidad para el estampado, aún para estampados de piezas de extrema complejidad. Esta alta absorción de energía en el material, pero sin llegar a fracturarlo, lo hace especialmente idóneo para piezas de carrocería de tipo estructural y de refuerzo. Además, dichos aceros tienen buena resistencia a la fatiga para usarse en largueros, travesaños y

refuerzos de pilar B. La Figura 2.7 ilustra una pieza de parachoque de la carrocería [22].

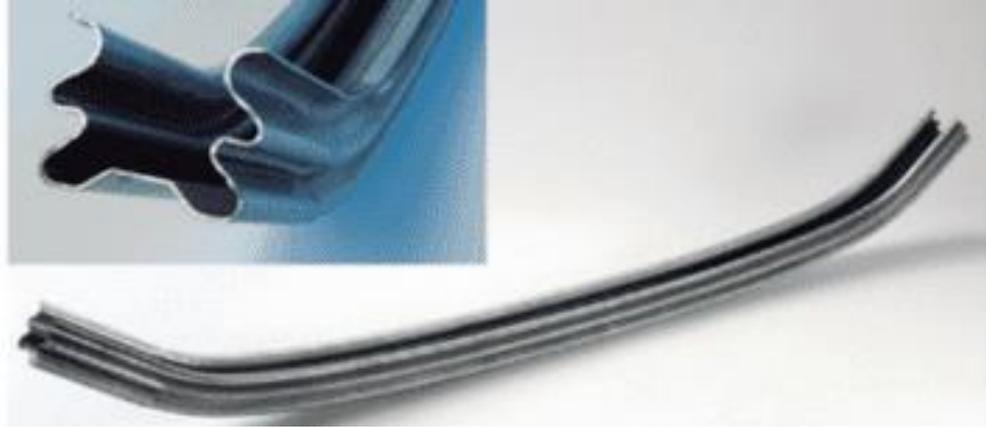


Figura 2.7 Piezas de carrocería de acero TRIP 780 electro galvanizado. Refuerzo de parachoque de 1.6 mm de espesor [22].

Además de fabricarse láminas, también se fabrican alambrones de dicho acero para elaborar tornillería. El proceso se realiza mediante el trefilado de barras de metal en líneas industriales existentes, la ventaja de los tornillos fabricados con aceros TRIP es que tienen mejor formabilidad a la hora de realizar la cuerda del tornillo en comparación con los fabricados mediante aceros convencionales. La división de ArcelorMittal en Polonia fabrica tornillos M5X12 con este material, los cuales se muestran en la Figura 2.8 [23].



Figura 2.8 Progresión del conformado del tornillo M5X12, hasta su forma final [23].

Los tornillos fabricados con acero TRIP poseen igual resistencia que los aceros convencionales con alto contenido de carbono, sin embargo, difieren de estos últimos, en que los tornillos con el efecto TRIP pueden prescindir de la etapa de templado para endurecimiento, ya que el tornillo al momento de estar en servicio y experimentar el esfuerzo de tensión, la austenita retenida trasforma a martensita provocando con esto un incremento en la dureza del material aumentando la resistencia del tornillo, esto provoca un aumento en sus propiedades mecánicas, vida útil y seguridad operativa [23]. ArcelorMittal fabrica con acero TRIP el tornillo tipo M6-6h de doble rosca con cabeza hexagonal el cual se muestra en la Figura 2.9.

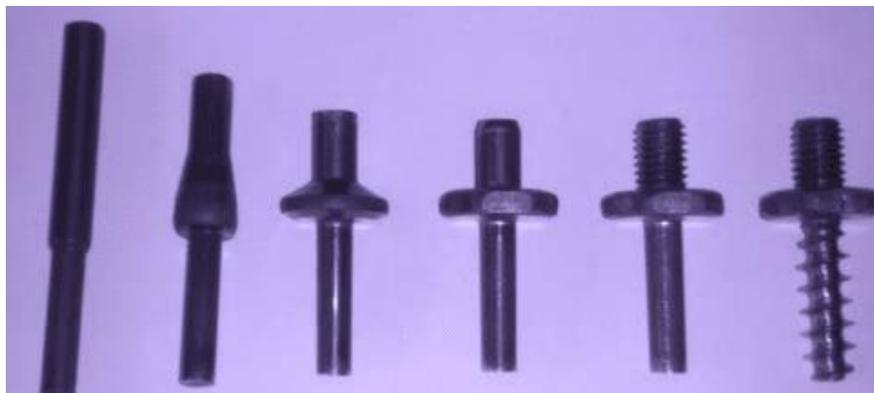


Figura 2.9 Progresión del conformado del tornillo M6-6h, hasta su forma final [23].

## 2.2 Proceso de soldadura RSW

La soldadura de resistencia por puntos (RSW, por sus siglas en inglés), es un proceso en el cual el calor generado por el flujo de una corriente eléctrica a través de las piezas de trabajo produce la coalescencia entre los metales base, esta unión se lleva a cabo en las superficies de empalme de las piezas. Este proceso solo puede unir piezas en posición tipo traslape.

Es necesario aplicar una presión antes, durante y después de aplicada la corriente eléctrica, esto para confinar la zona de soldadura en las superficies de contacto a unir y para forjar el metal de soldadura en el postcalentamiento.

Dentro de los metales que pueden unirse por este proceso se encuentran los aceros al bajo carbono y endurecibles, los aceros inoxidable, aluminio, cobre, níquel, titanio, magnesio y las aleaciones de todos ellos. Para cada tipo de metal existen parámetros específicos y los procesos de limpieza inherentes para una soldadura de calidad.

El proceso cuenta con diversas ventajas, entre las cuales destacan las siguientes [24] [25] [26]:

- 1.- Es un proceso de soldadura extremadamente rápido, más rápido que los procesos por arco eléctrico.

2.- Tiene una gran adaptabilidad para los procesos automatizados, en donde puede producir grandes volúmenes de ensamblados de láminas.

3.- Es una soldadura económica, por no utilizar consumibles ni gases protectores.

Dentro de las desventajas se encuentran las siguientes [24] [25] [26]:

1.- Como las uniones son a traslape, se añade peso a los elementos y también aumenta el costo.

2.- Las soldaduras producidas tienen baja resistencia mecánica a la tensión y fatiga debido a la muesca alrededor del botón de soldadura.

3.- Si se considera una lámina como un todo, la resistencia mecánica no se puede considerar como un todo, primero debido a las zonas de fusión intermitentes que producen los puntos separados unos de otros, segundo porque existen esfuerzos excéntricos debido a la configuración a traslape en los elementos.

### **2.2.1 Principios de operación**

El principio fundamental del proceso de soldadura de resistencia por puntos se basa en la aplicación coordinada de un flujo de corriente eléctrica en conjunto con una presión mecánica de magnitud y tiempo determinado. Dicha corriente pasa entre dos electrodos y atraviesa las piezas de trabajo. La continuidad del flujo se mantiene estable debido a una presión transmitida por los electrodos al trabajo, lo cual garantiza la invariabilidad de la densidad de corriente [27]. En la Figura 2.10 se aprecian los electrodos y la configuración de los metales base.

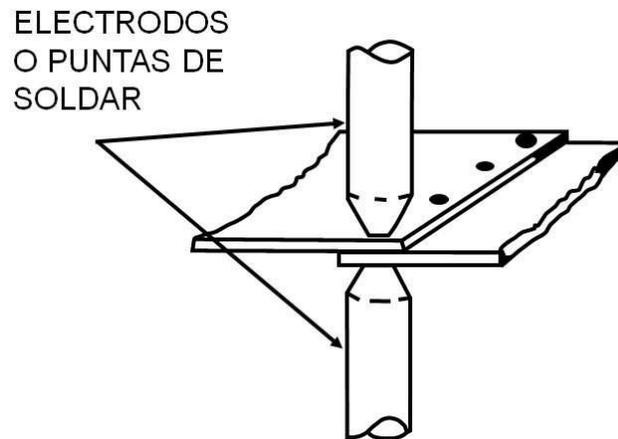


Figura 2.10 Diagrama simplificado de soldadura por puntos [24].

El equipo de soldadura para el proceso RSW consta principalmente de electrodos, porta electrodos, astas, control regulador de corriente, circuito secundario del transformador, control de tiempo. La Figura 2.11 ilustra los componentes de una máquina tipo balancín para proceso de resistencia por puntos.

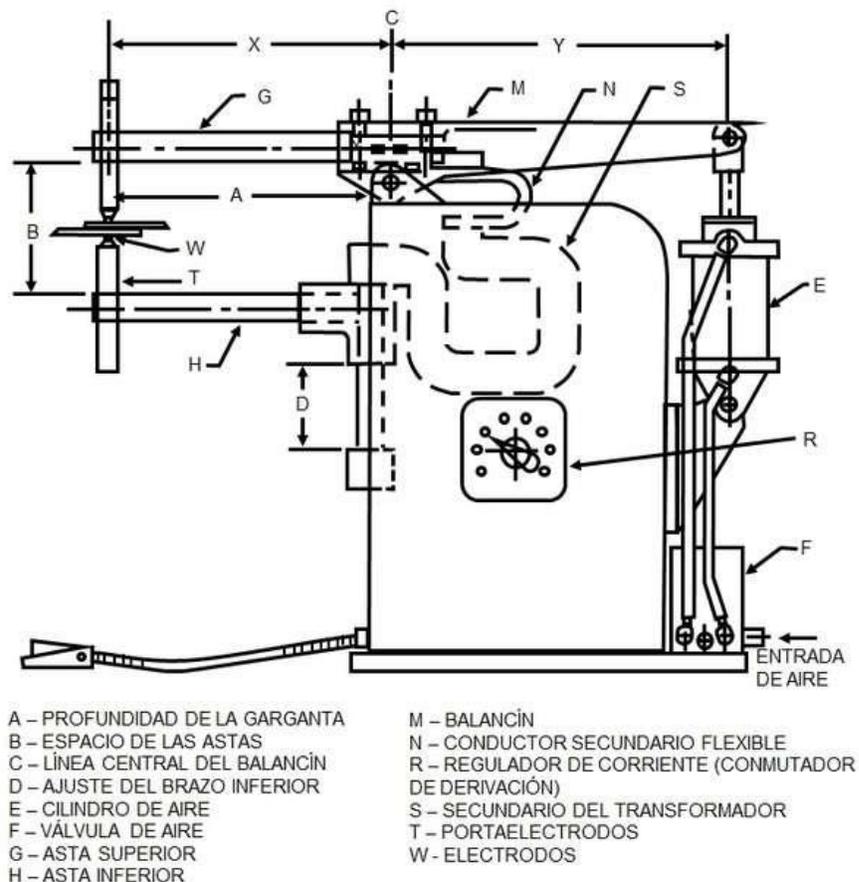


Figura 2.11 Esquema de equipo para proceso RSW [24].

El procedimiento asegura una cantidad de calor, la cual es suficiente para fundir una porción de metal confinado, después de esto se permite el enfriamiento de dicho metal bajo una presión, dándole el tiempo suficiente para adquirir la resistencia mecánica necesaria para mantener unidas las piezas. El metal fundido se genera en la zona de las caras de contacto de los metales a unir, puesto que es la zona con mayor resistencia eléctrica y generadora de la mayor cantidad de calor. A ese metal fundido y posteriormente solidificado se le conoce comúnmente como botón de soldadura [26]. La cantidad de corriente a utilizar debe ser suficiente para realizar el proceso, pero no exagerada a modo que provoque que el metal fundido sea expulsado de la zona de soldadura. El tiempo del flujo de corriente debe ser lo más corto posible, de tal manera de no producir

un sobrecalentamiento en las piezas de trabajo con la cara de electrodos y propiciar que estos últimos se peguen a las superficies de trabajo. En la Figura 2.12 se ilustra el botón de soldadura y los electrodos en el proceso RSW.

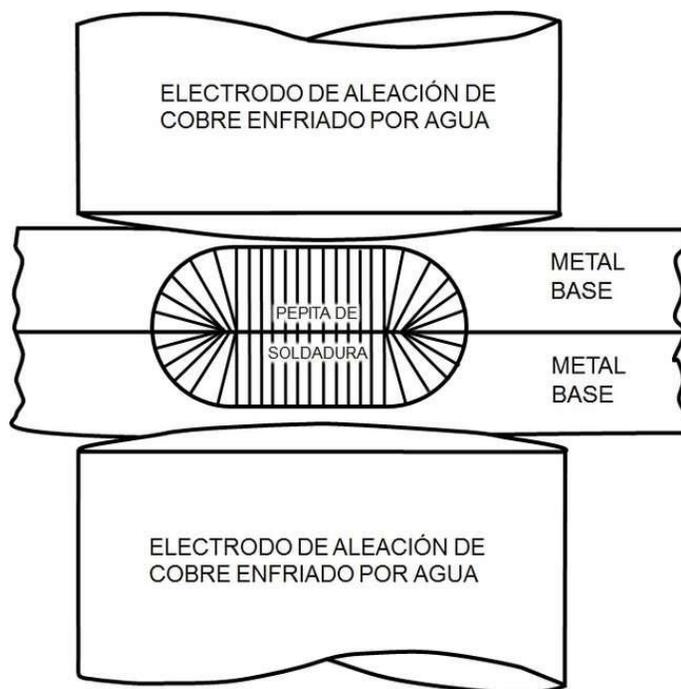


Figura 2.12 Botón de soldadura y electrodos [25].

El calor generado para este proceso se debe en si a la resistencia al flujo de la corriente a través de las piezas de trabajo, esta resistencia genera una oposición al flujo de los electrones de la corriente, generando el calentamiento del material base. Si la pieza de trabajo tiene baja resistividad cuando pase la corriente a través de él, no producirá mucho calor, debido a que no hay gran oposición al flujo de corriente. Debido a que este flujo recorre una distancia pequeña, o sea el ancho del calibre de las láminas, y al tiempo corto de soldadura, la corriente que transita debe ser de magnitud elevada para obtener el calor necesario [24] [27].

La resistividad (o resistencia específica) de la pieza de trabajo tal vez sea la propiedad más importante en la soldadura por resistencia, ya que el calor generado es directamente proporcional a la resistencia del material. Se requiere una más alta densidad de corriente para generar calor en un trabajo con baja resistividad que en uno con alta. Así pues, los metales con resistividad eléctrica alta se consideran más soldables que los de resistividad baja [28].

Otra propiedad importante en los materiales es su conductividad térmica, debido a que una porción del calor generado para la soldadura se pierde por conducción en las zonas aledañas del metal base, lo cual se compensa con mayor aporte de energía, por tanto, los materiales que poseen alta conductividad térmica son menos soldables que los de baja conductividad [24] [28].

Cuando se forma un botón de soldadura, posee una cierta penetración, que en este caso consiste en la longitud que va desde la superficie de contacto hacia el exterior de las piezas, como mínimo la penetración debe ser el 20% del espesor de la lámina, si son láminas de diferente calibre, tiene que ser de la lámina más delgada. Si por alguna razón la penetración no llega al 20%, se le llama soldadura fría, ya que no tuvo el calor suficiente para fusionar el porcentaje requerido en la zona interna de la unión.

En el otro extremo, el límite máximo aceptable para la penetración es del 80% del espesor de la lámina más delgada. Una penetración del 100% o cercano a este valor, produce baja calidad de soldadura, provoca la expulsión de metal fundido, una severa depresión superficial, además de deterioro prematuro de los electrodos. La Figura 2.13 ilustra esquemáticamente estos conceptos [24].

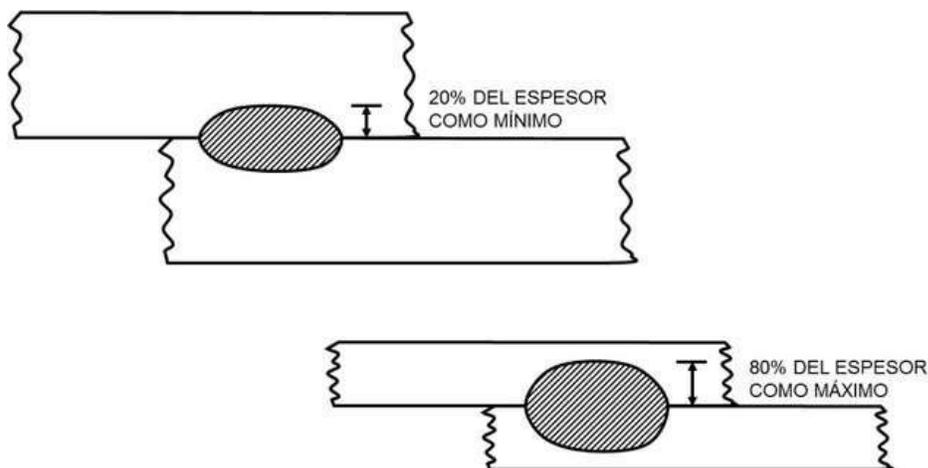


Figura 2.13 Penetraciones aceptables en proceso RSW [24].

El tamaño de la soldadura, al igual que la penetración, también debe cumplir con los requisitos para los cuales fue diseñada, sin embargo, como regla y para garantizar la confiabilidad y trabajo eficiente del botón de soldadura, ésta deberá tener un diámetro mínimo de 3.5 a 4 veces el espesor de la lámina más delgada que se esté soldando [24] [27].

### 2.2.1.1 Ciclo de soldadura

La realización de una soldadura de resistencia por puntos consta básicamente de cuatro pasos [26]:

1. Tiempo de compresión.- Es cuando los electrodos hacen por primera vez contacto con las piezas de trabajo y hasta un instante antes de empezar el flujo de corriente. Este lapso tiene la finalidad de asegurar un buen contacto de los electrodos con las piezas de trabajo y también entre ellas mismas.
2. Tiempo de soldadura.- Es el tiempo en el cual se aplica la corriente de soldadura a las piezas de trabajo, para soldaduras de un solo impulso.

3. Tiempo de retención.- Es el tiempo en el cual los electrodos siguen manteniendo la presión aún y cuando la corriente ha terminado de fluir, esto para permitir el correcto proceso de solidificación del botón de soldadura y obtener suficiente resistencia mecánica.

4. Tiempo inactivo.- Es cuando los electrodos se separan de la pieza soldada y se transportan hasta la siguiente posición para la nueva soldadura.

La Figura 2.14 muestra esquemáticamente los pasos descritos anteriormente.

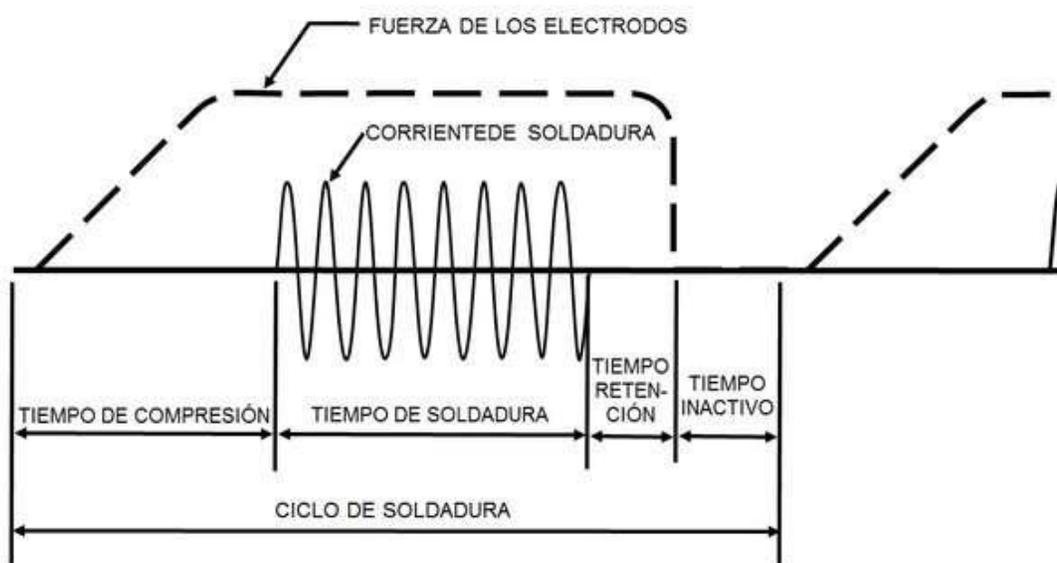


Figura 2.14 Ciclo básico de soldadura de proceso RSW [24].

Existen otras características que se agregan al ciclo básico de soldadura para mejorar algunas propiedades físicas y mecánicas del botón de soldadura, por ejemplo [24] [27]:

1. Precalentamiento.- Se utiliza para reducir el gradiente térmico en las piezas de trabajo con respecto a la temperatura de fusión para la formación del botón de soldadura.

2. Tiempo de enfriamiento y templado.- Se aplica para aceros endurecibles para producir la resistencia mecánica deseada o grados de ductilidad en las piezas de trabajo.

3. Decaimiento de corriente.- Utilizado para retardar el enfriamiento para piezas en que la pérdida rápida de calor causa efectos perjudiciales.

## **2.2.2 Diseño de uniones**

Para el proceso RSW es indispensable que todas las uniones estén diseñadas a traslape.

Hay factores que necesitan considerarse a la hora de realizar el diseño de la soldadura, para que al momento de realizarla no se tenga ningún contratiempo o dificultad por no considerarse a su debido tiempo. Los factores que se deben tomar en cuenta son los siguientes:

### **2.2.2.1 Distancia del borde**

Es la distancia desde el borde de la lámina hasta el centro del botón de soldadura, es necesario que exista suficiente distancia para evitar que la soldadura sea expulsada de la unión. Si la soldadura está situada muy cerca del borde, ya sea de una o de las dos piezas de trabajo, con el calentamiento hará que material sea volcado hacia el exterior, la Figura 2.15 ilustra lo mencionado [24].

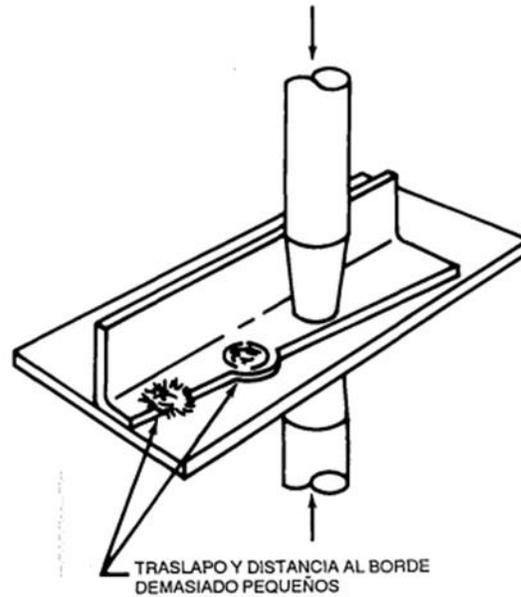


Figura 2.15 Efecto de la distancia del borde y traslape insuficientes [24].

Para el diseño de la distancia del borde se deben considerar los espesores de los materiales con que se esté trabajando, la composición química del metal y la resistencia mecánica [24].

### 2.2.2.2 Traslape de la junta

El traslape es la longitud en la cual las láminas están empalmadas una con otra. Esta distancia deber ser suficiente para disipar el calor de soldadura, en caso contrario la pieza sufrirá un calentamiento y podrá expulsar material, también debido a la accesibilidad de los electrodos se podría requerir mayor distancia de traslape. En general, se dice que el traslape mínimo permitido es dos veces la distancia mínima al borde [24].

### **2.2.2.3 Embonamiento y espaciado de soldadura**

Las dos láminas que se unirán deben estar lo más cercanas posibles, sus superficies deben quedar en contacto en todos los puntos del área de soldadura, si este embonamiento no ocurre, parte de la fuerza de los electrodos se derivará para este fin, ocasionando que una presión real sea aplicada con magnitud menor a la estipulada en el diseño de la unión.

Cuando se sueldan varios puntos en una misma pieza, es posible que parte de la corriente se derive por las uniones ya realizadas. Si la distancia entre estos puntos es grande y los espesores de las láminas delgados, es posible que la magnitud de la corriente derivada no sea significativa. En este caso no es necesario aumentar la densidad de corriente para los puntos sucesivos.

Si el material es buen conductor de la corriente eléctrica y las uniones están cercanas unas de otras, buena parte de la corriente pasará a través de ellas, ocasionando una disminución en la densidad de corriente original de diseño, para este caso es conveniente aplicar un incremento en la corriente para compensar la pérdida por derivación [27].

### **2.2.2.4 Acceso a la unión**

Para realizar una correcta unión soldada, tanto el equipo de soldadura como los electrodos deben encontrarse en perfecto estado, los electrodos deben tener franco acceso hasta el punto donde se realizará la unión, como el diseño de estas uniones es a traslape, debe haber acceso tanto de un lado de la unión como del otro. Esto es un factor sumamente importante; si los electrodos tienen dificultad para entrar a la zona de soldadura o en su trayecto colisionan con el metal base, se podría generar una mala zona de contacto electrodo-pieza de trabajo, generando mala calidad del botón de soldadura [27].

### 2.2.2.5 Resistencia mecánica de la soldadura

Una soldadura de resistencia por punto, la cual está sometida a fuerzas de corte, tiene una resistencia mecánica que está determinada por el área de la sección transversal del botón de soldadura en el plano de las superficies de empalme.

En las uniones, la fuerza de tensión aplicada tiene una excentricidad en la línea de acción debido al diseño tipo traslape. Esta excentricidad genera un fenómeno de rotación en el punto de soldadura a la hora en que la carga progresivamente se incrementa. La resistencia a la rotación aumenta cuando aumentan los espesores de las láminas soldadas. La falla ocurre por cizallamiento a través del botón de soldadura o por desgarre de material aledaño a la zona soldada. En la Figura 2.16 se observan los dos tipos de falla [24].

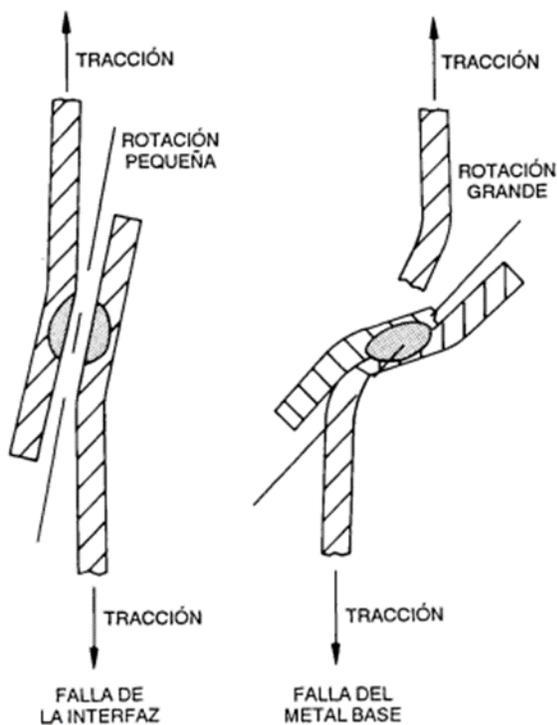


Figura 2.16 Tipos de fallas en función de la rotación [24].

Comúnmente si el punto de soldadura tiene una resistencia mecánica menor a la resistencia inherente del metal base fallará por cizallamiento del botón de soldadura, si su resistencia es igual o un poco mayor que la resistencia del metal base fallará por desgarramiento del metal base. La falla por desgarramiento se da siempre en un botón de soldadura cuyo tamaño sea por debajo de un diámetro mínimo, este diámetro mínimo es diferente para cada tipo de metal base. Para encontrarlo, se toma en cuenta la composición química y propiedades mecánicas del metal en estudio. Si el tamaño del botón de soldadura aumenta por encima de este diámetro mínimo la resistencia mecánica de la unión también aumenta.

Las uniones de resistencia de puntos tienen poca resistencia mecánica si se someten a esfuerzos cuya línea de acción sea normal al eje longitudinal de las láminas, debido a una muesca aguda entre las láminas en la periferia del botón de soldadura, por lo que se recomienda que estas uniones no se prueben en este sentido [24].

En varias soldaduras de punto que estén cerca las unas de las otras es posible que algunas de ellas no cuenten con la resistencia mecánica esperada, ya que, como se mencionó anteriormente en estas soldaduras aledañas, existe una derivación de corriente, generando menos calor y por ende menos penetración y diámetro del punto de soldadura que lleva a una disminución de resistencia mecánica. Entonces, al estar más cerca puntos de soldadura entre ellos mismos es muy probable que la resistencia mecánica al cizallamiento disminuya [24].

### **2.2.3 Generación de calor**

Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor, el calor producido está basado en tres factores: el primero, el amperaje de dicha corriente; el segundo, la resistencia de los conductores (en este caso se considera la resistencia de los electrodos y también la del material base a soldar), y el tercero, es la duración de la corriente.

El calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente y directamente proporcional a la resistencia y al tiempo. Ahora bien, una parte de este calor generado es utilizado para fundir el metal base y crear la soldadura, y otra parte se disipa al metal aledaño a la zona de unión.

El circuito de una máquina de soldadura por puntos en conjunto con el material base constituyen una serie de resistencias, las cuales afectan la magnitud de la corriente. El calor que se genera en cierto punto del circuito es determinado por la resistencia de ese punto en particular, esto es muy importante porque genera un calentamiento rápido necesario para la fusión de los metales. Para la soldadura de resistencia, existe una distribución de temperaturas que se considera en siete puntos diferentes, estos puntos son resistencias conectadas en serie las cuales determinan la distribución de temperatura [28]. En la Figura 2.17 se muestra dicha distribución.

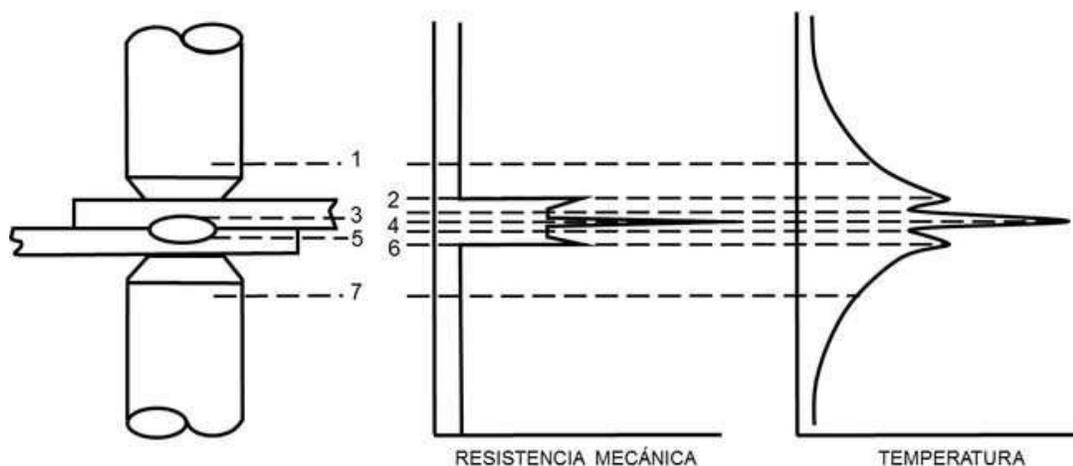


Figura 2.17 Distribución de temperaturas en el proceso RSW [28].

Zona 1 (puntos 1 y 7), constituye la resistencia eléctrica del material del electrodo.

Zona 2 (puntos 2 y 6), constituye la resistencia de la unión de los electrodos y el metal base. La resistencia depende de la calidad superficial del electrodo y metal base, el tamaño de la cara del electrodo, y su fuerza compresiva. Estos puntos son de considerable generación de calor, sin embargo, no alcanzan lo suficiente para fundir los materiales, debido primeramente a la alta conductividad térmica de los electrodos y además de esto, comúnmente son enfriados por agua.

Zona 3 (puntos 3 y 5), constituyen la resistencia del metal base, lo cual es directamente proporcional a su resistividad y espesor, e inversamente proporcional al área de sección transversal del trayecto de la corriente.

Zona 4 (punto 4), es la resistencia de la unión de las caras internas en el punto donde se formará la soldadura. Este punto, en el cual existe mayor resistencia, es donde se genera la mayor cantidad de calor. A diferencia de los puntos 2 y 6, en los cuales también se produce un calor considerable, el punto 4 no tiene forma de disipar el calor hacia los electrodos [24] [27].

En cada punto de los mencionados anteriormente existe la generación de calor, pero se procura que el mayor calor se genere en la cara interna de la soldadura o punto 4. Para producir el botón de soldadura y en los demás puntos, se procura que el calor sea lo menos posible.

### **2.2.3.1 Balance calórico y disipación de calor**

Se considera un equilibrio de calor cuando las penetraciones de la soldadura son aproximadamente iguales en los metales base, por lo general la mayoría de las aplicaciones de soldadura de resistencia ocupan materiales del mismo calibre o espesor, electrodos del mismo material, forma y tamaño. Para estos casos, el balance calorífico se da sin dificultad, sin embargo, existen otros casos donde dicho balance no está equilibrado. El balance se puede afectar por los siguientes factores [24]:

1. Diferencias en las conductividades tanto eléctricas como caloríficas de los materiales que se pretendan unir.
2. Diferencia en la geometría de las piezas a soldar.
3. Conductividades eléctricas y caloríficas en los electrodos.
4. Geometría de los electrodos.

Habrá un desequilibrio de calor cuando los materiales base tengan diferente espesor o distinta composición química. Para contrarrestar esto, se puede utilizar el menor tiempo de soldadura con la corriente más baja que pueda producir soldaduras aceptables [25].

Cuando se realiza una soldadura también se produce una disipación de calor hacia las zonas aledañas del material base y los electrodos, esta disipación es por conducción. En la Figura 2.18 se muestra lo mencionado.

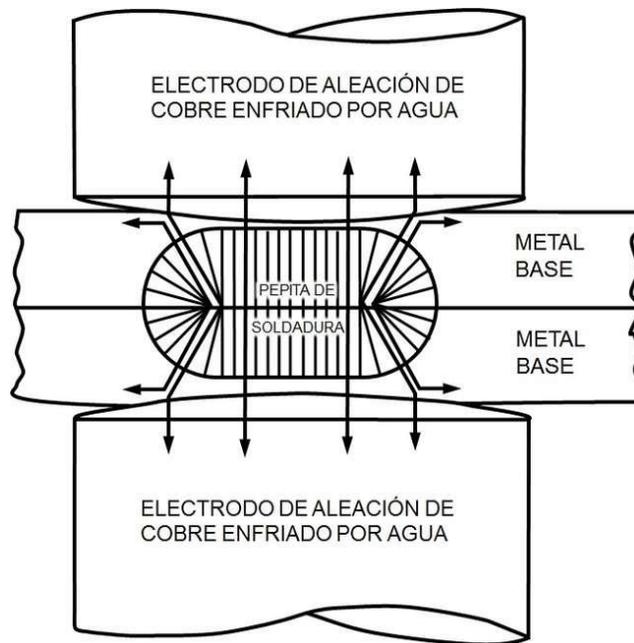


Figura 2.18 Disipación de calor en soldadura de resistencia [24].

Existen dos fases en la disipación: la primera, durante la aplicación de la corriente, y la segunda, después de que se ha interrumpido la corriente.

## **2.2.4 Variables del proceso**

El proceso de soldadura de resistencia por puntos, al igual que todo proceso de unión, tiene variables que al alterarse o modificarse, también alteran y modifican las propiedades mecánicas del punto de soldadura. Para RSW, las variables que lo afectan son las siguientes: corriente eléctrica, tiempo de soldadura y presión que ejercen los electrodos [25] [26].

### **2.2.4.1 Corriente eléctrica**

La corriente eléctrica es una variable importante dentro del proceso RSW, ya que puede generar más calor para el proceso que lo que produciría la resistividad del material o el tiempo de permanencia [24]. Se puede decir que, si se aumenta la densidad de la corriente, aumenta también el tamaño, penetración y resistencia mecánica del punto de soldadura [25]. Para cada material hay un límite máximo de corriente, si este límite es rebasado aparecen condiciones no deseables como depresiones profundas en los metales base, expulsión de metal fundido y menor resistencia mecánica. La Figura 2.19 ilustra la relación entre la corriente y la resistencia al cizallamiento.

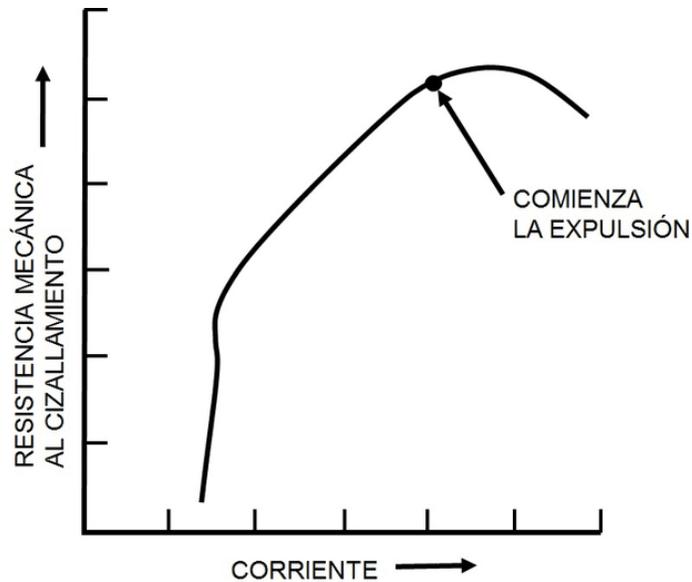


Figura 2.19 Gráfica de corriente contra resistencia al cizallamiento [24].

Para la soldadura por puntos se puede utilizar tanto corriente continua como corriente alterna. La corriente de soldadura va de un rango de 1,000 a 100,000 amperes, dependiendo del espesor del material a usar y de la resistencia eléctrica del mismo.

Cuando se utiliza corriente continua hay un periodo que se denomina tiempo de pendiente positiva, que es cuando la corriente se eleva desde cero hasta el nivel programado en la máquina. Esta elevación paulatina de corriente, sirve para no calentar apresuradamente la zona y para evitar que pueda haber expulsión de material. También hay un periodo llamado tiempo de pendiente negativa, el cual consiste en un decremento controlado del nivel programado en la máquina hasta que vuelve a cero. Esto ayuda al enfriamiento paulatino del botón de soldadura, lo cual controla el enfriamiento y evita el agrietamiento [25].

### 2.2.4.2 Tiempo de soldadura

La variable tiempo, hablando de la generación del calor necesario para la realización de la soldadura, juega un papel considerable, ya que el calor que se genere será directamente proporcional al tiempo. Durante el proceso de soldadura se requiere un cierto tiempo mínimo necesario para alcanzar la temperatura de fusión del material con una densidad de corriente establecida [24].

Cuando se genera calor para una soldadura, parte de dicho calor se pierde por conducción hacia el metal base circundante, si el tiempo de soldadura es grande, habrá más oportunidad que parte del calor que se vaya generando se disipe, lo que puede provocar una zona afectada por el calor más extensa en el metal base. Además de esto, si después de generarse la fusión del material sigue transitando corriente por más tiempo, puede provocar expulsión de material fundido.

De hecho, una corriente adecuada que fluye por tiempo prolongado genera el mismo efecto perjudicial que una corriente de excesivo amperaje en un tiempo idóneo. En la Figura 2.20 se aprecia la relación entre el tiempo y la resistencia al cizallamiento, suponiendo que todas las demás variables permaneces sin cambios. Existe una zona óptima de tiempo que genera una resistencia al cizallamiento aceptable, si continúa el flujo de corriente después de esa zona óptima se producirán los efectos dañinos antes mencionados [27].

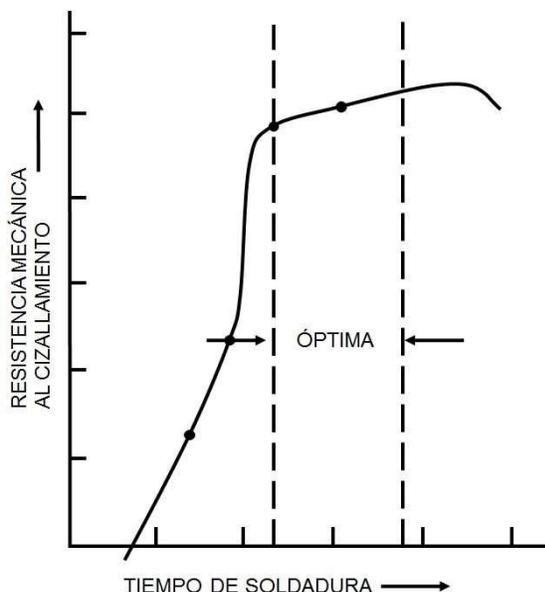


Figura 2.20 Gráfica de tiempo contra resistencia al cizallamiento [24].

La corriente que se necesita para realizar una soldadura es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de aplicación de ella. Por esto, si el tiempo de aplicación se va reduciendo, la intensidad de la corriente deberá ir aumentando. Si el tiempo fuera extremadamente corto, la intensidad de corriente deberá ser muy alta [27].

Son varios los factores que intervienen para determinar el tiempo mínimo de soldadura, uno de ellos es la composición química de los materiales a soldar, o el espesor de las láminas a unir, sin embargo, los rangos de tiempo van desde 1/120 s, en láminas muy delgadas; hasta varios segundos, en láminas gruesas.

Existen soldaduras llamadas de un solo impulso, son aquellas en las cuales la corriente se aplica continuamente. Cuando se aplica la corriente en varios impulsos, separados por intervalos de tiempo, se dice que la soldadura se realizó por soldadura de múltiples impulsos.

### **2.2.4.3 Presión de los electrodos**

Al observar microscópicamente la superficie interior de contacto entre los metales base, o las superficies exteriores de contacto entre los metales base y los electrodos, es posible observar una serie de picos y valles. Si la presión entre ellos es poca, solo existirá contacto metal-metal entre algunos de esos picos que se toquen, resultando en un área menor de contacto real de la superficie del electrodo, lo cual provoca un aumento en la resistencia al flujo de la corriente.

Si la presión de contacto aumenta, estos picos y valles se aplastan teniendo más contacto entre sí, lo cual genera un incremento en el área efectiva de unión metal-metal provocando una menor resistencia al flujo de corriente.

Si la presión de soldadura se incrementa, también el flujo de corriente aumentará hasta cierto valor, sin embargo, al aumentar el libre flujo de corriente, la resistividad y por lo tanto el calor generado disminuirán. Por lo tanto, para contrarrestar esta conductividad es necesario aumentar ya sea la densidad de corriente o el tiempo de flujo de la corriente [26] [29].

La magnitud de la presión ejercida depende del área de la cara de los electrodos y de la fuerza aplicada. Las funciones principales de la presión de soldadura son: establecer la unión de las piezas de trabajo entre sí, reducir la resistencia inicial, confinar el metal fundido de soldadura y consolidar el punto de soldadura [24] [27] [30].

### **2.2.5 Electrodo**

Los electrodos están considerados como una herramienta perecedera del proceso RSW, ellos pueden ser de aleaciones a base de cobre o de composiciones de metales refractarios. Los electrodos deben poseer suficiente dureza para soportar trabajo mecánico considerable, ya que estarán bajo la combinación de esfuerzos y elevadas temperaturas. Sin embargo, cabe hacer mención que entre más duro sea el material habrá disminución de conductividad

eléctrica y térmica. La aleación ideal sería aquella que brindara buena resistencia mecánica y buenas propiedades de conductividad eléctricas y calóricas [31] [32].

Los electrodos desempeñan funciones importantes como la conducción de la corriente de soldadura a los metales base, transmiten la presión de soldadura, y disipan parte del calor generado durante la misma.

La forma y tamaño de los electrodos son determinados por el tipo de material a soldar y su espesor. La Figura 2.21 muestra algunos tipos de electrodos.

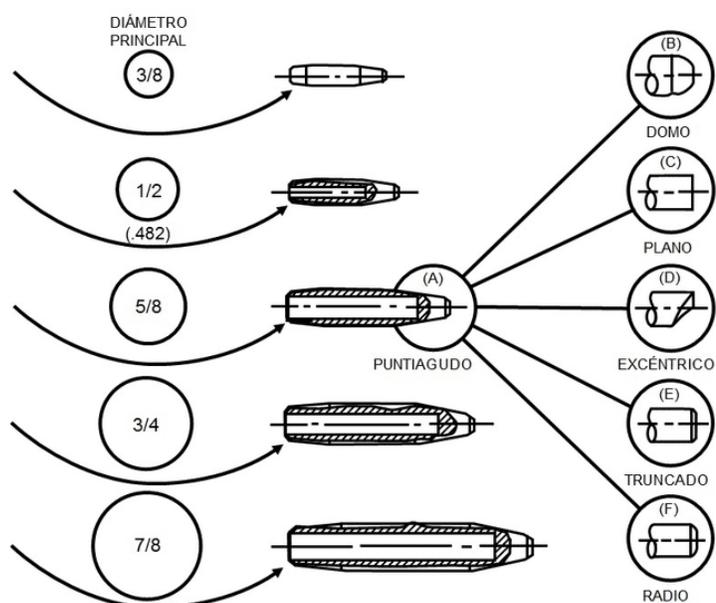


Figura 2.21 Electrodos: diámetros y tipos de puntas [31].

Los electrodos deberán tener de preferencia un sistema de enfriamiento, que llegue lo más cerca del área de contacto; se basa en un tubo que es parte del porta electrodo, el cual conduce agua y enfría la parte interior de la punta del electrodo. Si no fuera posible por alguna causa, se puede utilizar un sistema de enfriamiento externo por inundación o espirales de enfriamiento.

Para lugares de difícil acceso, se utiliza un tipo de electrodo que forma un ángulo con el eje, esto es de gran utilidad en la industria automotriz y otros rubros debido a que se puede tener acceso a lugares remotos durante el proceso de ensamble. La Figura 2.22 ilustra un juego de electrodos en ángulo de 30 grados [31].

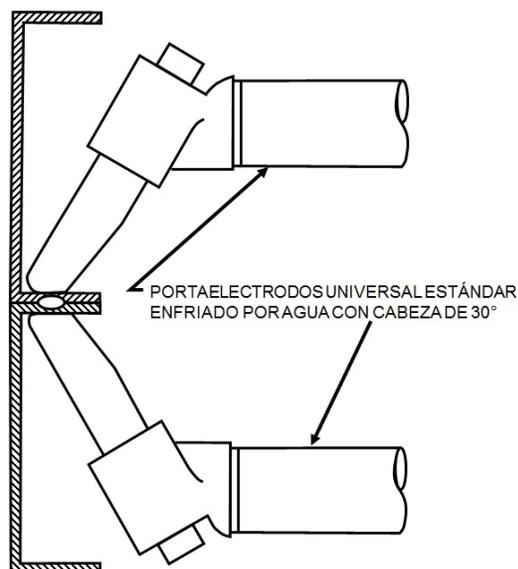


Figura 2.22 Electrodo para puntos especiales [31].

El porta electrodo en combinación con el electrodo, logran realizar puntos de soldadura en zonas de difícil acceso durante el ensamble de láminas, logrando entrar en lugares de planos profundos. La Figura 2.23 muestra cómo se pueden realizar soldaduras en lugares de difícil acceso superando aún otros procesos de soldadura.

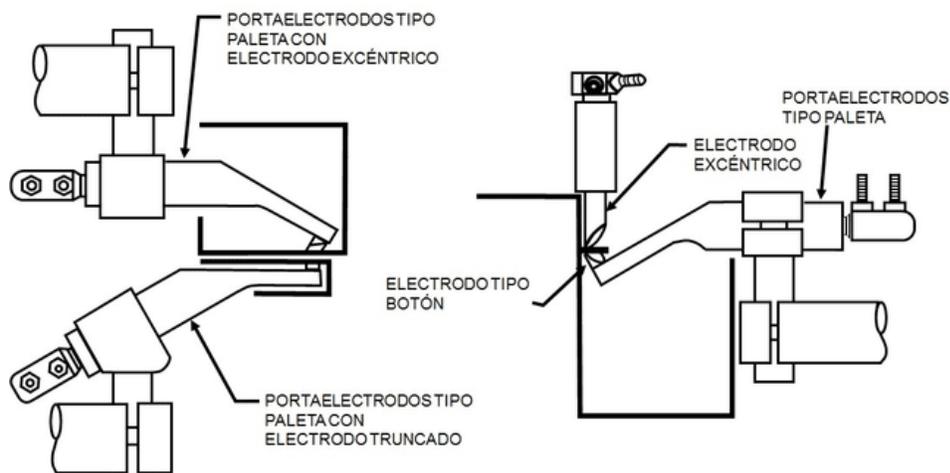


Figura 2.23 Combinaciones de porta electrodos y electrodos [24].

Los electrodos, con el uso constante tienden a sufrir un deterioro normal, como cualquier herramienta de trabajo, lo que provoca una mala calidad del punto de soldadura, por eso es necesario dar el mantenimiento oportuno a los electrodos. Los electrodos con uso frecuente, experimentan la adherencia de pequeñas partículas de los metales base; si estas partículas son demasiadas, provocarán el sobrecalentamiento de los electrodos y estos se achatarán con mayor rapidez [29]. Una revisión periódica es fundamental para conocer el estado de los electrodos y programar rectificaciones o cambio de pieza si fuere necesario [28].

### 2.2.6 Defectos en la soldadura

El uso del proceso de soldadura RSW fuera de los parámetros óptimos conduce a discontinuidades y defectos en las uniones soldadas [33].

Magnitudes fuera de los rangos idóneos de corriente de soldadura, presión de electrodos y tiempo de soldadura son las detonantes de que sucedan estos fenómenos.

Una discontinuidad es la pérdida de la homogeneidad dentro de la soldadura, un defecto es una discontinuidad inaceptable [33]. Los defectos en la soldadura desencadenan una serie de eventos perjudiciales. Para el sector industrial, los defectos representan pérdidas de tiempo por retrabajos, y mayores costos de producción. Dentro de los defectos más comunes del proceso RSW en la soldadura de láminas de acero se encuentran los siguientes [33]:

1. Expulsión de metal líquido.- Se produce por un calor excesivo en el área de la soldadura, esta discontinuidad se encuentra entre las dos láminas de metal unido, la presencia de ella genera una muesca que provoca un concentrador de esfuerzos y una reducción de la resistencia mecánica a la tensión en la unión soldada.

2. Grietas superficiales.- Son producidas por un calor extremo en la zona afectada por el calor en las soldaduras. La presencia de dichas grietas también es un indicador de defectos internos.

3. Agrietamiento por licuación.- Es una discontinuidad subsuperficial, aparece en la zona afectada por el calor debido a un calor elevado y una segregación de algunos elementos de aleación en esa zona.

4. Profunda indentación de electrodo.- Se presenta cuando la presión de los electrodos sobre las piezas de trabajo, forma una depresión profunda en la superficie del material. Está asociado a un tamaño muy grande de botón de soldadura generado por altas intensidades de corriente eléctrica.

# CAPÍTULO 3

## ESTADO DEL ARTE

### 3.1 Acero TRIP

Los aceros de alta resistencia se clasifican en tres generaciones. Cada generación tiene características microestructurales y propiedades mecánicas que las distinguen de las otras. En la actualidad se realizan investigaciones para el diseño y desarrollo de nuevos grados de aceros de tercera generación que cumplan con las necesidades de la industria automotriz en términos de propiedades mecánicas mejoradas, bajo costo y buena soldabilidad.

#### 3.1.1 Clasificación y propiedades

Askari y colaboradores (2016) [34], mencionaron que los aceros avanzados se clasifican de acuerdo a la resistencia última a la tensión (UTS, por sus siglas en inglés) y el porcentaje de elongación a la fractura. Los aceros de primera

generación como los de plasticidad inducida por transformación (TRIP), doble fase (DP), fase compleja (CP), aceros martensíticos (MS), tienen un rango de resistencia última a la tensión de 500 a 1,600 MPa, y una elongación a la fractura de 5 a 30%. Estos aceros se desarrollaron para extender el rango de resistencia de los aceros tradicionales más allá de los 800 MPa. Sin embargo, aunque si lo lograron, fue a expensas de un decremento en la ductilidad.

Dentro de los aceros de segunda generación mencionan a los de plasticidad inducida por maclado (TWIP), baja plasticidad inducida (L-IP) y acero inoxidable austenítico (AUST SS). Estos últimos tienen una microestructura basada en austenita, teniendo una resistencia última a la tensión de 900 a 1,600 MPa y una elongación de 45 a 70%. Estos aceros resolvieron el problema del decremento de la ductilidad con el incremento en la resistencia observado en los aceros de primera generación, pero con un incremento alto en los costos de producción debido al gran porcentaje de elementos aleantes que contienen, los cuales los encarecen y limitan sus aplicaciones [34] [35].

De acuerdo con la información reportada por estos autores, los aceros de tercera generación aún están en desarrollo, pero se busca que sean menos costosos que los aceros de la segunda generación, y que posean propiedades competitivas con relación a los aceros de primera y segunda generación [36]. La Figura 3.1 ilustra lo antes mencionado [37].

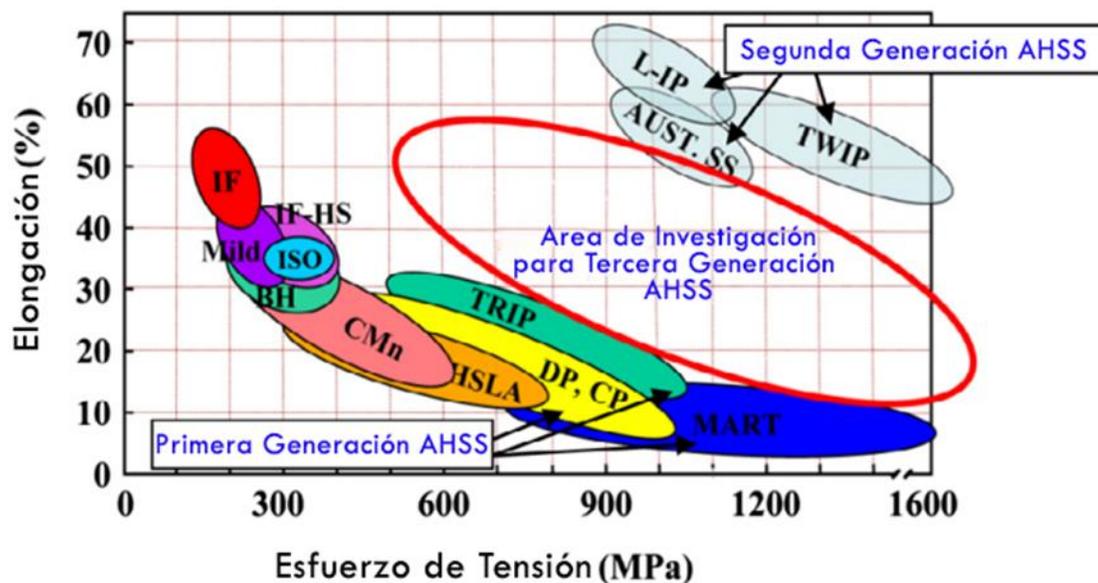


Figura 3.1 Relación entre el esfuerzo último a la tensión y la elongación a fractura de aceros automotrices de primera, segunda y tercera generación [37].

Entre los estudios que realizaron, encontraron que para algunos aceros cuyas propiedades mecánicas fueron mejoradas fue por tener un incremento en el volumen de la austenita retenida, hasta en un 22% en volumen, en comparación con el porcentaje del 10 al 15% de los aceros TRIP de primera generación [34].

### 3.1.2 Procesos de endurecimiento

Lloyd y colaboradores [38] encontraron que los aceros TRIP tienen una mayor capacidad de endurecimiento dando una mejor combinación de resistencia-ductilidad en comparación con los aceros convencionales.

El endurecimiento por deformación es una característica que se debe tener en cuenta en los aceros si se desea realizar operaciones de conformado y es una de las ventajas de los aceros con efecto TRIP sobre los convencionales. Esta característica se mide con el valor del coeficiente de endurecimiento que muestra

la velocidad de un acero a endurecerse a medida que se le aplica un esfuerzo en la zona plástica. Este coeficiente debe ser mayor en los aceros que poseen efecto TRIP si se comparan con los aceros convencionales debido a que con la formación local de martensita se evita la inestabilidad plástica y hace que la zona de deformación uniforme aumente. En un momento determinado el endurecimiento se completa, originándose la estricción o el encuellamiento característico que se ilustra en la Figura 3.2. Este fenómeno de adelgazamiento en algún punto del material marca el parteaguas del endurecimiento, después de la estricción, el material no se endurecerá más, sino que continuará deformándose hasta que ocurra la ruptura.

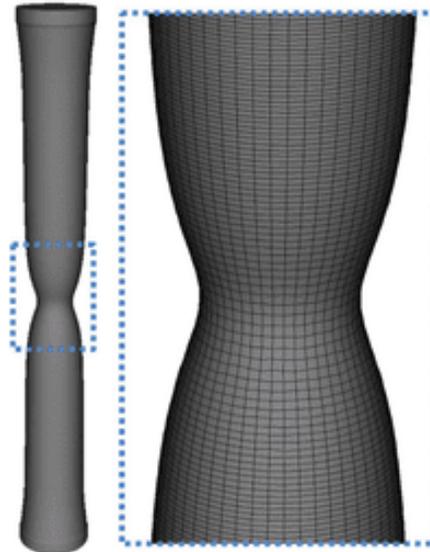


Figura 3.2 Representación esquemática del encuellamiento o estricción [38].

En cualquier metal, el proceso de endurecimiento por trabajo se basa en la capacidad de reacomodar los defectos dentro de la estructura interna. Las dislocaciones se reacomodan en las celdas unitarias provocando esfuerzos internos dentro de las mismas, lo cual causa el endurecimiento del material.

En los TRIP la deformación inicial y respectivo endurecimiento, comienza con el reacomodo de los defectos planos, maclas, y límites de fase, en conjunto con

el reacondo de las dislocaciones. Dichos límites de fases reducen la trayectoria libre del movimiento de las dislocaciones, lo que genera un lapso prolongado de endurecimiento.

La deformación posterior y su endurecimiento, es la propiamente llamada efecto TRIP que se basa en la transformación de la austenita retenida a martensita.

Los autores mencionados, concluyen indicando que la falta de continuidad de endurecimiento progresivo después del encuellamiento es debida al acomodo total de las maclas y la transformación completa de toda la cantidad existente de austenita retenida a martensita.

También mencionan que el endurecimiento de aceros TRIP sometidos a bajos esfuerzos, se dará por plasticidad generada por el reacondo de las dislocaciones; si se aumentara la intensidad del trabajo, entonces la deformación generará el efecto TRIP [38].

### **3.1.3 Efecto del manganeso y aluminio**

El efecto TRIP, como se ha mencionado, ocurre cuando el acero, al sufrir una deformación plástica promueve la transformación de austenita retenida a martensita.

Ariza y colaboradores (2018) [39] reportaron que, para retener la austenita a temperatura ambiente, es necesario que el carbono enriquezca a la austenita para estabilizarla y evitar que ésta transforme durante el enfriamiento. El aluminio y el silicio son elementos que ayudan a que el carbono permanezca dentro de la austenita facilitando que ésta sea retenida a temperatura ambiente. Así, cuando un acero TRIP se encuentra a temperatura ambiente conserva una cantidad de austenita sin transformar, que se le conoce como austenita retenida.

Kaar y colaboradores (2018) [40], investigaron los efectos del manganeso y el aluminio sobre la estabilidad de la austenita y las propiedades mecánicas de

aceros TRIP. Se utilizaron láminas con espesores de 1.5 mm; las composiciones químicas de los aceros investigados se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química de los aceros utilizados por Kaar (% en peso) [40].

Composición Química	C	Si	Mn	Al
A: Fe-0.4C-1.1Mn-2.8Al	0.4	0.3	1.1	2.8
B: Fe-0.4C-1.6Mn-3.3Al	0.4	0.3	1.6	3.3
C: Fe-0.4C-1.5Mn-5.2Al	0.4	0.3	1.5	5.2
D: Fe-0.4C-2.5Mn-5.2Al	0.4	0.3	2.5	5.2

Los contenidos de carbono y silicio se mantuvieron constantes, pero se modificaron los contenidos de manganeso y aluminio. Se estudió el efecto que tienen estos elementos sobre la estabilidad de la austenita y las propiedades mecánicas de dichos aceros.

Los aceros TRIP estudiados fueron clasificados como aceros de densidad reducida debido a que el aluminio posee una masa atómica más baja que la del hierro puro. Además de esto, como los radios atómicos del aluminio son más grandes proveen una expansión en la red resultante. De ahí que, por cada 1% en peso de aluminio que se agregue a la aleación, reducirá su densidad absoluta en 1.3%.

Aunque el aluminio es el principal reductor de densidad, también el manganeso juega un papel en dicho efecto. En la Tabla 3.2 se muestran los porcentajes de disminución de la densidad en los aceros estudiados en función del contenido de manganeso y aluminio.

Tabla 3.2 Porcentajes de disminución de la densidad del acero en función del contenido de Mn y Al (% en peso) [40].

Composición Química	Mn	Al	% Disminución de densidad
A: Fe-0.4C-1.1Mn-2.8Al	1.1	2.8	4.24
B: Fe-0.4C-1.6Mn-3.3Al	1.6	3.3	4.80
C: Fe-0.4C-1.5Mn-5.2Al	1.5	5.2	7.38
D: Fe-0.4C-2.5Mn-5.2Al	2.5	5.2	7.52

También comprobaron que el contenido de aluminio ayuda en la soldadura de resistencia por puntos, ya que genera la existencia de fase ferrita en todo el rango de temperaturas del proceso, esto crea la combinación de fase ferrita y martensita, y no solo de martensita exclusivamente, resultando con esto que en la zona de fusión como en la zona afectada por el calor no se generen regiones de alta dureza.

En la Figura 3.3 se muestran las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas. Se concluyó que la adición de manganeso y aluminio causa un aumento en la resistencia a la tensión de 725 a 1,050 MPa y una disminución del alargamiento de 39 a 17%. El límite de elasticidad disminuyó de 555 a 385 MPa con el aumento en la aleación de dichos elementos. El aumento en el contenido total de manganeso más aluminio, causó un incremento en la resistencia a la tensión y una disminución en la elongación a la fractura.

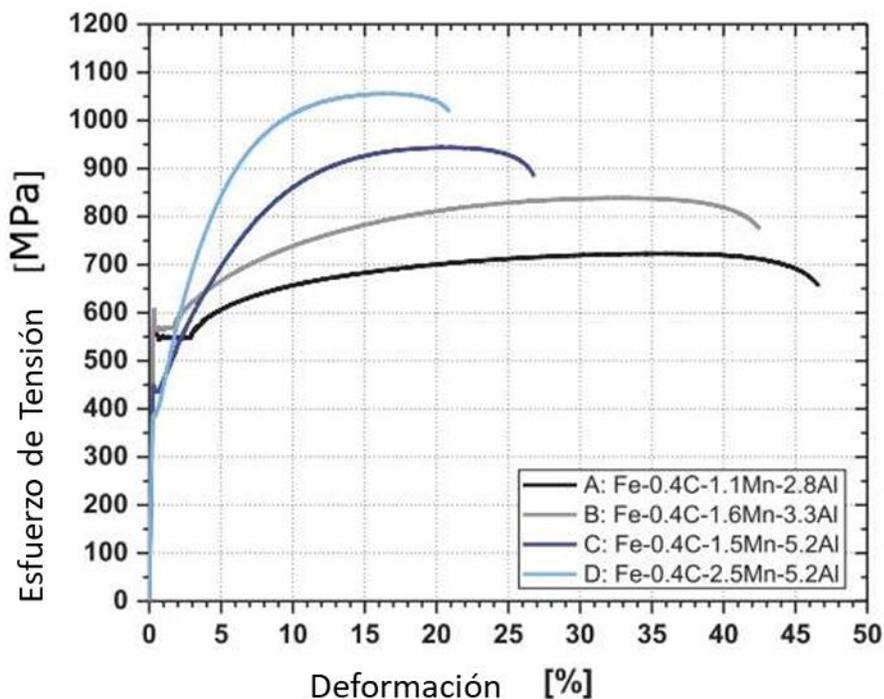


Figura 3.3 Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas en los aceros investigados [40].

Además, encontraron que las mejores combinaciones de manganeso y aluminio que promueven una mayor estabilidad de la austenita son: 1.1% Mn, 2.8% Al y 1.6% Mn, 3.3% Al. La mejor proporción de resistencia y ductilidad se logró con el acero con contenidos de 1.6% Mn y 3.3% Al. Concluyen que estos aceros son atractivos para el mercado automotriz debido a su capacidad de estabilizar la austenita y la densidad disminuida del material [40].

### 3.2 Soldadura de aceros TRIP

El proceso de soldadura RSW empleado para unir aceros avanzados de alta resistencia es una herramienta fundamental dentro de la industria automotriz, se

estima que una unidad vehicular tiene de 2,000 a 5,000 botones de soldadura por dicho proceso.

Varbai y colaboradores [41] mencionan que los aceros avanzados TRIP poseen excelentes propiedades mecánicas, junto con un alto límite elástico y ductilidad. Para la industria automotriz, las estructuras de paredes delgadas de alta resistencia, proveen la materia prima adecuada, peso ligero del vehículo y elevado margen de seguridad para el tripulante.

Estos autores, realizaron pruebas de soldadura en láminas de acero de 1 mm de espesor, en tres diferentes tipos de aceros avanzados, con tres diferentes resistencias a la tensión: 1,500 MPa, 1,700 MPa y 1,300 MPa. La composición química y la nomenclatura de los aceros utilizados se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Composición química y resistencia a la tensión de los aceros utilizados por Varbai (% en peso) [41].

Resistencia a la tensión.	Composición química (% en peso)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Nb	B
<b>1,500 MPa</b>	0.20	0.21	0.82	0.07	0.03	0.01	0.03	0.03	<0.01	<0.01
<b>1,700 MPa</b>	0.12	0.22	0.42				0.32	0.03	<0.01	
<b>1,300 MPa</b>	0.26	0.22	1.07	0.02	0.02	0.01				0.005

Los parámetros variables fueron el tiempo de soldadura y la corriente, y se ensayaron las probetas en tensión; la presión de soldadura se mantuvo constante para todos los ensayos a 1.9 kN.

La Tabla 3.4 muestra los parámetros óptimos utilizados los cuales generaron los valores más altos de resistencia a la tensión. Como se observa, los tiempos utilizados fueron de un orden inferior al segundo, y la intensidad de corriente varió dentro del rango de 5.4 a 7.2 kilo amperes. Encontraron que, establecer la corriente de soldadura correcta tiene mayor importancia en casi todos los casos. También encontraron que, si se usan tiempos de soldadura más largos, la zona afectada por el calor tendrá mayor ablandamiento [41].

Tabla 3.4 Parámetros óptimos de tiempo y corriente para láminas de 1 mm [41].

Tipo de unión	Tiempo Ciclos	Tiempo Segundos	Corriente (kA)	Presión (kN)
1,500 MPa – 1,500 MPa	20	0.40	5.4	1.9
1,700 MPa – 1,700 MPa	14	0.28	6.7	1.9
1,300 MPa – 1,300 MPa	30	0.60	7.2	1.9
1,500 MPa – 1,300 MPa	30	0.60	7.2	1.9
1,700 MPa – 1,300 MPa	21	0.42	6.2	1.9

En la Figura 3.4 se observan las micrografías del botón de soldadura de las uniones homogéneas. Se puede apreciar que toda la zona es martensita de grano grueso.

El proceso RSW tiene la peculiaridad de elevar con mucha rapidez la temperatura hasta fusionar los metales, pero también tiene el poder de enfriar la zona de fusión a altas velocidades, este suceso genera un efecto de templado en la soldadura, generando así la martensita.

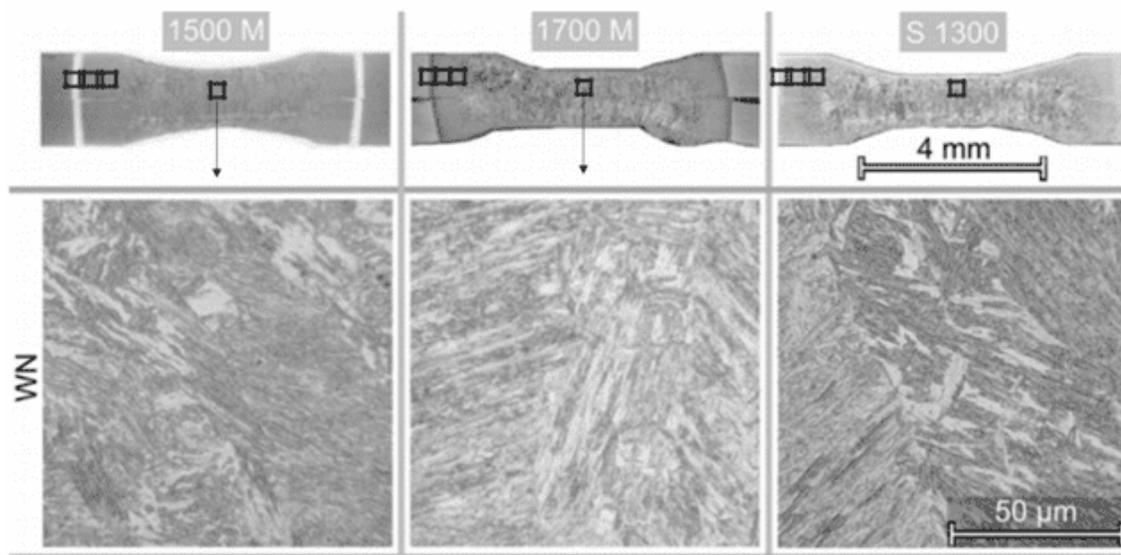


Figura 3.4 Macrografías y micrografías de los botones de soldadura de uniones homogéneas para láminas de 1 mm y resistencia a la tensión de 1,500, 1,700 y 1,300 MPa [41].

Se analizaron también micrografías en la zona afectada por el calor (Figura 3.5). Se observaron tres regiones, la primera de ellas está en la zona crítica, muy cerca del botón de soldadura, denominada como UCHAZ. En este punto, la temperatura alcanzó la zona de austenitización, o sea, por encima de la línea  $A_3$ , también aquí por el rápido enfriamiento se produjo una microestructura principalmente de martensita de grano grueso, la cual generó granos más gruesos que los originales de los materiales base.

La segunda región está en la zona intercrítica, denominada como ICHAZ, aquí se alcanzó una temperatura que se encuentra entre las líneas  $A_3$  y  $A_1$ , por lo cual se tuvo la presencia de austenita y ferrita. Con el enfriamiento rápido, se generó una microestructura en la que la austenita se transformó en martensita junto con ferrita.

La tercera región está en la zona subcrítica, denominada como SCHAZ, donde la temperatura está por debajo de la línea  $A_1$ , por lo tanto, la martensita encontrada en la microestructura fue la ya existente en los materiales base. En la micrografía del material 1,700 MPa se observa la presencia de carburos en los bordes del grano austenítico, en el caso del material 1,300 MPa los carburos son más notables debido al mayor tiempo de soldadura.

En las macrografías de la Figura 3.5 se muestran tres recuadros a la izquierda de cada imagen, esos recuadros de izquierda a derecha son SCHAZ, ICHAZ y UCHAZ, que señalan el lugar inspeccionado por micrografía para cada una de las uniones homogéneas soldadas.

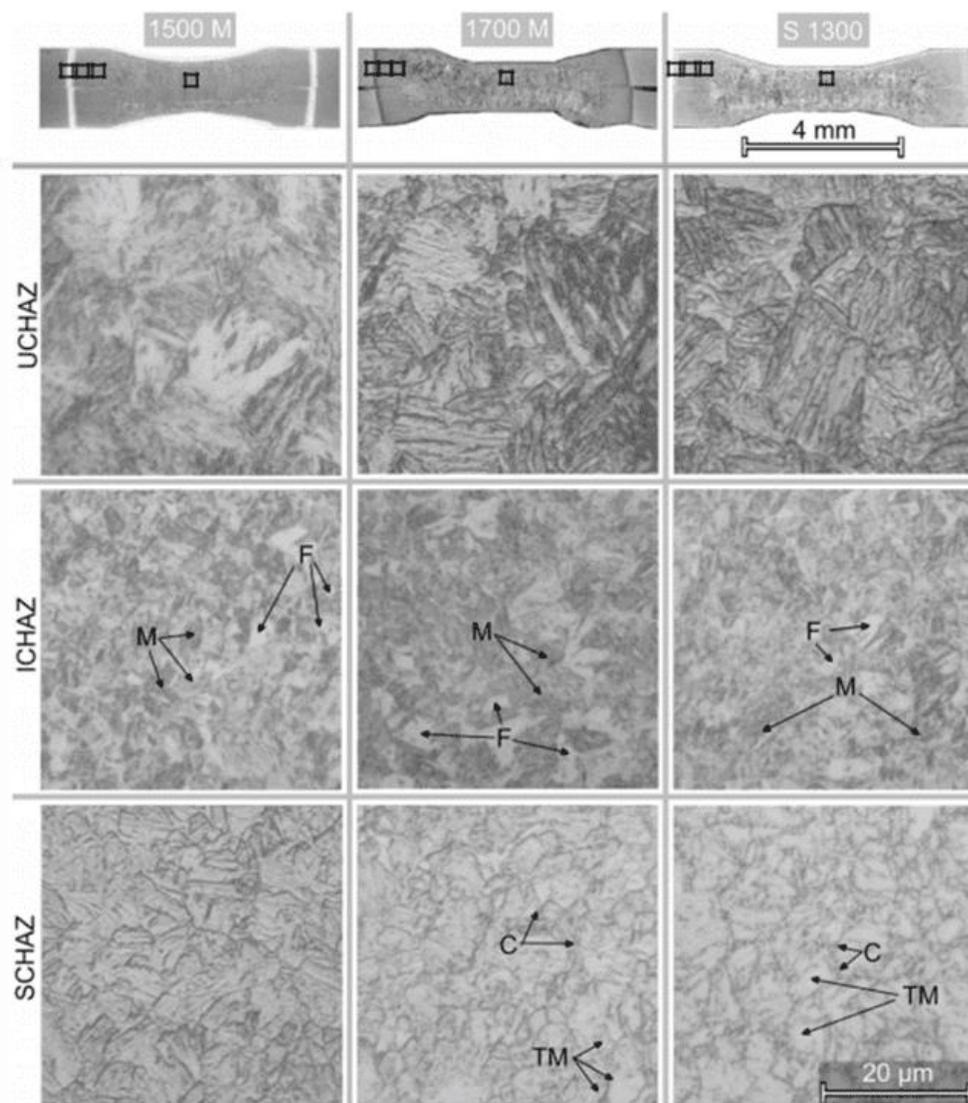


Figura 3.5 Macrográfías y micrográfías de la zona afectada por el calor de uniones homogéneas para láminas de 1 mm y resistencia a la tensión de 1,500, 1,700 y 1,300 MPa [41].

Valera y colaboradores en el 2017 [42], experimentaron con uniones disímiles entre aceros TRIP y aceros de alta formabilidad, estos se comportan de manera similar en sus fallas, como si fueran materiales homogéneos con los TRIP. El propósito del trabajo que realizaron fue optimizar los parámetros dentro del proceso RSW. Los parámetros con los cuales experimentaron fueron la

intensidad de corriente y el tiempo de soldadura, empleando electrodos con diámetro de 4 mm y aplicando con ellos una presión de 345 N. El espesor de las láminas de acero TRIP fue de 1mm, y las probetas se ensayaron mediante ensayos de tensión uniaxial.

La Tabla 3.5 muestra la composición química del acero TRIP utilizado.

Tabla 3.5 Composición química de acero TRIP de 1mm [42].

Composición química (% en peso)								
C	Si	Mn	Al	Co	Cu	B	Cr	S
0.175	0.7	1.57	0.74	0.057	0.02	0.003	0.004	0.005

El rango de parámetros a utilizar lo eligieron de la siguiente manera, para el límite inferior seleccionaron aquella corriente y tiempo que produjera un botón de soldadura que fallara por deslizamiento de la interfaz en el ensayo de tensión, esto es, un botón demasiado pequeño. Para el límite superior, seleccionaron aquella corriente y tiempo que produjera un botón de soldadura en el cual el fenómeno de expulsión de metal líquido se produjera, esto es, un botón demasiado grande. Tomando como marco estos valores, eligieron dentro de él tres niveles para corriente y tiempo, una inferior, una intermedia y una superior, las cuales se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Parámetros utilizados en el experimento [42].

Parámetros	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Corriente (kA)	4.00	4.75	5.50
Tiempo (s)	0.215	0.500	0.785
Presión (kN)	0.345	0.345	0.345

Trabajaron también en la optimización del proceso en los ensayos que realizaron, para ello utilizaron el enfoque de Taguchi para el diseño de

experimentos. Este método, les permitió encontrar las variables más relevantes del proceso y su optimización.

Al realizar los experimentos variando la intensidad de corriente y el tiempo de soldadura, se obtuvieron los siguientes valores de resistencia a la tensión [42]. (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Resistencia a la tensión directa de los ensayos realizados [42].

<b>Ensayo</b>	<b>Corriente (kA)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Resistencia a la tensión directa (N)</b>
1	4.00	0.215	2,390
2	4.00	0.500	2,729
3	4.00	0.785	3,023
4	4.75	0.215	2,773
5	4.75	0.500	3,293
6	4.75	0.785	3,206
7	5.50	0.215	2,745
8	5.50	0.500	3,214
9	5.50	0.785	3,125

Como se puede observar en la tabla anterior, la mayor resistencia a la tensión (3,293 N), se obtuvo para el ensayo número 5, en el cual se empleó una intensidad de corriente de 4.75 kA y un tiempo de soldadura de 0.500 segundos, ambos correspondieron al segundo nivel de los parámetros propuestos.

En la Figura 3.6 se observan macrografías del botón de soldadura de los ensayos realizados.

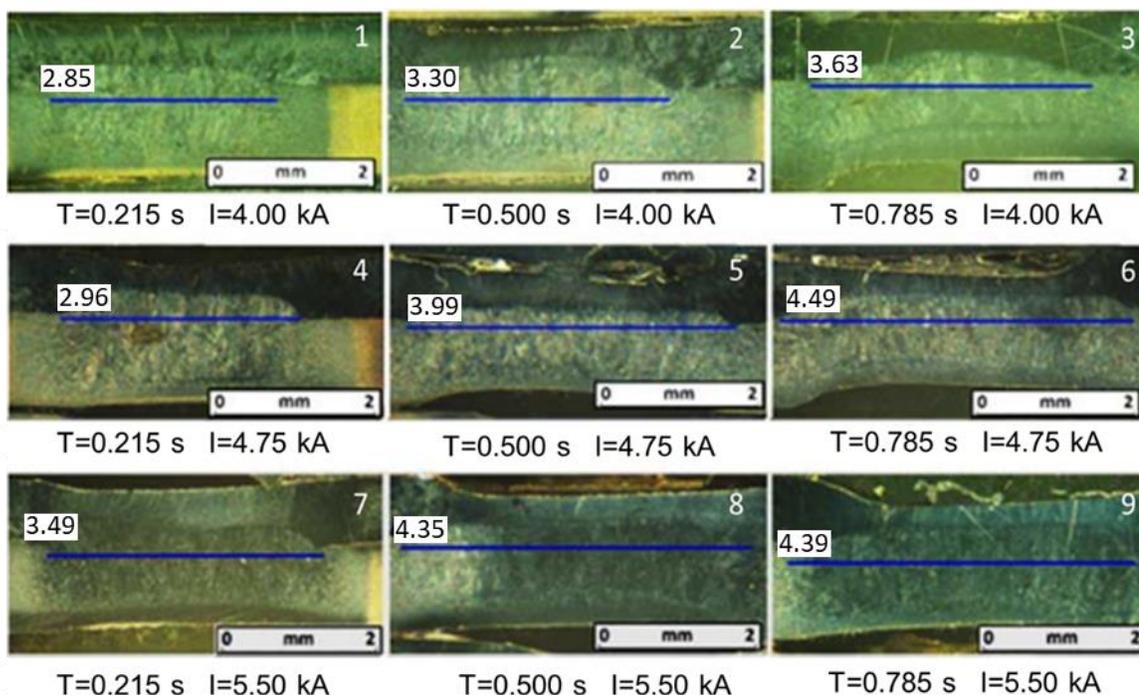


Figura 3.6 Macrografías del botón de soldadura de ensayos realizados [42].

El botón correspondiente a la mayor resistencia a la tensión se muestra en la macrografía 5 de la Figura 3.6. Se aprecia una distancia de 3.99 mm de diámetro para dicho botón; cabe mencionar que entre más aumenta la intensidad de corriente, el botón de soldadura se hace más grande y la resistencia mecánica también aumenta.

Sin embargo, las macrografías 6, 8 y 9 muestran diámetros mayores a la macrografía 5, esto es debido a que el valor crítico del diámetro del botón fue de 4.4 mm. Por lo tanto, todos los diámetros alrededor de este valor pueden sufrir expulsión de metal líquido, que fue lo que ocurrió en dichos casos, es por eso que, aunque el botón fue más grande, la resistencia a la tensión no lo fue, ya que fue afectada por el fenómeno de expulsión.

Entonces se puede concluir que, a mayor tamaño del botón de soldadura aumenta la resistencia mecánica del mismo, pero si el tamaño de la soldadura llega a ser tal que rebase el diámetro crítico produciéndose expulsión de metal líquido, la resistencia mecánica ya no aumentará más.

También llegaron a la conclusión, usando el método de Taguchi, que el parámetro que tiene más influencia para obtener el máximo esfuerzo a la tensión es la intensidad de corriente.

Spena y colaboradores (2016) [43], realizaron experimentos de la soldabilidad de uniones entre aceros grado automotriz TRIP 900 y Q&P (temple y particionado, por sus siglas en inglés), utilizando el proceso RSW. El acero TRIP utilizado tenía un espesor de 0.8 mm y la siguiente composición química: 0.27% C, 1.52% Si, 2.10% Mn y 0.25% Al (todos en % peso). Y el acero Q&P contaba con un espesor de 1.0 mm y la siguiente composición química: 0.20% C, 1.53% Si, 2.04% Mn (todos en % en peso).

Los parámetros de estudio fueron la intensidad de corriente, la presión de los electrodos y el tiempo de soldadura. Utilizaron para esto un arreglo ortogonal L-9 ( $3^3$ ) (Tabla 3.8), los rangos de los parámetros se establecieron con base en los resultados de pruebas preliminares.

Tabla 3.8 Parámetros utilizados en unión de aceros TRIP de 0.8 mm [43].

Parámetro	Número de Ensayo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Corriente (kA)	6	6	6	7.5	7.5	7.5	9	9	9
Presión (kN)	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Tiempo (s)	0.15	0.30	0.45	0.30	0.45	0.15	0.45	0.15	0.30

Ellos realizaron cinco cupones para cada uno de los nueve ensayos, cuatro de ellos fueron probados mediante ensayos de tensión uniaxial y el otro para la caracterización mediante análisis metalográfico y mediciones de microdureza Vickers. Todos estos se realizaron en el botón de soldadura, la zona afectada por el calor y por último en los metales base sin afectación de calor adyacentes al botón. En la Figura 3.7 se aprecia la distribución de los puntos a analizar, representados por las letras, a (botón de soldadura), b, c, d (zona afectada por el calor) y e (metal base).

Dentro de los datos obtenidos, también se registró el diámetro del botón de soldadura.

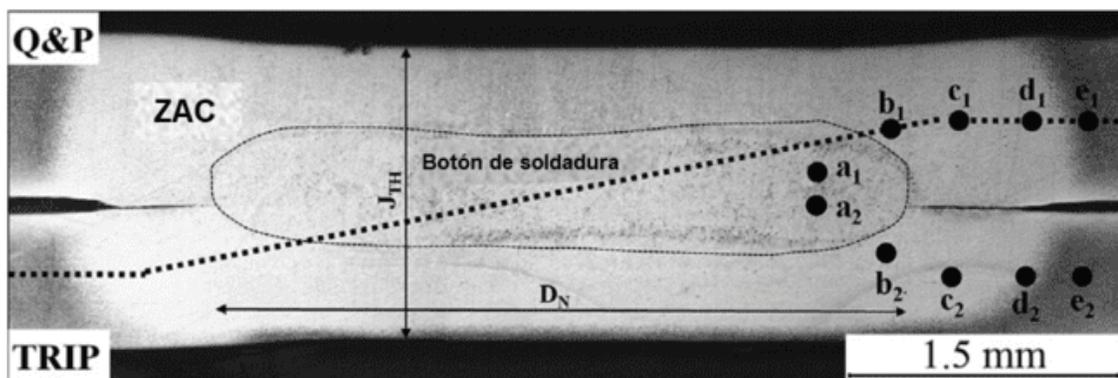


Figura 3.7 Distribución de puntos para análisis metalográfico y de dureza en aceros TRIP de 0.8 mm [43].

Se realizó una micrografía en el acero TRIP antes de realizar los ensayos la cual mostró una microestructura basada en ferrita, bainita y austenita retenida. La dureza obtenida en esta muestra fue de 280 HV30 con una carga de 30 kg. La Figura 3.8 muestra las fases antes mencionadas.

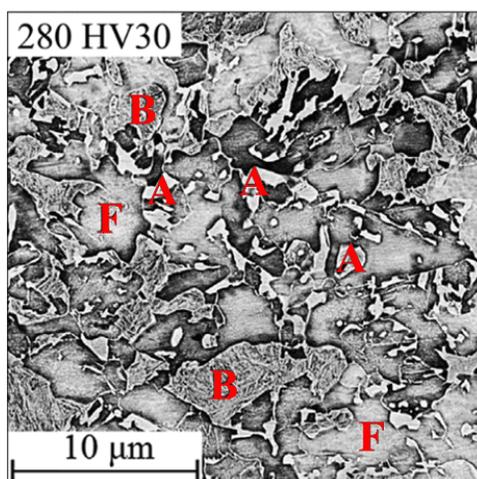


Figura 3.8 Microestructura de acero TRIP de 0.8 mm antes de realizar los experimentos [43].

Las micrografías de la Figura 3.9 muestran las microestructuras y los valores de dureza resultantes de los ensayos realizados para el acero TRIP después del proceso de soldadura, que van desde el botón de soldadura hasta el metal base según la Figura 3.7.

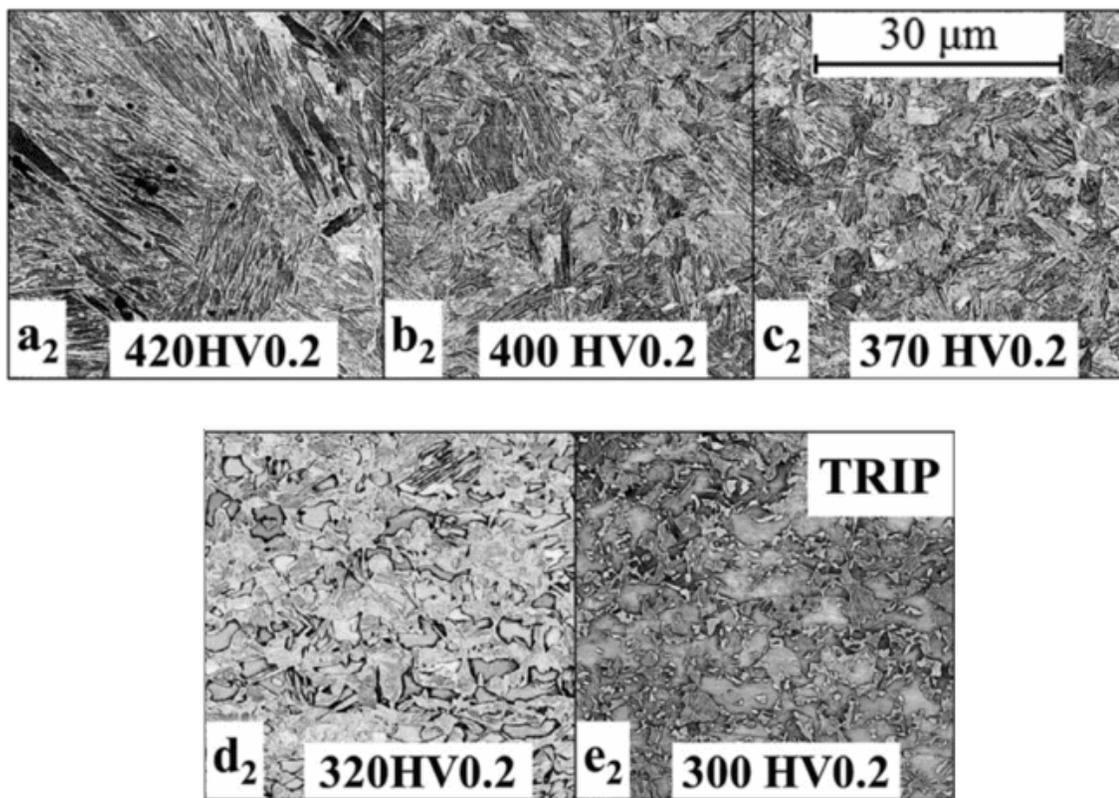


Figura 3.9 Micrografías de acero TRIP de 0.8 mm desde el botón de soldadura hasta el metal base [43].

Dichas microestructuras varían considerablemente en los diferentes puntos de las zonas estudiadas, en la zona del botón de soldadura representada por la imagen a<sub>2</sub> en la Figura 3.9, ocurrió una fusión y enfriamiento rápido produciendo una microestructura completamente martensítica, esto debido a la cantidad de carbono contenido en el material. Se obtuvo una dureza Vickers de 420 HV, con una carga de 0.2 kg.

En las imágenes  $b_2$  y  $c_2$ , aunque son lugares de la zona afectada por el calor, aun así, la temperatura alcanzada permitió lograr la austenitización, promoviendo que después del enfriamiento rápido se obtuviera una microestructura martensítica, y durezas de 400 y 370 HV, respectivamente.

Para la imagen  $d_2$ , la cual está todavía en la zona afectada por el calor, y también para la imagen  $e_2$  que se localiza en el metal base, se encontró que las fases ferrita y bainita causaron una disminución en la dureza, obteniéndose valores de 320 y 300 HV, respectivamente.

Por lo tanto, en la zona del botón de soldadura se presentó la región más dura del acero debido a la presencia de martensita, conforme se aleja de dicha zona hacia el metal base, se presentan la bainita y la ferrita, causando una disminución en la dureza del acero.

Conforme la distancia se incrementa desde el botón de soldadura hasta llegar a una zona donde el calor ya no tuvo efectos sobre el material, las fases y las durezas vuelven a ser iguales a las encontradas en el metal base original.

Dentro de la investigación también determinaron la resistencia a la tensión a cada uno de los nueve ensayos, cada ensayo contó con cuatro cupones ensayados a tensión y uno más para análisis metalográfico y mediciones de dureza Vickers, cabe hacer mención que los autores reportaron los valores de esfuerzo con unidades de fuerza [43].

La resistencia máxima reportada, para cada uno de los nueve ensayos, fue el promedio de sus cuatro cupones correspondientes. También registraron la longitud del diámetro de los botones. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resistencia a la tensión y diámetro de botón de ensayos de acero TRIP de 0.8 mm [43].

Parámetro	Número de Ensayo								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Corriente (kA)	6	6	6	7.5	7.5	7.5	9	9	9
Presión (kN)	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Tiempo (s)	0.15	0.30	0.45	0.30	0.45	0.15	0.45	0.15	0.30
Diámetro de botón (mm)	2.7	4.0	3.4	5.1	5.1	4.4	5.8	4.6	4.6
Resistencia a la tensión (N)	8,700	10,400	8,700	13,400	12,300	8,800	9,600	11,300	11,300

Analizando los resultados de la Tabla 3.9, se observa que, en la serie de ensayos del uno al tres, los cuales tuvieron una corriente de 6 kA, el diámetro y la resistencia aumentaron del ensayo uno al dos al aumentar el tiempo de soldadura.

Para el ensayo tres, aunque el diámetro aumentó no superó al del ensayo dos, a pesar de que se incrementó el tiempo de soldadura, y la resistencia se mantuvo igual a la del ensayo uno. Esto puede atribuirse a que también aumentó la presión de electrodos, ya que cuando esta aumenta, aumenta el libre flujo de corriente produciendo menos calor y menos tamaño de botón.

Para los ensayos del cuatro al seis, con corriente de 7.5 kA, se aprecia que el ensayo cuatro y cinco poseen el mismo diámetro de botón, debido a que, aunque aumenta el tiempo de soldadura para el ensayo cinco también aumenta la presión, para un botón de soldadura entre más se incrementa el tiempo de soldadura más crece su tamaño, y entre más aumenta la presión de electrodos, disminuye.

Sin embargo, aunque los dos tienen el mismo diámetro, el ensayo cuatro resultó con una mayor resistencia a la tensión que el ensayo cinco, atribuyéndose esto a que el ensayo cinco al poseer mayor presión de electrodo genera una muesca mayor sobre las superficies de los metales base, lo cual es un concentrador de esfuerzos en el ensayo de tensión generando la falla prematura. El ensayo seis tiene el valor más bajo de diámetro en el grupo, debido a que tiene el menor tiempo de soldadura y la mayor presión de electrodos.

Dentro de los ensayos siete al nueve con corriente de 9 kA, se encontró el diámetro de botón más grande que fue en el ensayo número siete, como se aprecia no obtuvo la mayor resistencia a la tensión, debido a que este ensayo tiene los parámetros que generan el mayor tamaño del botón de soldadura, o sea, la mayor magnitud de corriente, la menor presión de electrodos y el mayor tiempo de soldadura, esto generó expulsión de metal de soldadura generándose un concentrador de esfuerzos a la hora de realizar la prueba.

Se encontró en este experimento que, los parámetros que arrojaron la mayor resistencia mecánica fueron los del ensayo número cuatro, obtenidos con una corriente eléctrica de 7.5 kA, presión de electrodos de 2 kN y tiempo de soldadura 0.30 segundos.

Emre y Kacar (2015) [44], realizaron estudios acerca de la soldabilidad de un acero TRIP 800 de 1.5 mm de espesor por el proceso de soldadura RSW; la composición química de dicho acero se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Composición química de acero TRIP de 1.5 mm [44].

Composición química (% en peso)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Fe
0.2	1.66	1.69	0.015	0.0002	0.006	0.011	0.43	Base

Las variables de estudio fueron la corriente de soldadura y el tiempo. Se utilizó un electrodo de punta esférica de 5.5 mm de diámetro conservando para ello una presión de electrodos constante de 6 kN.

En su estudio analizaron el esfuerzo a la tensión y el modo de falla de los botones de soldadura. Se realizaron nueve cupones para cada ensayo, a ocho de ellos se les realizó el ensayo de tensión y el restante se usó para análisis geométricos del botón de soldadura.

La Tabla 3.11 muestra los parámetros utilizados y los resultados de las pruebas de tensión (promedio obtenido de las lecturas de los ocho cupones).

También se incluye el modo de falla de los cupones que más adelante se analizará.

Tabla 3.11 Parámetros utilizados, resistencia cortante por tensión y modos de falla de los ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [44].

Corriente (kA)	Tiempo (s)	Fuerza (kN)	Modo de falla
1	0.1	0.00	Interfacial
	0.2	7.90	Interfacial
	0.3	8.00	Interfacial
	0.4	11.70	Interfacial
	0.5	12.40	Interfacial
3	0.1	11.00	Interfacial
	0.2	15.50	Interfacial
	0.3	18.80	Inter. Parc.
	0.4	21.00	Extracción
	0.5	21.00	Extracción
5	0.1	13.50	Interfacial
	0.2	19.70	Interfacial
	0.3	20.00	Extracción
	0.4	22.20	Extracción
	0.5	21.30	Extracción
7	0.1	14.20	Interfacial
	0.2	19.90	Extracción
	0.3	20.60	Extracción
	0.4	23.60	Extracción
	0.5	23.80	Extracción
8	0.1	14.10	Interfacial
	0.2	21.10	Extracción
	0.3	22.40	Extracción
	<b>0.4</b>	<b>24.75</b>	<b>Extracción</b>
	0.5	24.50	Extracción
9	0.1	14.28	Interfacial
	0.2	20.57	Extracción
	0.3	23.17	Extracción
	0.4	23.70	Extracción
	0.5	23.90	Extracción
10	0.1	18.30	Extracción
	0.2	18.60	Inter. Parc.
	0.3	18.00	Inter. Parc.
	0.4	17.20	Inter. Parc.
	0.5	16.60	Inter. Parc.

Como se puede observar en la Tabla anterior, la mayor resistencia se logró para la corriente de 8 kA, 0.4 segundos y a una presión de 6 kN, obteniéndose una fuerza de 24.75 kN.

Se observa una tendencia a aumentar la resistencia conforme aumenta la cantidad de corriente aportada desde 1 hasta 8 kA. Para corrientes de 9 y 10 kA ya no se observa un incremento debido a la presencia de expulsión de metal líquido en el botón de soldadura.

También se encontró el botón de soldadura mostro una microestructura completamente martensítica, y conforme se alejaba de la zona de fusión se asemejaba al metal base, hasta llegar a ser ferrita, bainita y austenita retenida. La macroestructura se aprecia en la Figura 3.10.

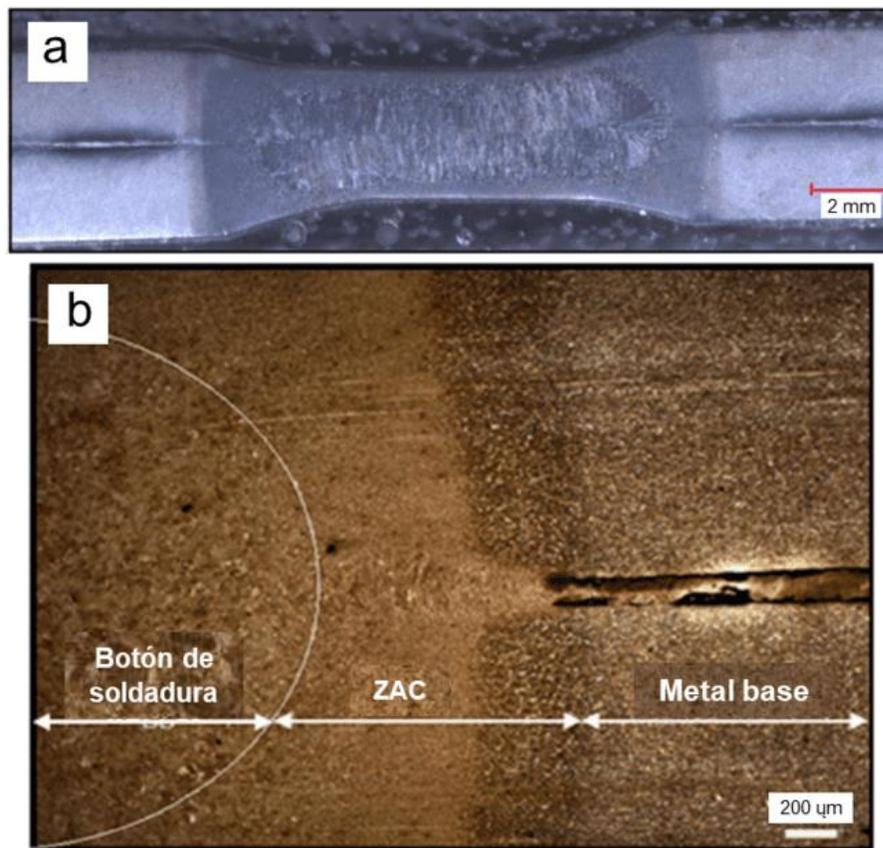


Figura 3.10 Macroestructura del acero TRIP de 1.5 mm: (a) botón de soldadura y (b) zona afectada por el calor y metal base [44].

En la Figura 3.11 se aprecia las microestructuras del botón de soldadura y zonas aledañas. En la imagen 3.11a propia del botón de soldadura, se observa una microestructura consistente principalmente de martensita debido al rápido enfriamiento. La imagen 3.11b corresponde a la zona afectada por el calor, se observa la presencia de martensita y bainita dependiendo de la temperatura máxima alcanzada. En la imagen 3.11c, perteneciente al metal base, la microestructura consiste de una mezcla de ferrita, bainita y austenita retenida.

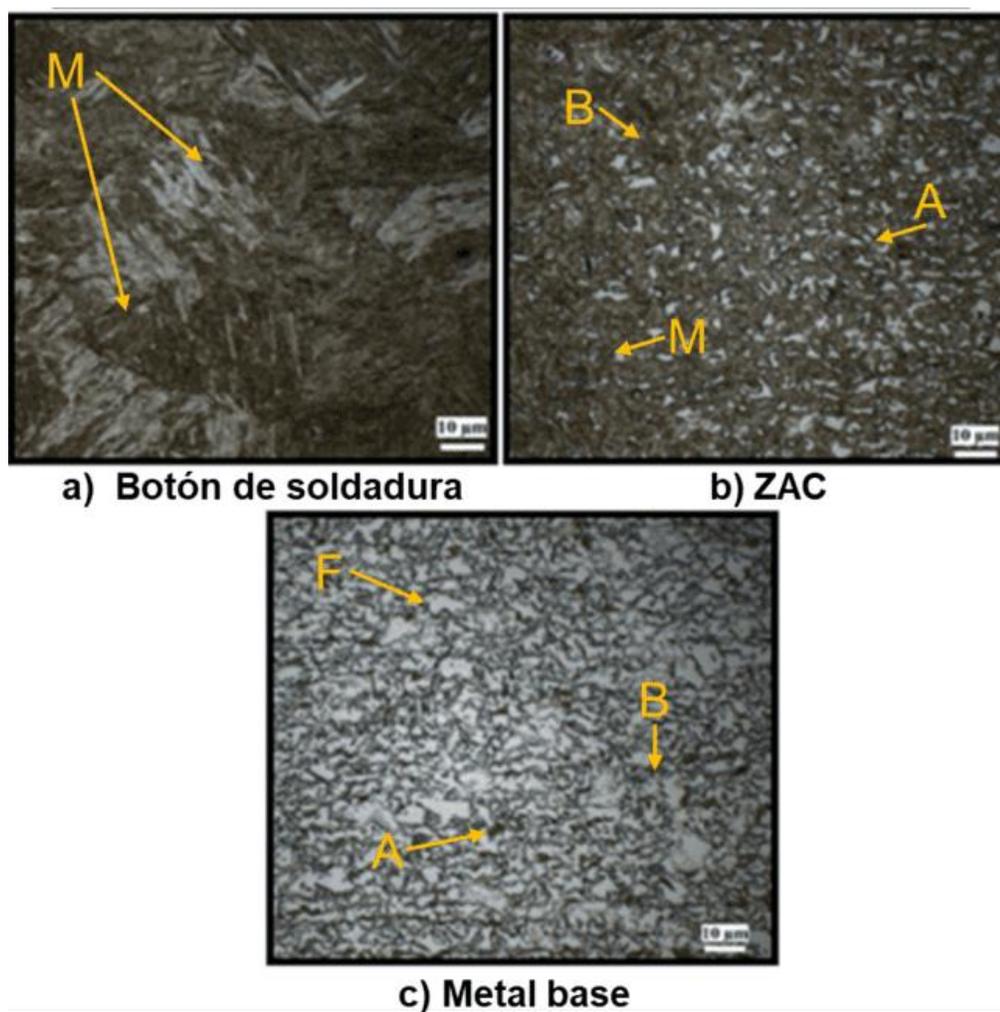


Figura 3.11 Microestructuras obtenidas en el acero TRIP de 1.5 mm de espesor sometido al proceso de soldadura RSW: (a) botón de soldadura, (b) zona afectada por el calor y (c) metal base [44].

Analizaron también la forma en que el botón de soldadura presentó la falla durante el ensayo de tensión. Consideraron los tres tipos de fallas que se pueden presentar, la Figura 3.12 las muestra esquemáticamente.

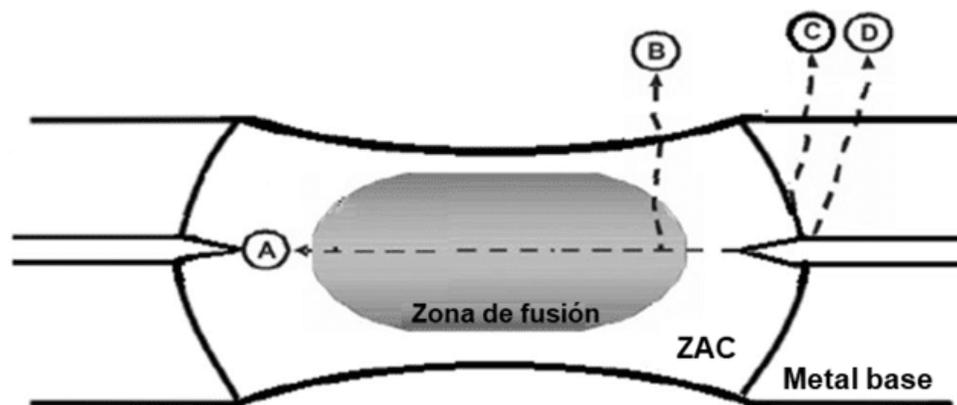


Figura 3.12 Esquema de fallas principales del botón de soldadura durante el ensayo de tensión para acero TRIP de 1.5 mm [44].

La figura anterior muestra los tres tipos de fallas que pueden presentarse durante una prueba de tensión para los cupones soldados por proceso RSW, la primera falla se conoce como interfacial, representada por la letra A. Esta falla se produce a través de la zona de fusión, de una manera longitudinal, partiendo al botón de soldadura en dos partes iguales. La segunda falla se denomina extracción, indicada por las letras C y D, es cuando el botón de soldadura es arrancado completamente quedando adherido a una de las dos láminas. El tercer modo de falla se le llama interfacial-parcial, identificada con la letra B, es aquella que tiene sus inicios en el botón de soldadura, pero luego se desvía al espesor de la hoja.

Se comenta en la investigación, que el modo de falla interfacial se presenta con corrientes bajas de soldadura, 1 a 3 kA; también resultó con menor esfuerzo de tensión, este tipo de falla presenta una fractura del tipo frágil o frágil-semidúctil. En la Figura 3.13, en la imagen A se observa este tipo de falla, en la imagen B y C se observa la fractura frágil y frágil-semidúctil, respectivamente. Se observan

las facetas de hendiduras que representan a una fractura frágil, mientras que los hoyuelos en la superficie representan fractura dúctil.

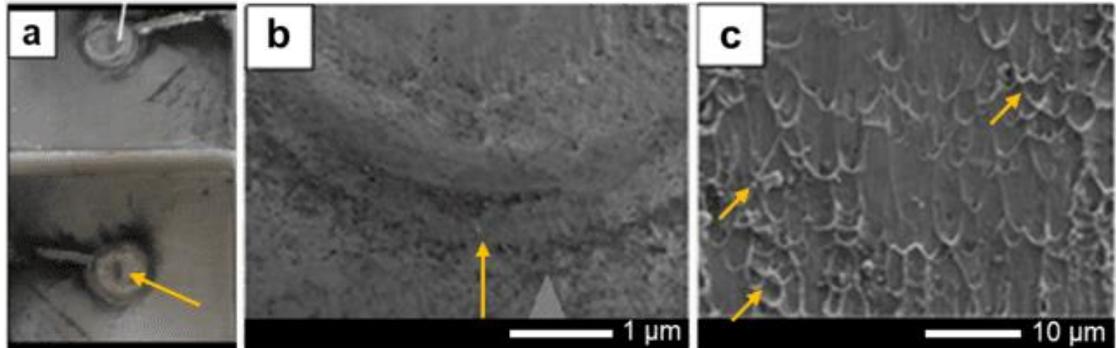


Figura 3.13 Macrografía (a) y micrografías (b) y (c) de falla tipo interfacial para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44].

En el botón de soldadura y en la periferia de éste, se produce martensita, lo cual es favorecido por la cantidad de carbono y a los elementos aleantes, este tipo de fase dura facilita la generación y propagación de grietas, y genera fácilmente el modo de falla interfacial, que generalmente ocurre con una corriente menor o un tiempo de soldadura más corto. Esta fractura se puede evitar aumentando el diámetro de soldadura.

El modo de falla interfacial parcial presenta una resistencia mecánica moderada debido a la expulsión de metal líquido, se presentó en el rango de corriente de 10 kA. La Figura 3.14 muestra el tipo de falla interfacial parcial, se observan características frágiles en la periferia del botón de soldadura. La abertura entre las láminas donde se aloja el metal expulsado se considera un concentrador de esfuerzos el cual es el factor detonante del comienzo de la grieta.

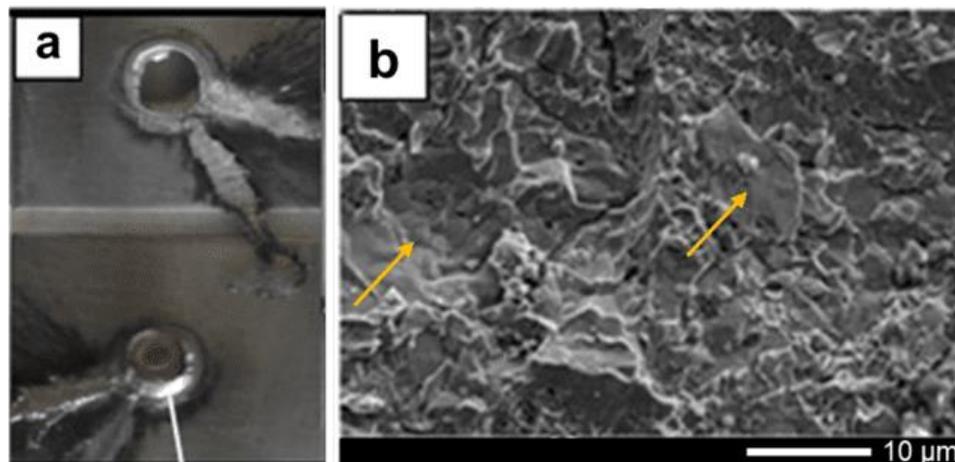


Figura 3.14 Macrografía (a) y micrografía (b), de falla tipo interfacial parcial para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44].

El modo de falla por extracción estuvo en el rango de 5 a 9 kA, para todos los tiempos de soldadura excepto el periodo de 0.1 s. Este tipo de falla presentó el máximo esfuerzo a la tensión. La Figura 3.15 muestra la falla por extracción. Esta falla presenta características de fractura dúctil y semidúctil-frágil. Los resultados también indicaron que el diámetro del botón debe ser como mínimo 4 veces el espesor de la lámina de acero para lograr este tipo de falla.

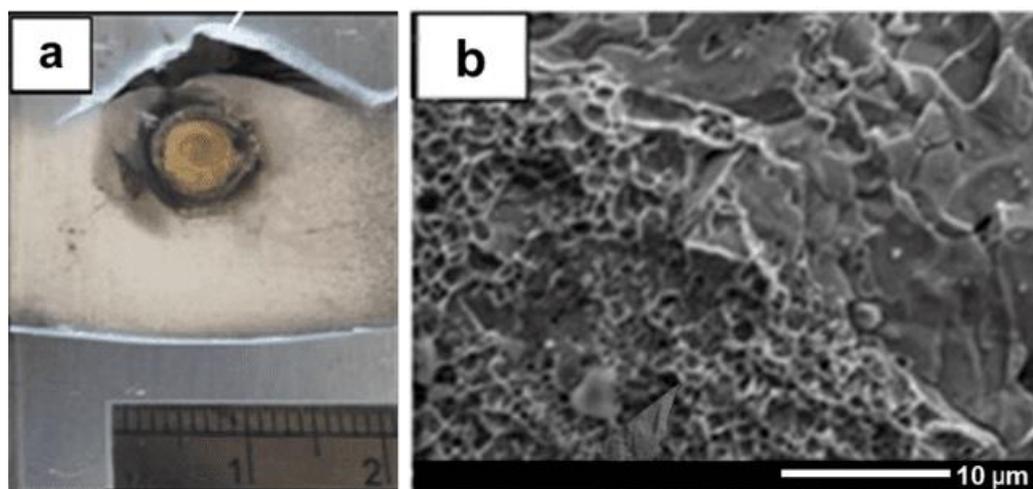


Figura 3.15 Macrografía (a) y micrografía (b), de falla tipo extracción para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44].

Entonces, la resistencia cortante por tensión varía según el tipo de falla que se presente en el botón de soldadura, aumenta en el orden de interfacial, interfacial parcial y extracción. El modo de falla puede afectar significativamente el esfuerzo de tensión en los aceros TRIP, también la capacidad de absorción de energía del material a la hora de la elongación, por lo tanto, es preferible el modo de falla por extracción ya que es el que provee las mayores deformaciones plásticas y absorción de energía que esto conlleva.

También comprobaron que de los parámetros de corriente eléctrica y de tiempo de soldadura, el que tiene mayor influencia sobre el esfuerzo de tensión es la corriente eléctrica (Figura 3.16). La máxima resistencia se obtuvo con una corriente de 8 kA y un tiempo de 0.4 segundos.

Para la corriente eléctrica, al aumentar su magnitud, también se incrementa la resistencia, esto hasta llegar al valor de 8 kA, es donde se obtiene la máxima resistencia, si continúa el aumento en la intensidad de corriente la resistencia disminuye para cualquiera que sea la magnitud de tiempo.

El aumento del tiempo de soldadura también provoca un incremento en la resistencia del botón, pero solo para rangos bajos de corriente eléctrica. Para rangos altos de corriente, por ejemplo, de 10 kA, el aumento del tiempo no produjo aumento de resistencia, debido a la generación de calor excesivo, la consecuente expulsión de metal líquido, y la excesiva indentación de los electrodos.

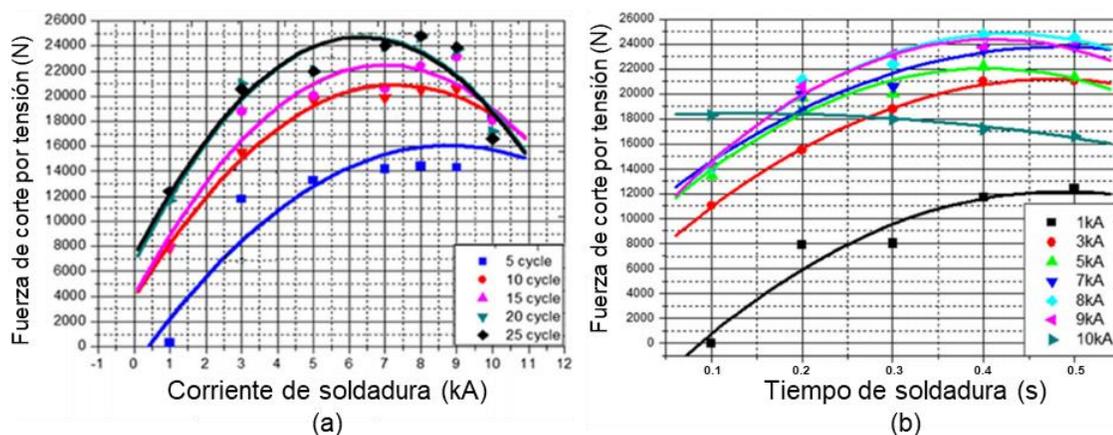


Figura 3.16 Influencia de los parámetros eléctricos y de tiempo de soldadura sobre la fuerza de corte por tensión de acero TRIP de 1.5 mm [44].

De Maddis y colaboradores (2017) [45], realizaron estudios acerca de la soldabilidad de un acero TRIP y un QP grado automotriz. La composición química de ambos se presenta en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Composición química de acero TRIP de 1.5 mm y acero QP de 1.1 mm [45].

Composición química (% en peso)							
	C	Si	Mn	P + S	Al	Nb	Fe
TRIP	0.20	0.31	2.23	< 0.02	1.05	0.022	Base
QP	0.22	1.41	1.88	< 0.02	0.04	< 0.001	Base

Evaluaron los efectos de la corriente eléctrica, el tiempo de soldadura y la presión de los electrodos sobre la microestructura y las propiedades mecánicas. Estas últimas fueron determinadas mediante ensayos de tensión directa y cruzada. El espesor del acero TRIP fue de 1.5 mm y su microestructura se muestra en la Figura 3.17. Las fases encontradas fueron ferrita, bainita, austenita retenida y martensita. La ferrita y la austenita aportan formabilidad y tenacidad,

mientras que la martensita y la bainita promueven un incremento en la resistencia mecánica.

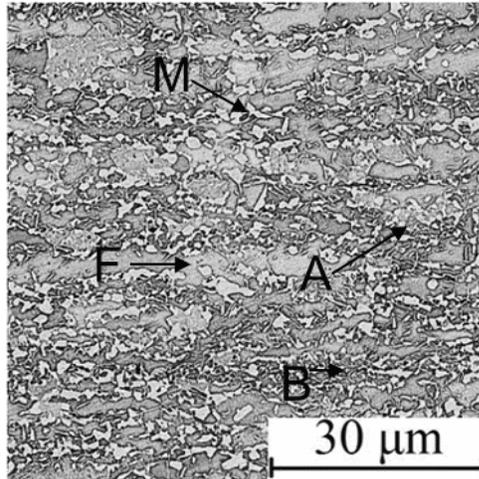


Figura 3.17 Microestructura de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Los cupones fueron obtenidos a partir de láminas producidas industrialmente, la mayor longitud del cupón se cortó en el mismo sentido de laminación.

La Figura 3.18 muestra la configuración del acomodo de los cupones para la prueba de ensayo de tensión directa representada en la figura (a) y tensión cruzada representada en la figura (b).

Se realizaron tres cupones para cada ensayo de tensión directa y dos cupones para cada ensayo de tensión cruzada.

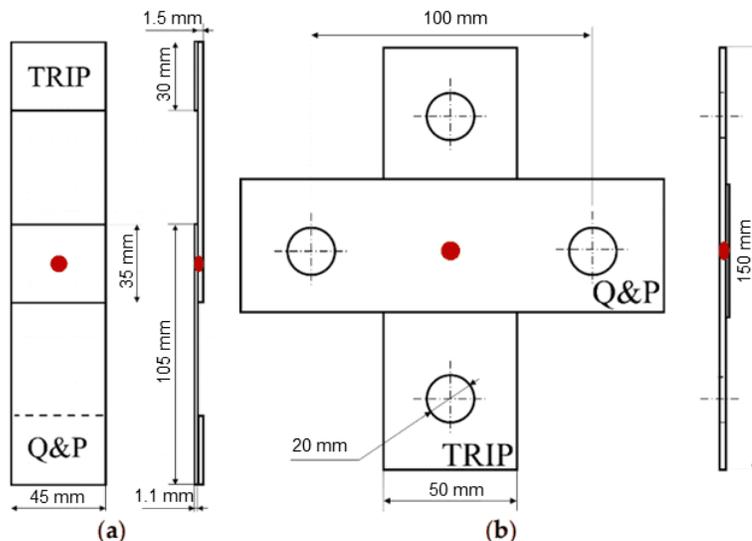


Figura 3.18 Dimensiones de la configuración de cupones para ensayos de (a) tensión directa y (b) tensión cruzada, de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Los parámetros de corriente eléctrica, tiempo de soldadura y presión de electrodos, así como los resultados de los ensayos de tensión directa y tensión cruzada, se representan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Parámetros utilizados y resistencia de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Ensayo	Corriente (kA)	Tiempo (s)	Presión (kN)	Resistencia de tensión (kN)	Resistencia de tensión cruzada (kN)
1	6	0.200	2	15.8	4.96
2	6	0.325	3	16.1	4.68
3	6	0.450	4	14.6	4.65
4	7.5	0.325	2	19.1	4.83
5	7.5	0.450	3	19.9	5.33
6	7.5	0.200	4	17.2	4.49
7	9	0.450	2	21.4	5.03
8	9	0.200	3	19.1	5.05
9	9	0.325	4	17.2	4.69

Los rangos de parámetros los tomaron de la recomendación de la norma ISO 18278-2. Y los resultados de resistencia fueron los promedios de todos los

cupones para cada tipo ensayo. Como se observa en la tabla, la mayor resistencia se logró para el ensayo número siete, con una corriente de soldadura de 9 kA, un tiempo de 0.450 segundos y una presión de electrodo de 2 kN, aunque este botón presentó expulsión de metal líquido.

La expulsión se presentó en los primeros instantes del tiempo de soldadura y no durante la mayor parte final de tiempo, esto evitó los efectos perjudiciales de la expulsión.

La Figura 3.19 muestra el efecto de la corriente y el tiempo de soldadura sobre la expulsión de metal líquido para el ensayo siete. De los 0.450 segundos totales, se aprecian las expulsiones de metal líquido en los primeros 0.150 segundos, los siguientes 0.300 segundos sin expulsiones fueron los que estabilizaron el botón de soldadura.

Para los ensayos ocho y nueve, el fenómeno de expulsión de metal produjo efectos nocivos debido al tiempo corto de soldadura, lo cual evitó la estabilización del botón. Por lo cual, los ensayos cuatro y seis, aunque fueron soldados con menores corrientes, coinciden en su resistencia con los ensayos ocho y nueve, respectivamente.

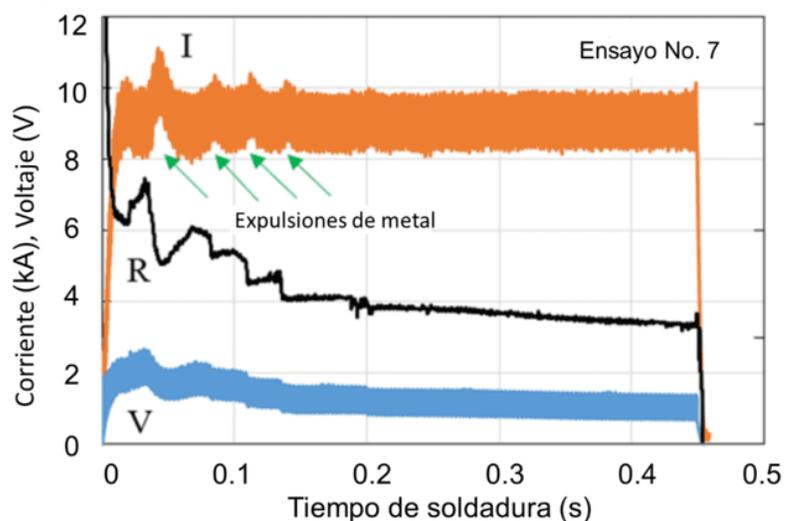


Figura 3.19 Representación gráfica de expulsiones de metal líquido para botón de soldadura de ensayo número siete de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Sin embargo, el ensayo cinco según la Figura 3.20, presenta mayor diámetro de botón de soldadura, pero no obtuvo la máxima resistencia, esto se debe a la mayor indentación del electrodo sobre la superficie de las láminas ya que tuvo mayor presión de los mismos. Este ensayo tuvo una corriente de 7.5 kN, un tiempo de soldadura de 0.450 segundos y una presión de electrodos de 3 kN.

Ahora bien, cuando un botón de soldadura presenta el fenómeno de expulsión de metal, esto genera una disminución de la absorción de energía durante la carga mecánica, además en un evento de esfuerzo rápido como podría ser una colisión, dicha disminución en la tenacidad también se ve presente, por lo tanto, consideraron que el ensayo cinco, aunque no obtuvo la mayor resistencia. Sin embargo, al no presentar expulsión de metal, presentaba mejores propiedades mecánicas globales para el botón de soldadura, tomándose por tanto los parámetros de este ensayo como los mejores del experimento para producir el botón de soldadura.

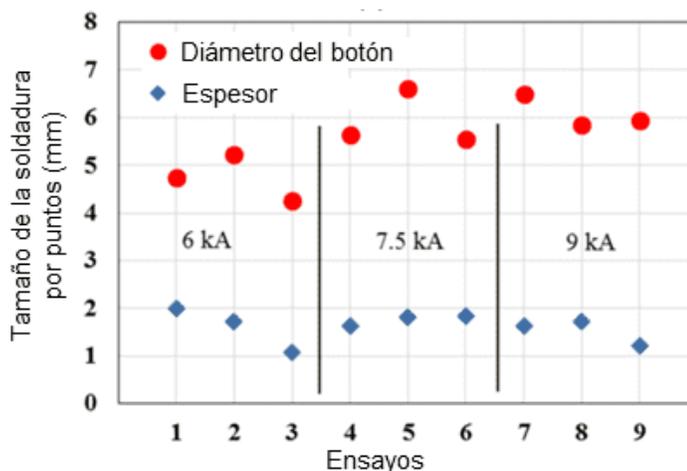


Figura 3.20 Diámetros y espesores de botón de soldadura, para ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Encontraron a través de un análisis de varianza multifactorial ANOVA, que la modificación de los parámetros estudiados, los cuales afectan la resistencia a la tensión, para los ensayos de tensión directa. De los tres parámetros estudiados,

el que tuvo mayor influencia sobre el esfuerzo de tensión fue la corriente eléctrica, seguido de la presión de electrodos, y del tiempo. Para los ensayos de tensión cruzada no se pudo establecer una relación debido a variaciones no lineales en algunos de los resultados obtenidos. La Figura 3.21 muestra los tres parámetros estudiados, puede observarse en la imagen 3.21a que la corriente de soldadura, al aumentar de 6 a 7.5 kA, causa un incremento en la resistencia a la tensión. A 9 kA la razón de cambio disminuye, debido al fenómeno de la expulsión. La presión de electrodos es similar para las magnitudes de 2 y 3 kN. Para 4 kN, el esfuerzo disminuye por dos razones principales, primero, se reduce la resistencia, el calor y el diámetro del botón, segundo, los electrodos producen hendiduras alrededor del botón lo que es un concentrador de esfuerzos. En la imagen 3.21c, se observa que el tiempo de soldadura tiene el mismo efecto para 0.200 y 0.325 segundos; para un tiempo de 0.450 segundos la resistencia aumenta, sin embargo, con base en los resultados del análisis de varianza multifactorial ANOVA, este parámetro no tuvo mucha influencia sobre la resistencia.

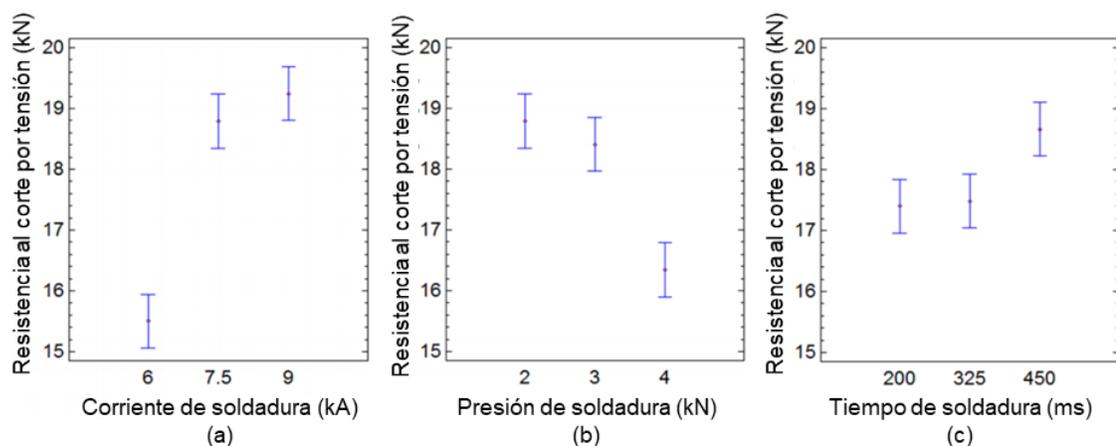


Figura 3.21 Influencia de los parámetros de soldadura en el incremento de la resistencia cortante por tensión del botón de soldadura de un acero TRIP de 1.5 mm [45].

Un botón de soldadura típico obtenido en las soldaduras de este experimento se muestra en la Figura 3.22.

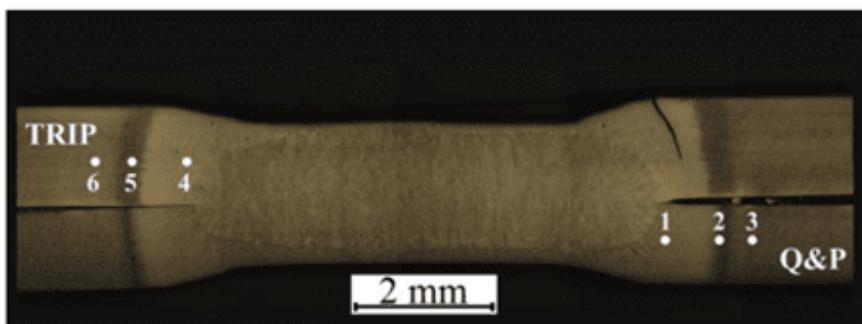


Figura 3.22 Macroestructura del botón de soldadura de los ensayos realizados para acero TRIP de 1.5 mm [45].

Las microestructuras observadas fueron similares para todos los ensayos realizados, solo cambió el tamaño del botón de soldadura para cada magnitud de parámetros utilizado.

El aporte de calor involucrado en el proceso de unión tiene un efecto notable en las microestructuras y durezas de las uniones.

La alta velocidad de enfriamiento en la zona de fusión, debido a que las puntas de los electrodos son enfriadas por agua, generan la formación de una microestructura completamente martensítica, lo cual es consistente con los elevados valores de dureza.

La región cercana a la zona de fusión está completamente austenitizada, induciendo así la formación de martensita.

En la Figura 3.23 se observan las microestructuras del acero TRIP representadas por las imágenes con números 4, 5 y 6, tomados de la Figura 3.22. Estos puntos están dentro de la zona afectada por el calor, desde una zona cerca al botón de soldadura hasta una zona cerca al metal base.

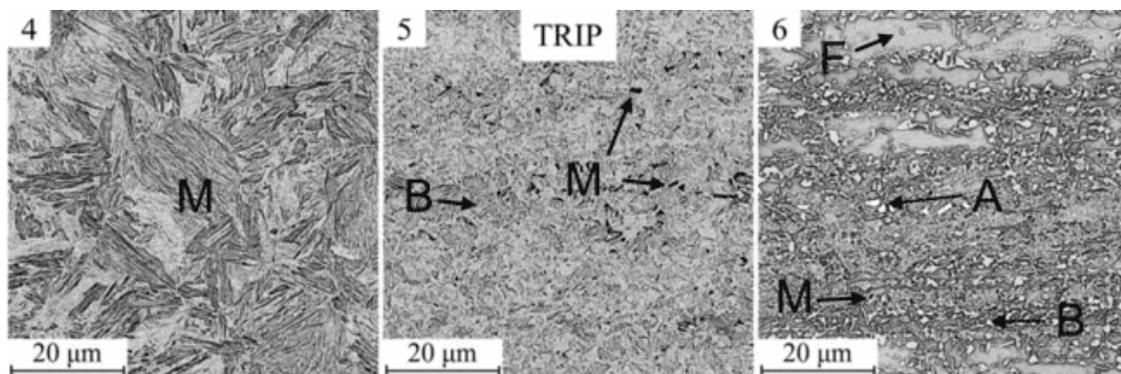


Figura 3.23 Micrografías de las microestructuras de la zona afectada por el calor de ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [45].

Con el aporte de calor del proceso, la austenita retenida se transformó en bainita, y los granos de ferrita se agrandaron ligeramente.

También realizaron pruebas de dureza Vickers a las uniones, desde una zona del metal base hasta llegar al botón de soldadura y seguir hasta el metal base del otro extremo. La dureza se va incrementando hasta llegar a los máximos en el botón de soldadura, y de nuevo desciende hasta la dureza propia del metal base.

En algunos casos, la dureza de la zona afectada por el calor fue un poco mayor que la dureza de la zona soldada, esto debido a la cantidad de carbono contenido en ese sitio, aportándole más dureza.

Este patrón se repite para todos los ensayos, mostrando las máximas durezas en la zona soldada y conforme se aleja, disminuyen.

La Figura 3.24 muestra los valores de dureza Vickers para dos ensayos del experimento, la imagen 3.24a es la gráfica de los valores del ensayo tres con valores de corriente de 6 kA, tiempo de 0.45 segundos y presión de electrodos de 4 kN; la imagen 3.24b corresponde al ensayo siete para una corriente de 9 kA, tiempo de 0.45 segundos y presión de electrodos de 2 kN.

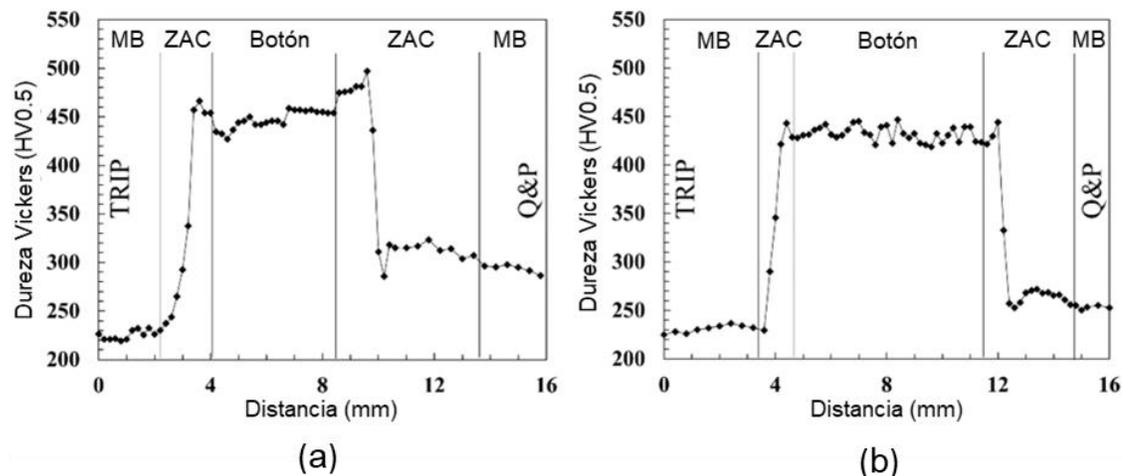


Figura 3.24 Valores de dureza Vickers para ensayo número tres (a) y número siete (b) de un acero TRIP de 1.5 mm [45].

Por último, determinaron tres modos diferentes de fractura para los ensayos de esfuerzo de tensión directa, los cuales se muestran en la Figura 3.25.

El primero de ellos fue el de falla interfacial, considerado el que tiene menor resistencia mecánica. Éste se presentó con corrientes bajas y botones de soldadura de diámetro menor (Figuras 3.25a y 3.25b).

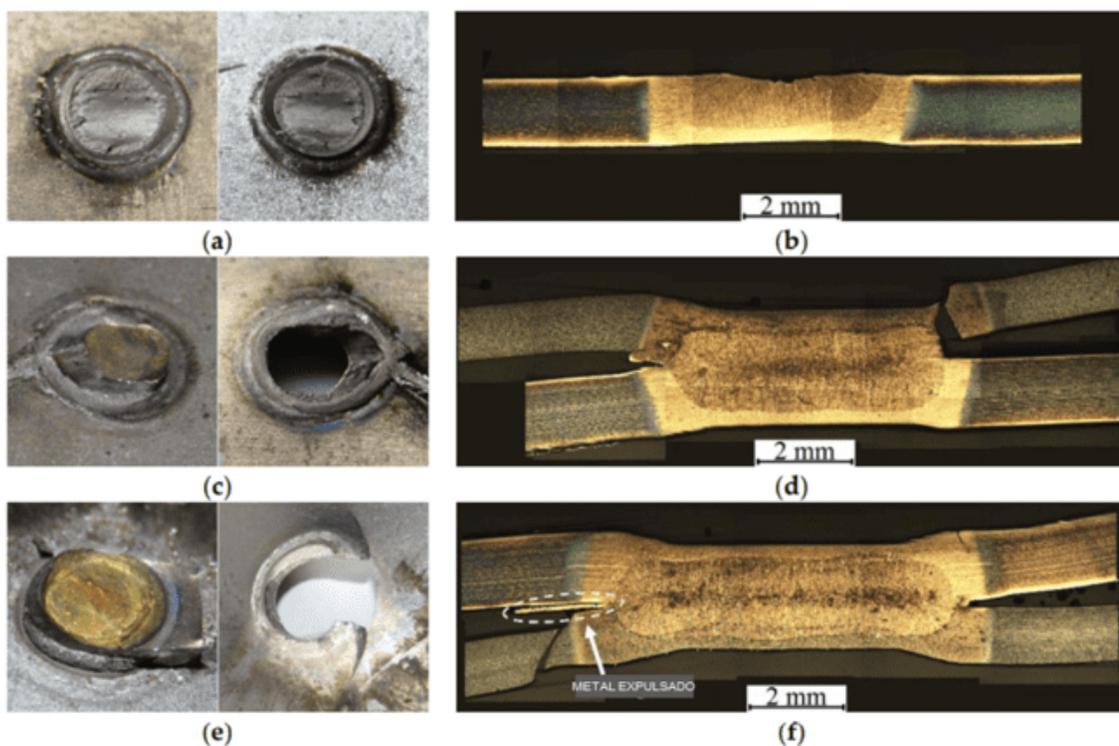


Figura 3.25 Modos de fractura de cupones, para prueba de esfuerzo de tensión directa, de un acero TRIP de 1.5 mm [45].

El segundo modo de falla fue por interfacial parcial, la falla comienza en el botón, pero de ahí se propaga hacia una lámina de los metales base, este tipo de falla provee resistencias intermedias. Se presentó para los ensayos con corrientes altas y botones de soldadura grandes, en las imágenes 3.25c y 3.25d se observa este tipo de falla. El tercer modo es por extracción del botón de soldadura, la falla se presenta en la zona afectada por el calor generándose ahí la fractura. En este caso, se conserva el botón íntegro entre las dos láminas, este modo provee los mayores esfuerzos de tensión y es el más recomendado tipo de falla, se presentó para las corrientes medias del experimento, y diámetros de botón intermedios, generalmente los botones donde se presenta este tipo de falla no presentan expulsión de metal líquido, las imágenes 3.25e y 3.25f ilustran la falla.

### 3.3 Defectos en soldadura de aceros TRIP

Ashiri y colaboradores (2018) [46], analizaron los efectos de los elementos aleantes en aceros TRIP. Comentan en su investigación que la soldadura por puntos RSW aplicada para los aceros TRIP, es propensa a presentar defectos, los cuales afectan la soldabilidad. Los aceros TRIP presentan problemas de soldabilidad debido al contenido de carbono y a los elementos aleantes que lo conforman. Por eso la importancia de conocer el efecto de cada uno de los elementos de aleación.

Existe un mecanismo principal que actúa en las propiedades de los aceros TRIP, y es cuando los elementos aleantes afectan las propiedades termo-físicas del acero, las cuales determinan la respuesta de soldabilidad en el proceso RSW.

Se consideran tres propiedades termo-físicas que son: la resistividad eléctrica, el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica.

Para un acero TRIP 1000, el contenido de carbono, aluminio, silicio y manganeso le proveen un valor de carbono equivalente de 0.82. Además, los elementos antes mencionados tienen efectos considerables sobre la resistividad eléctrica, ya que aumentan esta cualidad. En el proceso RSW, al aumentar la resistividad mejora la generación de calor y la velocidad de calentamiento, dichos elementos también incrementan el coeficiente de expansión térmica, el cual, es responsable de la generación de tensiones inducidas térmicamente, especialmente cuando el material está restringido, como es el caso de un botón de soldadura fundido. El carbono, aluminio y silicio, además causan que el acero TRIP tenga una menor conductividad térmica.

Estas tres propiedades termo-físicas, que son la resistividad eléctrica, el coeficiente de expansión y conductividad térmica se ven afectadas para dichos aceros, lo que constituye una diferencia sustancial con respecto a un acero de bajo carbono convencional.

La Tabla 3.14 muestra las propiedades termo-físicas del hierro puro y tres diferentes tipos de acero. Como puede apreciarse, el acero TRIP cuenta con una resistividad eléctrica de más del doble que el hierro puro y alrededor de un 33% más que para los aceros al bajo carbono y HSLA. El coeficiente de expansión térmica es mayor y la conductividad térmica es menor.

Tabla 3.14 Propiedades termo-físicas de acero TRIP en comparación con otros materiales [46].

<b>Materiales</b>	<b>Resistividad eléctrica (<math>10^{-8} \Omega \text{ m}</math>)</b>	<b>Coefficiente de expansión térmica (<math>10^{-6} / ^\circ\text{C}</math>)</b>	<b>Conductividad térmica (W / m K)</b>
<b>Fe</b>	9.7	9.7	68
<b>Acero al bajo carbono</b>	14	10.3	56
<b>HSLA</b>	14.2	10.8	56
<b>TRIP</b>	20.8	14.2	46

Esta diferencia sustancial en las propiedades termo-físicas de los TRIP, hace que se genere en ellos una acumulación de calor y tensión adicional, que no se presenta en cualquiera de los otros materiales de la Tabla 3.14.

La mayor resistividad aumenta el calor, el coeficiente de expansión térmica aumenta la tensión debido a una expansión superior de un metal líquido confinado en la zona de soldadura, como ocurre en la formación de un botón de soldadura por RSW.

Debido a esto, dichos factores (calor y tensión), son los detonantes de las discontinuidades y defectos de la soldadura.

Es necesario aclarar, que el calor es fundamental para el proceso de soldadura, una cantidad óptima es requerida para llevar a cabo la coalescencia, sin embargo, el calor que en este apartado se menciona, es aquel, cuyo valor puede incrementarse con cierta facilidad más allá de magnitudes establecidas por el proceso, los aceros TRIP tienen esta predisposición debido a la composición química rica de elementos aleantes.

La Figura 3.26a muestra una serie de defectos, como expulsión de metal líquido, grieta superficial, agrietamiento por licuación y profunda indentación de electrodo, encontrados en una soldadura con alta aportación de calor del proceso RSW realizada en un acero TRIP 1000 de 1.2 mm de espesor. En la imagen 3.26b, se aprecia la línea de acción de una carga en tensión cortante, que va de manera horizontal en la posición de la probeta en la imagen; y la línea de acción de una carga cruzada, que va de manera vertical [46].

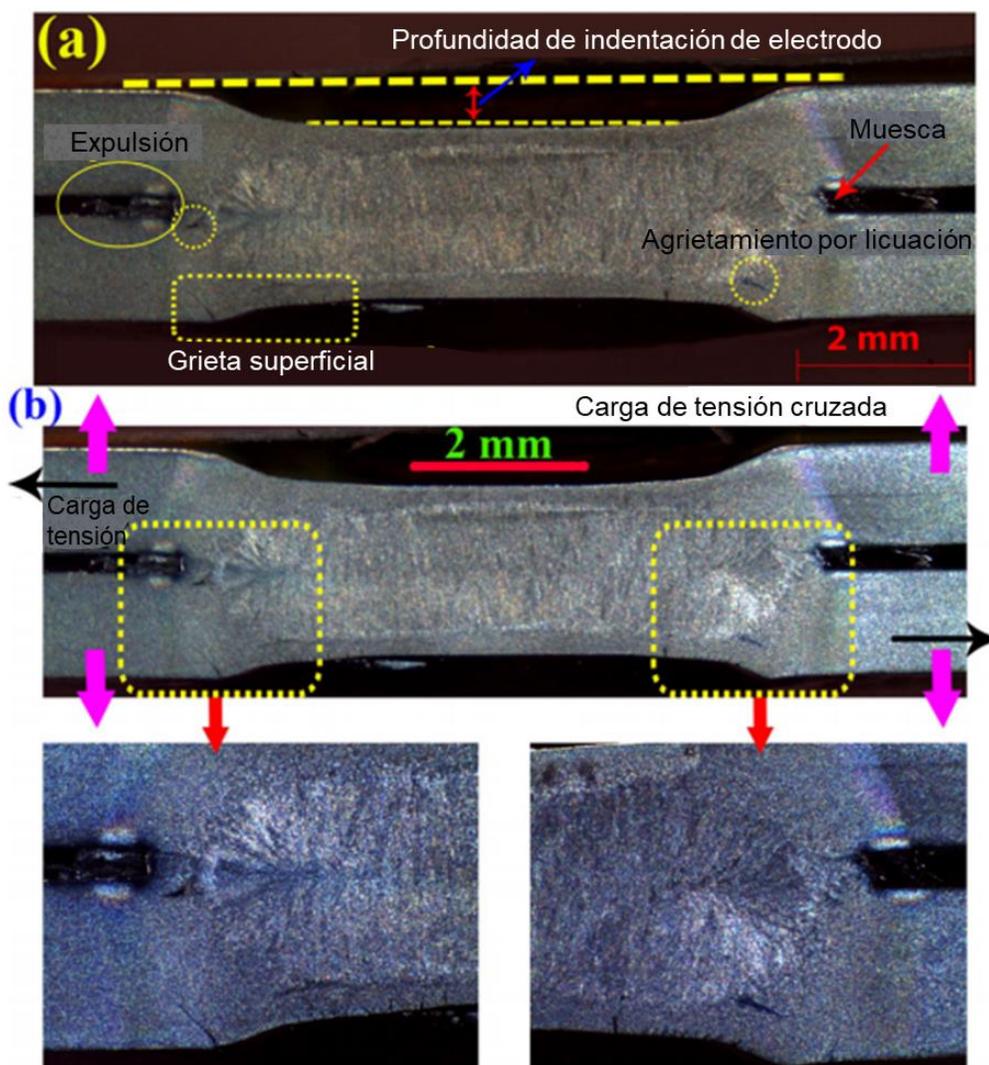


Figura 3.26 Macroestructura de soldadura por el proceso RSW, en un acero TRIP 1000 de 1.2 mm de espesor. Defectos típicos (a), cargas en tensión cortante y tensión cruzada (b) [46].

El efecto de las discontinuidades tiene mayor repercusión en los resultados de los ensayos de tensión cortante que de tensión cruzada.

Para el proceso RSW entre más aumenta la corriente de soldadura, más incrementa el calor de aporte, y por lo tanto mayor es el tamaño de soldadura. Un incremento en el diámetro de la soldadura genera un aumento en la resistencia mecánica del botón.

Sin embargo, hay un límite para el diámetro, llamado diámetro crítico, el cual cuando es rebasado ya no hay un incremento de resistencia mecánica en el botón de soldadura, sino que efectos perjudiciales empiezan a surgir en él.

Para corrientes de soldadura medias, que producirían diámetros de botón por debajo del valor crítico, el tamaño y la geometría de la soldadura dictan el comportamiento mecánico de la unión soldada. Para corrientes de soldadura altas, que generarían un botón por encima del diámetro crítico, las discontinuidades de la soldadura comienzan a dictar el comportamiento mecánico de la falla en dicho botón. Los aportes de calor suficientemente altos, aunados a las propiedades termo-físicas de los aceros TRIP, propician los requisitos ideales para la aparición de defectos en la soldadura.

En la zona afectada por el calor, la rápida generación de calor y la menor conductividad térmica dan como resultado una concentración y acumulación de calor en dicha área, lo cual reducen su resistencia y facilita su deformación y flujo plástico.

Por otro lado, el coeficiente de expansión térmica más alto en los TRIP da como resultado una mayor acumulación de tensión inducida térmicamente debido a la alta generación y almacenamiento de calor en la ZAC. Por lo tanto, se puede decir que se cumplen los requisitos para la generación de defectos. De las propiedades termo-físicas, la resistividad eléctrica es la más importante porque genera acumulaciones de calor y tensión simultáneamente. Este ablandamiento

en la ZAC tiene repercusiones para la generación de defectos, lo cual se verá más adelante.

Se analizan cuatro de los defectos más comunes en la soldadura de aceros TRIP por el proceso RSW [46]:

1. Expulsión de metal líquido.- El rango de corriente soldable se define como la corriente mínima que genera una falla por extracción del botón de soldadura, hasta la corriente máxima antes de la expulsión. La Figura 3.27, ilustra el fenómeno de expulsión de metal líquido.

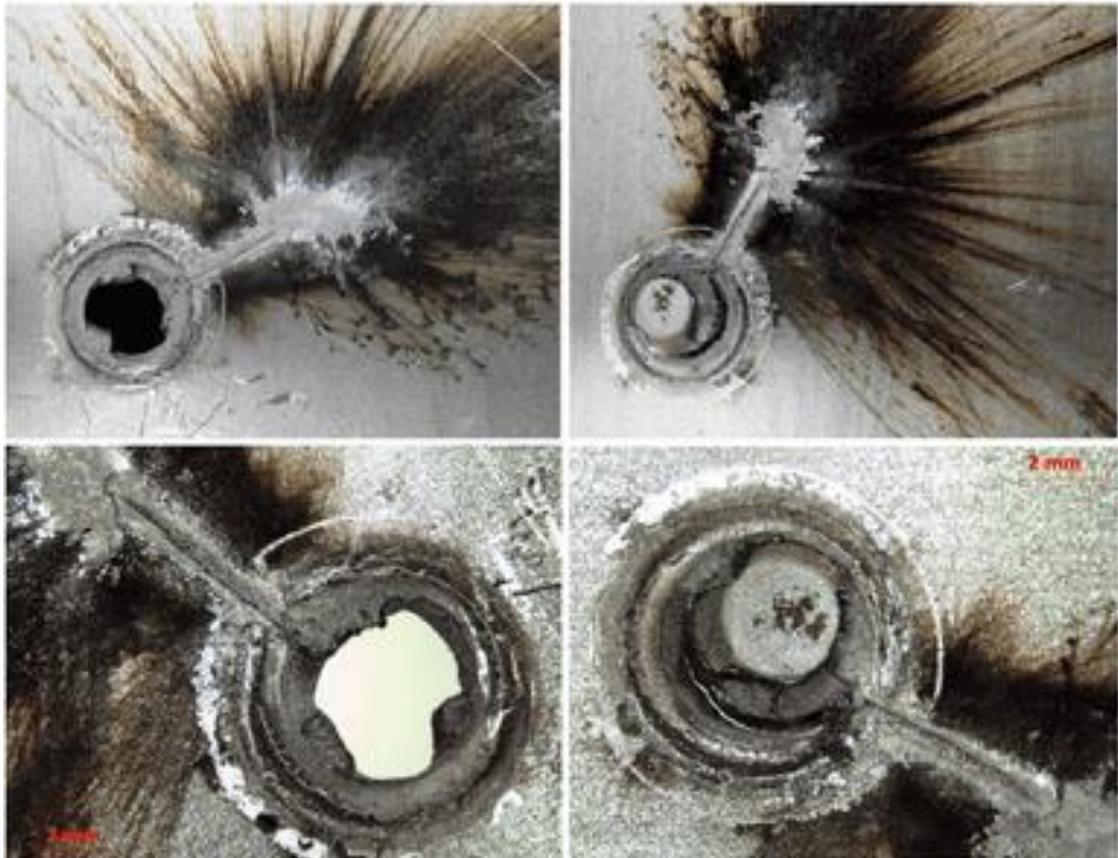


Figura 3.27 Expulsión de metal líquido de botón de soldadura en acero TRIP 1000 de 1.2 mm de espesor, debido a la entrada extremadamente alta de calor [46].

Debido a las propiedades termo-físicas del acero, existe la posibilidad de que ocurra la expulsión de metal dentro del rango de corriente soldable, a lo que se le llama expulsión temprana de metal líquido.

El gran calor generado en la zona de fusión debido a dichas propiedades, además del ablandamiento de la ZAC que se comentó anteriormente, y la alta presión del metal líquido de la zona de fusión provocada por el incremento del coeficiente de expansión térmica debido a los aleantes, provoca la expulsión de metal líquido en el acero TRIP.

El crecimiento rápido del botón de soldadura es otro factor que puede influir en la expulsión temprana de metal líquido.

Dentro de la geometría del botón de soldadura, en la periferia del límite de fusión, la temperatura es suficientemente alta lo que permite que el acero sólido aledaño a dicho límite de fusión fluya y selle la muesca intrínseca entre las dos hojas y entre el metal fundido y el sólido. A esto se le llama lazo corona, que es un fuerte anillo de sellado mecánico 3D alrededor del límite del acero fundido.

Este lazo corona si fuera geométricamente grueso, es benéfico para prevenir la expulsión temprana de metal líquido (Figura 3.28) [46].

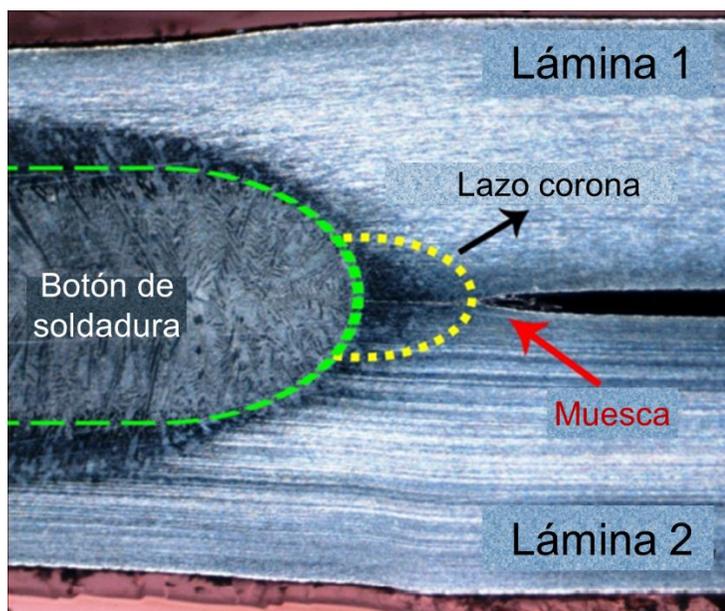


Figura 3.28 Macroestructura de un botón de soldadura que muestra la ubicación del lazo corona después de la solidificación del metal de soldadura [46].

2. Grieta superficial.- Se generan en condiciones de alta entrada de calor y tienden a formarse en la periferia del área dentada inducida por los electrodos. Estos defectos se forman en el espacio de aire entre el electrodo y la superficie de la hoja que se está soldando, ya que esta área no experimenta suficiente enfriamiento por el electrodo enfriado por agua durante la soldadura.

La alta temperatura en esta zona de espacio de aire conduce a la formación de grietas como resultado de la dependencia de la temperatura de la tensión de flujo de la hoja. Las propiedades termo-físicas especiales del acero TRIP son responsables de la susceptibilidad de la formación de grietas superficiales durante el proceso RSW. La Figura 3.29 muestra una grieta superficial.



Figura 3.29 Micrografía que muestra una grieta superficial [46].

Durante el proceso de soldadura RSW es imposible el acceso a la zona de fusión para determinar los historiales térmicos y de esfuerzo. Utilizando un software de elementos finitos SORPAS para simular estas magnitudes, se obtuvieron los valores de temperatura mostrados en la Figura 3.30 [46].

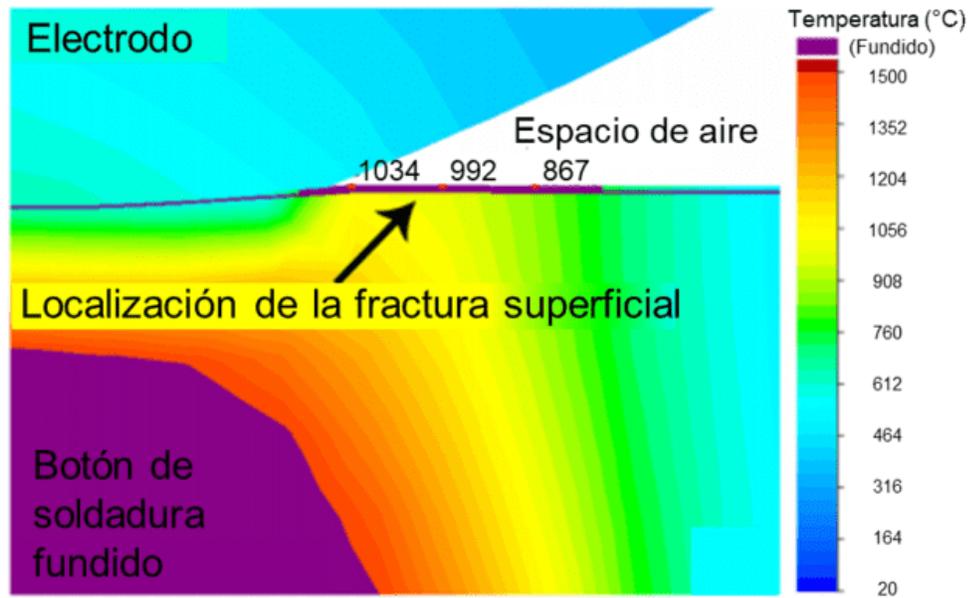


Figura 3.30 Resultados de la simulación que muestran la distribución de las temperaturas [46].

En la Figura 3.31 se observa los resultados de las distribuciones de esfuerzos.

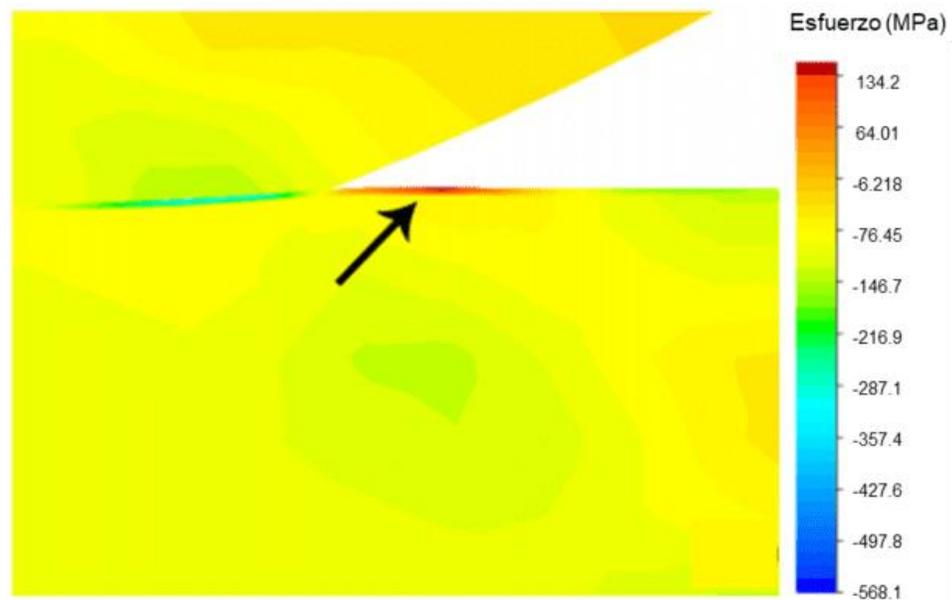


Figura 3.31 Resultados de la simulación que muestran la distribución de los esfuerzos de tensión [46].

3. Agrietamiento por licuación.- La susceptibilidad de defectos por agrietamiento por licuación puede generarse en aceros TRIP soldados por el proceso RSW. Este tipo de defectos suele formarse en la zona afectada por el calor de las soldaduras. Estas discontinuidades aparecen a una temperatura que genera un diámetro de botón de soldadura que se acerca al límite del diámetro crítico.

El agrietamiento por licuación se activa antes que las grietas superficiales, entendiéndose con esto, que el calor necesario para formarse una grieta por licuación es menor que el calor necesario para formarse una grieta superficial. Por lo tanto, si se observan grietas superficiales en una soldadura RSW, probablemente también se encuentren defectos subsuperficiales como el agrietamiento por licuación.

La Figura 3.32 muestra la ubicación de la formación de la grieta por licuación, se observa que se encuentra en la zona afectada por el calor.

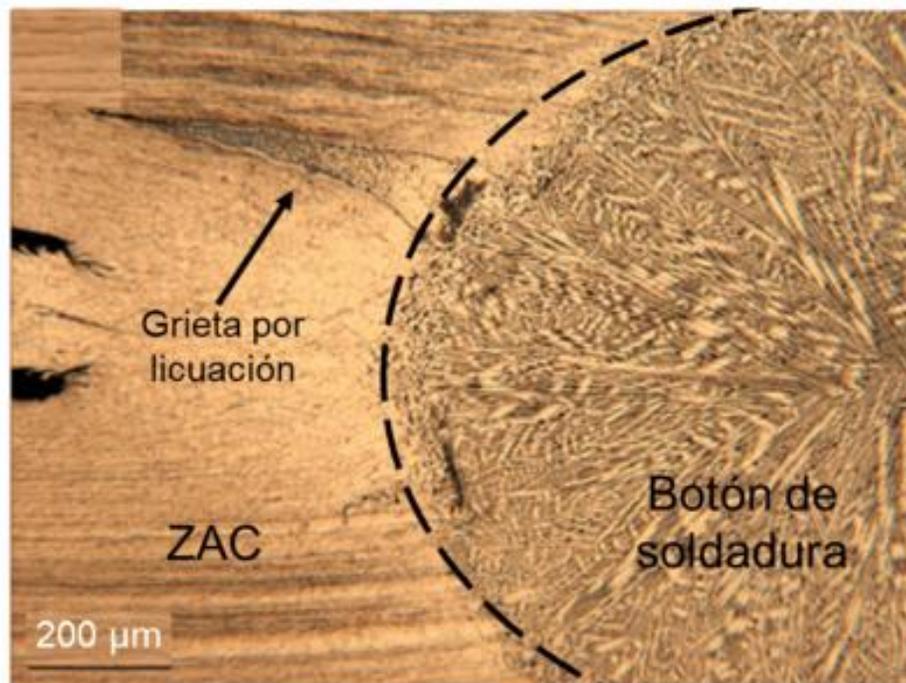


Figura 3.32 Micrografía que muestra la ubicación y forma de la grieta inducida por licuación [46].

En la Figura 3.33, se observa la micrografía que muestra la microestructura de la grieta por licuación.

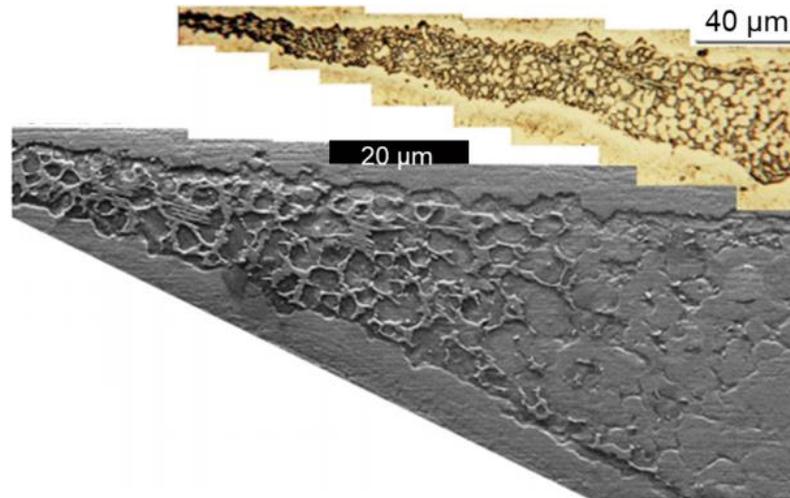


Figura 3.33 Micrografía que muestra la microestructura de la grieta por licuación [46].

Al realizar un análisis elemental en la grieta inducida por licuación mediante un análisis de barrido por microanálisis de sonda de electrones (EPMA, por sus siglas en inglés), se puede decir que la discontinuidad en la soldadura está en estrecha relación con una discontinuidad química que ocurre durante la coalescencia. La Figura 3.34, muestra lo antes mencionado.

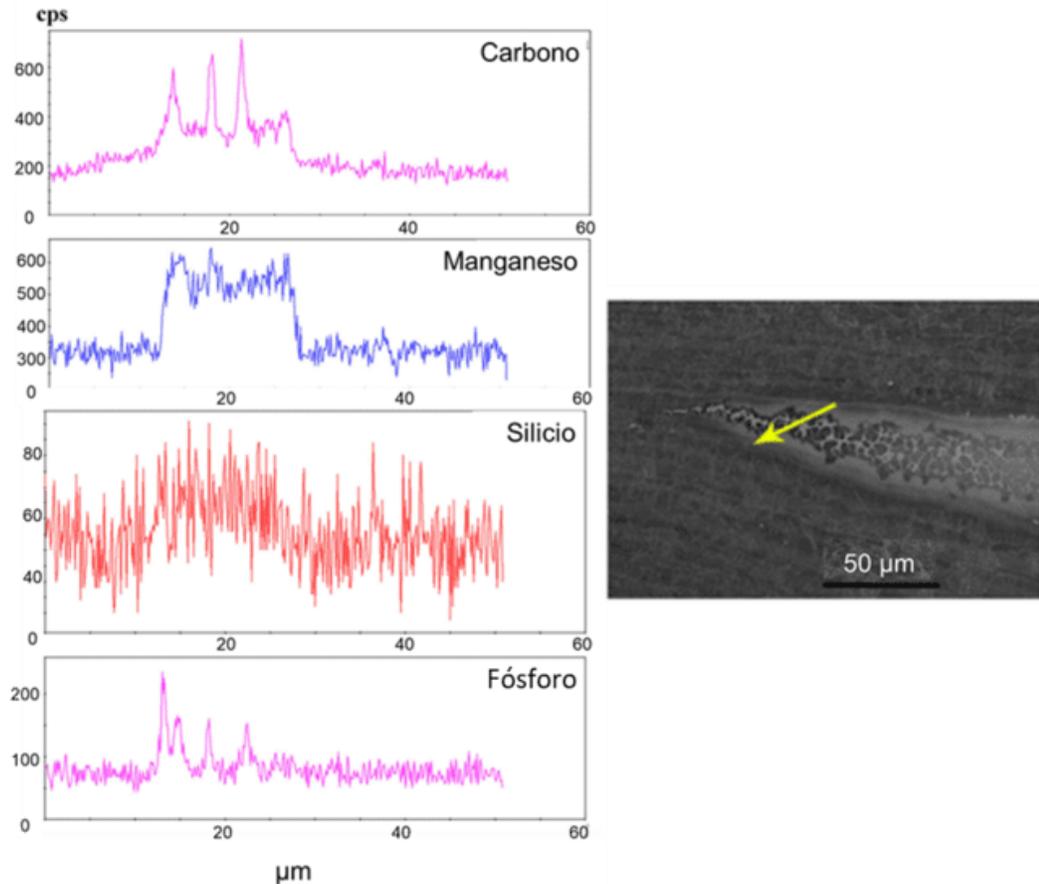


Figura 3.34 Microanálisis de rayos-X con sonda de electrones de una grieta por licuación [46].

Esta heterogeneidad de la composición química en la localización de la grieta, debida a la segregación de elementos aleantes como carbono, manganeso, silicio y fósforo, es detectada en la ubicación de la grieta por licuación, lo que genera carburos de bajo punto de fusión. Dichos carburos se enriquecen con silicio y fósforo los cuales reducen el punto de fusión del material que llena la grieta.

Las grietas por licuación se encuentran en la zona afectada por el calor de la soldadura debido a la formación y alineación de compuestos de bajo punto de fusión, la ZAC está sujeta a altas temperaturas lo cual conduce a la fusión de

estos compuestos induciendo un efecto suavizante. Este ablandamiento permite que la presión que ejerce el botón de soldadura fundido genere la grieta. Además, el silicio reduce la tensión de flujo del acero, el carbono y el silicio tienen un efecto significativo en el punto de fusión de los aceros y el fósforo aumenta el rango de solidificación de la aleación.

Otro factor importante para la generación de este tipo de grietas es la presión que ejerce el botón de soldadura fundido sobre la ZAC, la Figura 3.35, ilustra este fenómeno.

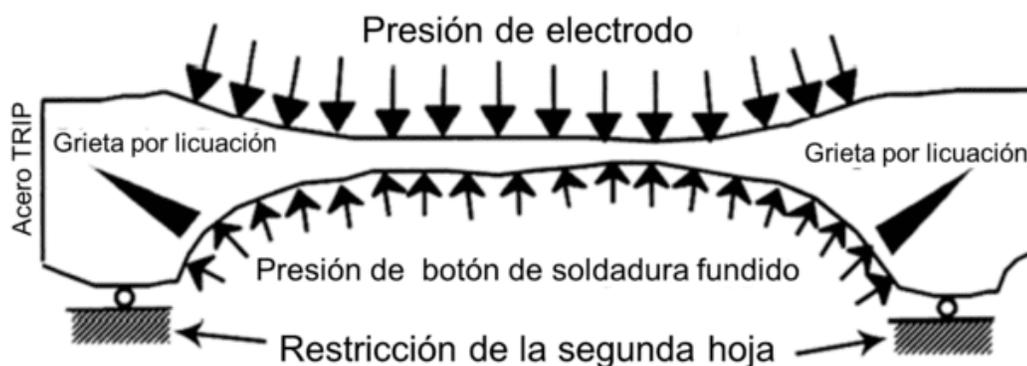


Figura 3.35 Esquema de ubicación de la formación de grietas por licuación debidas a la fuerza resultante de las presiones mostradas [46].

Las fuerzas verticales hacia adentro que ejercen los electrodos producen fuerzas radiales opuestas por parte del botón de soldadura fundido. Debido a que la zona de fusión no es esférica, las fuerzas verticales de los electrodos producen fuerzas horizontales de gran magnitud que inducen la formación de grietas por licuación, trabajando juntamente este fenómeno con la segregación existente en la ZAC.

Las propiedades termo-físicas especiales de los aceros TRIP tienen un afecto pronunciado sobre la aparición de grietas por licuación. La baja conductividad térmica promueve una alta concentración y almacenamiento de calor en la ZAC.

Esto promueve la segregación y fusión de compuestos de bajo punto de fusión en dicha zona. Además, el alto índice del coeficiente de expansión térmica da como resultado una presión más alta del botón de soldadura fundido sobre la ZAC, la cual limita y confina el botón fundido [46].

4. Profunda indentación de electrodo.- Cuando el tamaño del botón de soldadura rebasa el límite crítico, la indentación de los electrodos sobre el metal base se incrementa más allá de una relación lineal. Las altas corrientes de soldadura, que generan altas entradas de calor, desencadenan dos factores que provocan una indentación perjudicial en la unión soldada por RSW.

Primero, al tener un tamaño grande del botón de soldadura, la cantidad de la parte no fundida del metal disminuye. La alta resistividad hace que el calor aumente y la penetración del botón también lo hace. En la Figura 3.36, se aprecian los botones de soldadura de un acero TRIP y un HSLA del mismo diámetro, se observa la mayor penetración del botón del acero TRIP, lo cual reduce la cantidad de material no fundido provocando una fuerte indentación [46].

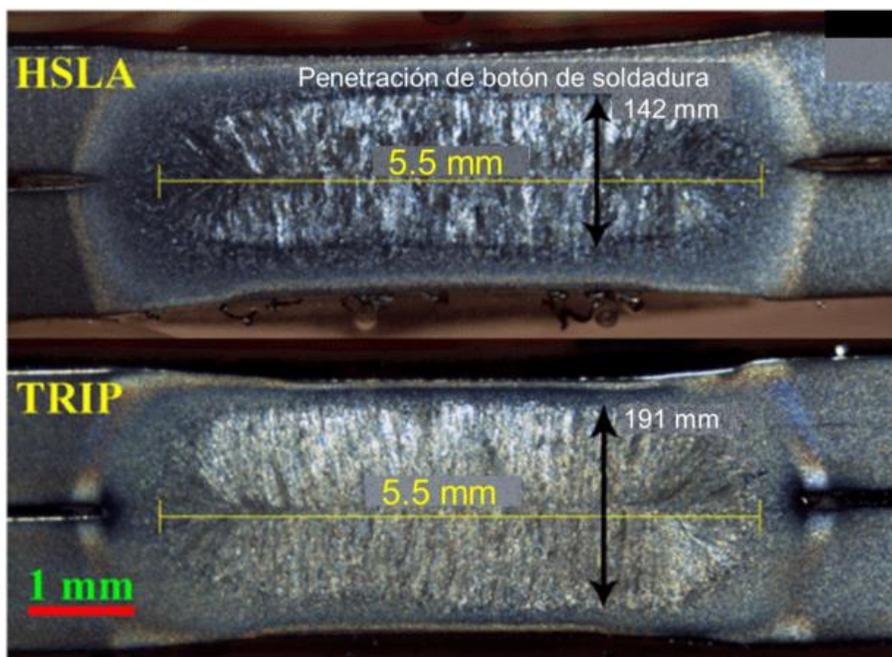


Figura 3.36 Comparación de la penetración del botón de soldadura entre un acero HSLA y un TRIP 1000 de diámetros iguales [46].

Segundo, la baja conductividad térmica del acero TRIP, da como resultado una alta concentración y almacenamiento de calor en la ZAC: aparte de esto, el proceso mecánico a la hora de producir el acero provoca una deformación plástica severa en el material, lo que resulta en el almacenamiento de una alta cantidad de energía.

Esto genera que, por el calor concentrado y almacenado en dicha zona, haya un avance en cierta medida de los fenómenos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano, el cual está en función del grado de temperatura experimentado durante la soldadura.

El crecimiento de grano ocurre en la zona aledaña al botón de soldadura fundido, esto genera el ablandamiento de la ZAC y una mayor indentación del electrodo.

## **CAPÍTULO 4**

# **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA**

Como se describió anteriormente, el desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia que cumplan con las necesidades actuales de la industria automotriz, en términos de bajo peso y alta resistencia, es un campo de investigación actual. Los aceros TRIP son candidatos prometedores para satisfacer estas necesidades y son considerados ante la vista de los propios ejecutivos de la industria automotriz como la mejor alternativa en términos de sustentabilidad, seguridad y costo.

Aunque la composición química juega un papel importante para la obtención de las microestructuras requeridas en estos aceros, es necesario tener en mente que también es deseable que los aceros sean de bajo costo, de fácil procesamiento, que tengan buena relación resistencia/ductilidad y que sean fácilmente soldables.

Varios autores comentan que el proceso RSW es el más utilizado en el ramo industrial automotriz, debido a las características de automatización, rapidez y limpieza, que lo ponen a la delantera frente a otros procesos de soldadura.

El desarrollo de láminas soldables de aceros avanzados de alta resistencia requiere entonces un buen entendimiento acerca de la correlación entre las variables del proceso RSW, la microestructura del material a soldar, y el aspecto técnico del equipo de soldadura. La relación entre los parámetros del proceso RSW y los defectos de soldadura que puedan presentarse en estos materiales también es de suma importancia, puesto que finalmente dichos defectos son indeseables.

Aunque la microestructura requerida en aceros TRIP es bien conocida, se han hecho investigaciones recientes para obtener estos aceros bajo ciclos térmicos más sencillos y bajo condiciones que puedan reproducirse a nivel industrial.

Por otra parte, algunos autores han realizado modificaciones a los electrodos de las máquinas RSW, modificaciones en su forma geométrica, o han investigado los efectos de algún tipo de recubrimiento sobre la punta para mejorar la conductividad o prolongar la vida de producción útil de dichas piezas.

Con relación a los parámetros del proceso, la mayoría de los autores y otros organismos importantes mencionan que dentro de los parámetros del proceso RSW, destacan tres principalmente: la densidad de corriente, la presión que ejercen los electrodos también llamada fuerza de soldadura y el tiempo de soldadura.

Se han realizado pruebas con diferentes aceros y distintos calibres para saber el aspecto mecánico y microestructural de las uniones soldadas con parámetros bien definidos. Para materiales delgados se recomienda utilizar las densidades más bajas posibles por el tiempo mínimo necesario para realizar el botón de soldadura.

Tomando en cuenta la resistencia a la tensión del material más afín a un acero TRIP 1000 se obtiene la Tabla 4.1, donde se recopilan los parámetros óptimos de los diferentes experimentos analizados en este trabajo.

Tabla 4.1 Resumen de los parámetros óptimos para cada experimento, basados en su resistencia a la tensión [41] [42] [43] [44] [45].

<b>Autor del experimento</b>	<b>Espesor del material (mm)</b>	<b>Corriente (kA)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Presión (kN)</b>	<b>Resistencia a la tensión (kN)</b>
Varbai y col.	1.00	7.20	0.60	1.900	3.830
Valera y col.	1.00	4.75	0.50	0.345	3.293
Spena y col.	0.80	7.50	0.30	2.000	13.400
Emre y col.	1.50	8.00	0.40	6.000	24.750
De Maddis y col.	1.50	7.50	0.45	3.000	19.900

Como se puede observar, para Varbai y colaboradores [41] los valores óptimos para la soldabilidad de un acero TRIP de 1 mm de espesor y que generaron el máximo esfuerzo de tensión, son para la corriente eléctrica de 7.2 kA, un tiempo de soldadura de 0.60 segundos, y una presión de soldadura de 1.9 kN.

Según Valera y colaboradores [42], en los experimentos que realizaron para espesores de aceros TRIP de 1mm de espesor, encontraron que los valores que producen una mayor resistencia mecánica son, de 4.75 kA en el parámetro de intensidad de corriente, de 0.5 segundos en el parámetro tiempo y manteniendo una presión de electrodos de 0.345 kN.

En la experimentación de Spena y colaboradores [43] acerca de la soldabilidad de un acero TRIP 900 de 0.8 mm de espesor, concluyeron, con fundamento en resistencia a la tensión obtenida, que la combinación de parámetros es para una corriente eléctrica de 7.5 kA, un tiempo de soldadura de 0.30 segundos, y una presión de electrodo de 2 kN.

Emre y Kacar [44], en su experimentación determinaron que los parámetros que generaban la mayor resistencia a la tensión para un acero TRIP de 1.5 mm

eran para la corriente de soldadura de 8 kA, un tiempo de soldadura de 0.4 segundos y una presión de electrodo de 6 kN.

De Maddis y colaboradores [45], en su experimentación de la soldabilidad de un acero TRIP de 1.5 mm de espesor, encontraron que los parámetros del proceso RSW que les generaron el botón de soldadura que presentaba mejores propiedades mecánicas globales fue para la corriente eléctrica de 7.5 kN, un tiempo de soldadura de 0.450 segundos y una presión de soldadura de 3 kN.

Con respecto a los defectos en las uniones soldadas de aceros TRIP, Ashiri y colaboradores [46], encontraron que la soldabilidad del acero se ve afectada por la cantidad de carbono y otros elementos aleantes como el silicio, aluminio y manganeso, los cuales modifican las propiedades termo-físicas en estos materiales, dichas propiedades son la resistividad eléctrica, el coeficiente de expansión y la conductividad térmica.

Los elementos aleantes provocan en los TRIP un incremento en la resistividad eléctrica y en el coeficiente de expansión térmica, para el caso de la conductividad térmica los valores disminuyen. Estas propiedades hacen que dichos aceros tengan un comportamiento especial nocivo respecto de los aceros convencionales.

Las propiedades termo-físicas en el acero lo hacen susceptible a dos fenómenos, que son: aumentar y conservar la cantidad de calor en el botón de soldadura como en la zona afectada por el calor, y aumentar la presión dentro del botón de soldadura. Estos dos factores son los precursores de los defectos en la unión de aceros TRIP por el proceso RSW.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

Como se ha visto en este estudio, los parámetros del proceso RSW para la soldabilidad de los aceros TRIP juega un papel muy importante para la obtención de un botón de soldadura de alta calidad que cumpla con los estándares industriales.

Los principales parámetros del proceso son la intensidad de corriente eléctrica, la presión de los electrodos y el tiempo de soldadura.

Dichos parámetros, bien coordinados generan una unión soldada de resistencia a la tensión aceptada en la industria automotriz, garantizando seguridad, confiabilidad y rapidez en el ensamblado de láminas.

En base a este trabajo se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1.- Los parámetros principales del proceso RSW son la corriente eléctrica, la presión de soldadura y el tiempo.

2.- El parámetro de intensidad de corriente es el más importante del proceso. El aumento o disminución de la magnitud de dicho parámetro, tiene la capacidad de aumentar o disminuir el tamaño del botón de soldadura. La influencia que ejerce sobre la resistencia a la tensión en un botón de soldadura es del 59.9%. Este porcentaje se obtuvo mediante un análisis de varianza multifactorial ANOVA y significa que de los tres parámetros estudiados que son la intensidad de corriente, tiempo de soldadura y presión, al variar la intensidad de corriente afecta la resistencia a la tensión en dicha magnitud.

3.- Si el tamaño del botón se incrementa, también lo hace la resistencia a la tensión. Sin embargo, hay un límite para esto, ya que llega un momento en que el botón es demasiado grande que se genera el fenómeno de expulsión de metal líquido, esto hace un concentrador de esfuerzos que provoca una disminución en el esfuerzo de tensión.

4.- La presión de soldadura se encuentra en segundo nivel de importancia, cuando la presión aumenta, la resistencia eléctrica entre los metales base disminuye generando menor calor y tamaño de diámetro de botón. Por lo tanto, mientras más aumenta la presión menor será el tamaño del botón de soldadura. La influencia que ejerce sobre la resistencia a la tensión es del 22.5%.

5.- Al incrementarse la presión y el tiempo, conservando una intensidad de corriente constante, posiblemente el tamaño del botón permanezca sin variación en tamaño.

6.- El tiempo de soldadura juega el papel menos importante en el proceso, entre más sea la magnitud de este parámetro, mayor será el tamaño del botón. Los efectos benéficos o perjudiciales con respecto al control de esta variable no

son tan trascendentes como los efectos de la corriente y la presión. Ejerce una influencia de 5.6% sobre la resistencia a la tensión.

7.- Se encontraron que los rangos de los parámetros óptimos para la soldabilidad de aceros TRIP de espesores menores a 2 mm, son para la intensidad de corriente de 4.75 a 8.00 kA, para la presión de soldadura de 0.345 a 6.000 kN y para el tiempo de soldadura de 0.30 a 0.60 s.

8.- La soldabilidad de los aceros TRIP se ve afectada por la cantidad de carbono y elementos aleantes como el silicio, aluminio y manganeso, los cuales afectan las propiedades termo-físicas que son la resistividad eléctrica, el coeficiente de expansión y la conductividad térmica.

9.- La composición química de aceros TRIP favorece un incremento en la resistividad eléctrica y el coeficiente de expansión térmica, y una disminución en la conductividad térmica. Esto propicia una generación y conservación de calor en el área de botón y zona afectada por el calor. También genera fuertes presiones del botón de soldadura hacia la ZAC.

10.- La generación y conservación de calor excesivo, aunado a una alta presión de botón de soldadura, son los detonantes de la aparición de defectos en la soldadura de aceros TRIP por el proceso RSW.

El proceso RSW ha demostrado ser un buen proceso de unión de láminas de acero TRIP de menos de 2 mm de espesor, los ensayos así lo demuestran. El proceso de soldadura se ha realizado con éxito para espesores de 0.8, 1.0 y 1.5 mm de acero TRIP.

# Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Composición química de acero TRIP 1000 [18].	15
<b>Tabla 3.1</b> Composición química de los aceros utilizados por Kaar (% peso) [40].	52
<b>Tabla 3.2</b> Porcentajes de disminución de la densidad del acero en función del contenido de Mn y Al (% en peso) [40].	53
<b>Tabla 3.3</b> Composición química y resistencia a la tensión de los aceros utilizados por Varbai (% peso) [41]	55
<b>Tabla 3.4</b> Parámetros óptimos de tiempo y corriente para láminas de 1 mm [41].	56
<b>Tabla 3.5</b> Composición química de acero TRIP de 1 mm [42].	59
<b>Tabla 3.6</b> Parámetros utilizados en el experimento [42].	59
<b>Tabla 3.7</b> Resistencia a la tensión directa de los ensayos realizados [42].	60
<b>Tabla 3.8</b> Parámetros utilizados en unión de acero TRIP de 0.8 mm [43].	62
<b>Tabla 3.9</b> Resistencia a la tensión y diámetro de botón de ensayos de acero TRIP de 0.8 mm [43].	66
<b>Tabla 3.10</b> Composición química de acero TRIP de 1.5 mm [44].	67
<b>Tabla 3.11</b> Parámetros utilizados, resistencia cortante por tensión y modos de falla de los ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [44].	68
<b>Tabla 3.12</b> Composición química de acero TRIP de 1.5 mm y acero QP de 1.1 mm [45].	75
<b>Tabla 3.13</b> Parámetros utilizados y resistencia de acero TRIP de 1.5 mm [45].	77
<b>Tabla 3.14</b> Propiedades termo-físicas de acero TRIP en comparación con otros materiales [46].	86
<b>Tabla 4.1</b> Resumen de los parámetros óptimos para cada experimento, basados en su resistencia a la tensión [41] [42] [43] [44] [45].	101

# Figuras

<b>Figura 2.1</b> Relación entre la ductilidad y la resistencia a la tensión para diferentes aceros de grado automotriz [13]..	13
<b>Figura 2.2</b> Microestructura típica de los aceros TRIP [16].	14
<b>Figura 2.3</b> Micrografía de acero TRIP 1000. Magnificación 2500X. [17].	15
<b>Figura 2.4</b> Micrografía de acero TRIP 1000. Magnificación 4000X [17].	15
<b>Figura 2.5</b> Gráfica esfuerzo vs deformación para HSLA, DP y TRIP [16].	18
<b>Figura 2.6</b> Piezas de carrocería de acero TRIP 780 electro galvanizado. Refuerzo de columna tipo B de 1.2 mm de espesor [22].	19
<b>Figura 2.7</b> Piezas de carrocería de acero TRIP 780 electro galvanizado. Refuerzo de parachoque de 1.6 mm de espesor [22].	20
<b>Figura 2.8</b> Progresión del conformado del tornillo M5X12, hasta su forma final. [23]	21
<b>Figura 2.9</b> Progresión del conformado del tornillo M6-6h, hasta su forma final [23].	22
<b>Figura 2.10</b> Diagrama simplificado de soldadura por puntos [24].	24
<b>Figura 2.11</b> Esquema de equipo para proceso RSW [24].	25
<b>Figura 2.12</b> Botón de soldadura y electrodos [25].	26
<b>Figura 2.13</b> Penetraciones aceptables en proceso RSW [24].	28
<b>Figura 2.14</b> Ciclo básico de soldadura de proceso RSW [24].	29
<b>Figura 2.15</b> Efecto de la distancia del borde y traslape insuficientes [24].	31
<b>Figura 2.16</b> Tipos de fallas en función de la rotación [24].	33
<b>Figura 2.17</b> Distribución de temperaturas en el proceso RSW [28].	35
<b>Figura 2.18</b> Disipación de calor en soldadura de resistencia [24].	37
<b>Figura 2.19</b> Gráfica de corriente contra resistencia al cizallamiento [24].	39
<b>Figura 2.20</b> Gráfica de tiempo contra resistencia al cizallamiento [24].	41
<b>Figura 2.21</b> Electrodo: diámetros y tipos de puntas [31].	43
<b>Figura 2.22</b> Electrodo para puntos especiales [31].	44
<b>Figura 2.23</b> Combinaciones de porta electrodos y electrodos [24].	45

<b>Figura 3.1</b> Relación entre el esfuerzo último a la tensión y la elongación a fractura de aceros automotrices de primera, segunda y tercera generación [37].	49
<b>Figura 3.2</b> Representación esquemática del encuellamiento o estricción [38].	50
<b>Figura 3.3</b> Curvas esfuerzo vs deformación obtenidas en los aceros investigados [40].	54
<b>Figura 3.4</b> Macrografías y micrografías de los botones de soldadura de uniones homogéneas para láminas de 1mm y resistencia a la tensión de 1,500, 1,700 y 1,300 MPa [41].	56
<b>Figura 3.5</b> Macrografías y micrografías de la zona afectada por el calor de uniones homogéneas para láminas de 1 mm y resistencia a la tensión de 1,500, 1,700 y 1,300 MPa [41].	58
<b>Figura 3.6</b> Macrografías del botón de soldadura de ensayos realizados [42].	61
<b>Figura 3.7</b> Distribución de puntos para análisis metalográfico y de dureza en aceros TRIP de 0.8 mm [43].	63
<b>Figura 3.8</b> Microestructura de acero TRIP de 0.8 mm antes de realizar los experimentos [43].	63
<b>Figura 3.9</b> Macrografías de acero TRIP de 0.8 mm desde el botón de soldadura hasta el metal base [43].	64
<b>Figura 3.10</b> Macroestructura del acero TRIP de 1.5 mm: (a) botón de soldadura y (b) zona afectada por el calor y metal base [44].	69
<b>Figura 3.11</b> Microestructuras obtenidas en el acero TRIP de 1.5 mm de espesor sometido al proceso de soldadura RSW: (a) botón de soldadura, (b) zona afectada por el calor y (c) metal base [44].	70
<b>Figura 3.12</b> Esquema de fallas principales del botón de soldadura durante el ensayo de tensión para acero TRIP de 1.5 mm [44].	71
<b>Figura 3.13</b> Macrografía (a) y micrografías (b) y (c) de falla tipo interfacial para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44].	72
<b>Figura 3.14</b> Macrografía (a) y micrografía (b), de falla tipo interfacial parcial para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44].	73

<b>Figura 3.15</b> Macrografía (a) y micrografía (b), de falla tipo extracción para botón de soldadura de acero TRIP de 1.5 mm [44]. .....	73
<b>Figura 3.16</b> Influencia de los parámetros eléctricos y de tiempo de soldadura sobre la fuerza de corte por tensión de acero TRIP de 1.5 mm [44]......	75
<b>Figura 3.17</b> Microestructura de acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	76
<b>Figura 3.18</b> Dimensiones de la configuración de cupones para ensayos de (a) tensión directa y (b) tensión cruzada, de acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	77
<b>Figura 3.19</b> Representación gráfica de expulsiones de metal líquido para botón de soldadura de ensayo número siete de acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	78
<b>Figura 3.20</b> Diámetros y espesores de botón de soldadura, para ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [45]......	79
<b>Figura 3.21</b> Influencia de los parámetros de soldadura en el incremento de la resistencia cortante por tensión del botón de soldadura de un acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	80
<b>Figura 3.22</b> Macroestructura del botón de soldadura de los ensayos realizados para acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	81
<b>Figura 3.23</b> Micrografías de las microestructuras de la zona afectada por el calor de ensayos de acero TRIP de 1.5 mm [45]......	82
<b>Figura 3.24</b> Valores de dureza Vickers para ensayo número tres (a) y número siete (b) de un acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	83
<b>Figura 3.25</b> Modos de fractura de cupones, para prueba de esfuerzo de tensión directa, de un acero TRIP de 1.5 mm [45]. .....	84
<b>Figura 3.26</b> Macroestructura de soldadura por el proceso RSW, en un acero TRIP 1000 de 1.2 mm de espesor. Defectos típicos (a), cargas en tensión cortante y tensión cruzada (b) [46]. .....	87
<b>Figura 3.27</b> Expulsión de metal líquido de botón de soldadura en acero TRIP 1000 de 1.2 mm de espesor, debido a la entrada extremadamente alta de calor [46]......	89
<b>Figura 3.28</b> Macroestructura de un botón de soldadura que muestra la ubicación del lazo corona, después de la solidificación del metal de soldadura [46]. .....	90
<b>Figura 3.29</b> Micrografía de una grieta superficial [46]. .....	91

<b>Figura 3.30</b> Resultados de la simulación que muestran la distribución de las temperaturas [46].	92
<b>Figura 3.31</b> Resultados de la simulación que muestran la distribución de los esfuerzos de tensión [46].	92
<b>Figura 3.32</b> Micrografía que muestra la ubicación y forma de la grieta inducida por licuación [46].	93
<b>Figura 3.33</b> Micrografía que muestra la microestructura de la grieta por licuación [46].	94
<b>Figura 3.34</b> Microanálisis de rayos-X con sonda de electrones de una grieta por licuación [46].	95
<b>Figura 3.35</b> Esquema de ubicación de la formación de grietas por licuación debidas a la fuerza resultante de las presiones mostradas [46].	96
<b>Figura 3.36</b> Comparación de la penetración del botón de soldadura entre un acero HSLA y un TRIP 1000 de diámetros iguales [46].	97

# BIBLIOGRAFÍA

1. Hazelton P, Murphy B. Understanding soils in urban environments. Cap. 5. Soil Contamination in Urban Areas. Pág. 83. Csiro publishing. 2011.
2. Motarjemi Y, Moy G, Todd E. Encyclopedia of food safety, volume 2. Cap. 20. Processing Contaminants. Pág. 376. The sheridan group. 2014.
3. Dahman Y. Nanotechnology and Functional Materials for Engineers. Cap. 7. Nanotubes. Pág. 162. Book aid international. 2017.
4. Ramakrishnan P. Powder metallurgy for automotive, aluminium alloys, hard and super hard materials. Cap. 16. Influence of Shot Peening on Mechanical Properties of the Alumix 431 PM Alloys. Pág. 124. Scientific international pvt. ltd. New Delhi (India). 2014.
5. Lara A. De sistema mecánico a sistema tecnológico complejo, el caso de los automóviles. Pág. 17-19. Universidad Autónoma Metropolitana–Xochimilco. 2012.
6. Totten G, Westbrook S, Shah R. Fuels and Lubricants Handbook Technology, Properties, Performance, and Testing, ASTM Manual Series: MNL 37WCD. Cap. 3. Motor Gasoline. Pág. 70 y 71. ASTM International. 2003.
7. Askeland D, Wright W. Ciencia e ingeniería de materiales. Cengage learning. Séptima edición. Estados Unidos. 2017.
8. Sun X, Stephens E, Khaleel M. Effects of Fusion Zone Size and Failure Mode on Peak Load and Energy Absorption of Advanced High-Strength Steel Spot Welds. Welding Research. United States. 2007.
9. Pouranvari M, Marashi S. Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties. Science and Technology of Welding & Joining. Vol. 18. No. 5. Pag. 361-403. Iran. 2013.
10. Islam T, Rashed H. Classification and Application of Plain Carbon Steels. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, Bangladesh. 2019.

11. Barbosa A, Mar C, Molar J. Manufactura. Conceptos y aplicaciones. Cap 3. Metales. Pág. 83 - 87. Edit. Patria. 2019.
12. Lopez A. Cambios de fase en aceros con transformación inducida por plasticidad bajo condiciones que simulan líneas de recocido y galvanizado continuo. Tesis de Maestría. San Luis Potosí, S.L.P. 2018.
13. Demeri A. Advanced High Strength Steels: Science, Technology and Applications. International edition. Material Park. ASM International, Ohio EU. 2013.
14. World Steel Association AISBL. World Auto Steel. Bruselas Bélgica. 2018. <https://www.worldautosteel.org>.
15. Campbell F. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. ASM International. The materials information society. Cap. 20 Alloy Steels. Pág. 391 - 392. 2008
16. Zaho J, Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. Progress in materials science. Vol. 94. Pág. 186. Australia. 2018.
17. Gutiérrez E, Contreras A, López A, Fernández B, Salinas A, Deaquino R, Bedolla A, Saldaña R, Reyes I, Aguilar J, Cruz R. An approach for the design of multiphase advanced high-strength steels based on the behavior of CCT diagrams simulated from the intercritical temperature range. Materials Science and Engineering: A, Volume 772. 2020.
18. Rodriguez-Martinez J, Pesci R, Rusinek A, Arias A, Zaera R, Pedroche D. Thermo-mechanical behaviour of TRIP 1000 steel sheets subjected to low velocity perforation by conical projectiles at different temperatures. International Journal of Solids and Structures. Madrid, España. 2010.
19. Hilditch T, de Souza T, Hodgson P. Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS). Chapter 2 Properties and applications of advanced high-strength steels (AHSS). Pag 9-28. Australia. 2015.
20. Téllez D. Caracterización de aceros avanzados y estudio de su resistencia mecánica y conformabilidad. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica división de estudios de postgrado. Tesis. México. 2011.
21. Kučerová L, Jirková H, Mašek B. Continuous cooling of CMnSi TRIP steel. International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014. Materials Today: Proceedings 2S (2015). Pag. 677-680. Republica Checa. 2015.

22. Madías J. Aceros planos avanzados de alta resistencia. Dossier Tecnológico. Artículo. Pág. 36-47. Argentina. 2014.
23. Wiewiórowska S, Muskalski Z. The application of low and medium carbon steel with multiphase TRIP structure in drawing industry. 2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 4-6 February. Bali Indonesia. 2015
24. Dent P, Bohr J, Gasser R, Gerken J, Hallum D, Lee J, McCauley R, Orts D, Oyler G, Shieh W, Wu K, Manz A. Manual de soldadura. American Welding Society. Tomo II. Capítulo 17. Soldadura de puntos, de costura y de proyección. Octava edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. 1996.
25. Zhang H, Senkara J. Resistance Welding. Fundamentals and applications. CRC Press Taylor and Francis Group. Boca raton, FL. 2006.
26. Hamedi M, Pashazadeh H. Numerical study of nugget formation in resistance spot welding. International journal of mechanics. Issue 1, Volume 2, Tehran, Iran. 2008.
27. Dolfi J, Gould J, Karagoulis M, Kelly B, Orsette C, Urech W, Moran S. Welding Handbook. American Welding Society. Welding Processes, Part 2. Volume 3, Chapter 1. Resistance Spot and Seam Welding, Ninth Edition, Miami, FL. 2007
28. Arunchai T, Sonthipermpoon K, Apichayakul P, Tamee K. Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network. Research Article. International Journal of Manufacturing Engineering. Volume 2014. Article ID 154784. Hindawi Publishing Corporation. Thailand. 2014.
29. Hou Z, Kim I, Wang Y, Li C, Chen C. Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process. Journal of Materials Processing Technology 185 (2007). Page 160–165. Published by Elsevier B.V. 2007
30. Senkara J, Zhang H, Hu s. Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding. A model is proposed for predicting expulsion in resistance spot welding. Welding Research. Welding Journal. Pag. 123-132. Polonia. 2014
31. Siehling M, Beneteau D, Haynes P, Hirsch R, Kelly B, Matteson R, Otteren R, Waelchli E, Moran S. Welding Handbook. American Welding Society. Welding Processes, Part 2. Volume 3. Chapter 4. Resistance Welding Equipment. Ninth Edition. Miami, FL. 2007.

32. Pires J, Loureiro A, Bölmsjö G. Welding Robots. Technology, System Issues and Applications. Chapter 2 Welding Technology. 2.4 Resistance Spot Welding (RSW). Springer-Verlag London Limited. 2006
33. SAE International. The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space. Aerospace Material Specification. Welding, Resistance: Spot and Seam. AMS-W-6558A. Estados Unidos. 2000
34. Askari-Paykani M, Shahverdi H, Miresmaeili R. First and third generations of advanced high-strength steels in a FeCrNiBSi system. Journal of Materials Processing Technology. Tomo 238. Iran. 2016.
35. Radwanski K, Wrozyna A, Kuziak R. Role of the advanced microstructures characterization in modeling of mechanical properties of AHSS steels. Materials Science & Engineering A. 2015.
36. Sun W, Wu Y, Yang S, Hutchinson C. Advanced high strength steel (AHSS) development through chemical patterning of austenite. Scripta Materialia 2017.
37. Zhao J, Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. Progress in Materials Science. Tomo 94. Pag 174-242. Australia. 2018.
38. Lloyd J, Field D, Limmer K. A four parameter hardening model for TWIP and TRIP steels. Materials and Design. Tomo 194. Estados Unidos. 2020.
39. Ariza E, Poplawsky J, Guo W, Tschiptschin A. Hot straining and quenching and partitioning of a TRIP-assisted steel: microstructural characterization and mechanical properties. Thermec 2018. Vol. 941. Pág. 704 - 710. Paris, France. 2018.
40. Kaar S, Krizan D, Schwabe J, Hofmann H, Hebesberger T, Commenda C, Samek L. Influence of the Al and Mn content on the structure-property relationship in density reduced TRIP-assisted sheet steels. Materials Science & Engineering A. Tomo 735. Austria. 2018.
41. Varbai B, Sommer Ch, Szabó M, Tóth T, Májlínger K. Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels. Thin-Walled Structures. Tomo 142. Hungria. 2019.
42. Valera J, Miguel V, Martínez A, Naranjo J, Cañas M. Optimization of electrical parameters in Resistance Spot Welding of dissimilar joints of micro-alloyed steels TRIP sheets. Manufacturing Engineering Society International Conference. ScienceDirect. Vigo Pontevedra, España. 2017

43. Spena P, Cortese L, De Maddis M, Lombardi F. Effects of Process Parameters on Spot Welding of TRIP and Quenching and Partitioning Steels. *Steel Research International*. Int. 87 (2016) No. 9999. Bolzano, Italia. 2016.
44. Emre Hayriye-Ertek, Kacar Ramazan. Development of weld lobe for resistance spot-welded TRIP800 steel and evaluation of fracture mode of its weldment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer-Verlag. Londres. 2015.
45. De Maddis M, Spena P, D'Antonio G, Lombardi F. Weldability and monitoring of resistance spot welding of Q&P and TRIP steels. *MDPI Metals*. Vol 6, No. 11, Pág 1-15. Torino, Italia. 2017.
46. Ashiri R, Mostaan H, Park Y. A Phenomenological Study Of Weld Discontinuities And Defects In Resistance Spot Welding Of Advanced High Strength Trip Steel. *The Minerals, Metals & Materials Society And Asm International. Metallurgical And Materials Transactions A*. Vol 49<sup>a</sup>. Pag 6161-6172. Iran. 2018.