

**EFFECTO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA AL ARCO EN LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA EN ACEROS DE  
ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN**



**JORGE ALEJANDRO CORRALES RHÉNAL**  
**JORGE ELIECER CHICA DE AGUAS**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA, CÓRDOBA  
2020.**

**EFFECTO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA AL ARCO EN LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS Y LA MICROESTRUCTURA EN ACEROS DE  
ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN**

**JORGE ALEJANDRO CORRALES RHÉNALIS  
JORGE ELIECER CHICA DE AGUAS**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Monografía, como parte de los  
requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

**Director (s):**

**JIMY UNFRIED SILGADO Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA, CÓRDOBA  
2020.**

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del  
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

**Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a nuestro director de monografía, quien nos apoyó y guio con sus conocimientos a través de cada una de las etapas de este proyecto para llevarlo a los resultados propuestos. También agradecemos a la Universidad de Córdoba por poner a nuestra disposición los recursos e instalaciones necesarias para llevar a cabo nuestra investigación y en especial nuestro proceso formativo como Ingenieros Mecánicos. Por último, agradecemos a todos nuestros compañeros y amigos de universidad y especialmente a nuestras familias, quienes nos han brindado su total apoyo, que siempre han estado presentes en los momentos difíciles que hemos atravesado en nuestra formación.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3. DESARROLLO DEL TEMA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Efecto de la entrada de calor del proceso de soldadura al arco sobre la microestructura de aceros ARBA.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Efecto de los parámetros de soldadura al arco sobre las propiedades mecánicas de aceros ARBA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Correlación entre los cambios de las propiedades y la microestructura como indicador de la soldabilidad de aceros ARBA con procesos de soldadura al arco... </b>	<b>60</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>

## LISTADO DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1. Parámetros de soldadura, entrada de calor de soldadura, penetración de soldadura, ancho de soldadura para GTAW de acero ARBA .....</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 2. Parámetros de soldadura GMAW.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3. Composición química del metal base y el electrodo utilizados. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 4. Parámetros utilizados en el proceso de soldadura .....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 5. Parámetros de soldadura utilizados y entrada de calor aportado.....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 6. Combinación de parámetros para cada una de las muestras, resultados de los ensayos de tracción de las muestras soldadas. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 7. Propiedades mecánicas resultados de los ensayos de tracción del metal base y las juntas soldadas A y B.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 8. Parámetros del proceso utilizados, tomados del WPS de los autores. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 9. Esfuerzos representativos del metal base y material soldado. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 10. Parámetros de proceso utilizados para soldadura láser y láser-GMA-híbrido de acero SA516 grado 70.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 11. Propiedades mecánicas de muestras soldadas con metal base, láser y láser-GMA-híbrido. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 12. Parámetros variados del proceso de soldadura.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 13. Resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las probetas.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 14. Parámetros del proceso de unión de las placas. ....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 15. Propiedades mecánicas de las muestras.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 16. Parámetros de soldadura adoptados en la investigación experimental .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 17. Composición química material base y material de aporte; propiedades de mecánicas del cordón de soldadura .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 18. Parámetros de soldadura.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 19. Propiedades mecánicas de acero S460MC.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 20. Parámetros de soldadura para juntas soldadas. ....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 21. Valores UTS e YS en metal base, ZAT y metal de soldadura .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 22. Resultados del ensayo de tensión .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 23. Resultados de resistencia a la tensión para los cupones de validación .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 24. Parámetros utilizados en las condiciones 1, 2 y 3.....</b>	<b>58</b>

## LISTADO DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1. Macroestructura que muestra el ancho de la ZAT (en mm) con diferentes aportes de calor.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2. Microestructuras de ZAT de grano grueso formadas bajo diferentes parámetros de soldadura × 400.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3. Microestructura en junta con aporte de calor de 0.25 kJ/mm (a) sección transversal, (b) ZAT GF, (c) ZAT GG, y (d) ZF. B bainita, M martensita, ferrita acicular AF, ferrita primaria PF, metal base MB, ZAT de grano fino FGHAZ, ZAT de grano grueso CGHAZ, zona de fusión ZF .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4. Microestructura en junta con aporte de calor de 0,67 kJ/mm (a) sección transversal, (b) ZAT GF, (c) ZAT GG y (d) ZF. Bainita inferior LB, placa lateral de ferrita FS, ferrita acicular AF, ferrita alotriomórfica FS. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 5. Microestructuras en la ZAT del acero ASTM A572-50 a 500X: a) ferrita acicular fina y alotriomórfica, b) ferrita idiomórfica, c) ferrita de grano fino y, d) ferrita de grano grueso. ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 6. Micrografía SEM de la junta soldada sin post-tratamiento térmico. 1 - bainita fina (FB); 2 - ferrita acicular (AF); y 3 - ferrita de límite de grano (GF).....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7. Micrografía SEM de la transición ZAT-MB: (a) CPR / SPO, (b) CPR / CPO, (c) SPR / CPO; y (d) SPR / SPO. ....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 8. Micrografías ópticas que muestran (a) soldadura MSAW en el pase de raíz; (b) el límite (flechas) entre el pase raíz MSAW y el primer pase FCAW; (c) Microestructura típica de la mitad de la soldadura de las soldaduras FCAW y (d) SMAW. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9. Micrografías ópticas que muestran la ZAT tanto en SMAW (a, c, e) como en combinación de MSAW y FCAW (b, d, f). ....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 10. Microestructura de la pieza soldada a: a) 0,75 kJ/mm, b) 0,81 kJ/mm, c) 0,9 kJ/mm, d) 1,125 kJ/mm, e) 1,215 kJ/mm, f) 1,35 kJ/mm, de entrada de calor. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 11. Microestructura de la pieza soldada a: a) 1,5 kJ/mm, b) 1,62 kJ/mm, c) 1,8 kJ/mm, d) 1,875 kJ/mm, e) 2,025 kJ/mm, f) 2,25 kJ/mm de entrada de calor. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 12. Configuración de junta (a) espacio de cero mm y (b) espacio de dos mm. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 13. Micrografías ópticas de uniones soldadas en, muestra de espacio de cero mm (a) ZF y (b) ZAT, y espacio de dos mm (c) ZF, (d) ZAT y (e) material base. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 14. Micrografías de la zona de fusión que muestran las fases de ferrita alotriomórfica (am), ferrita de Widmanstatten (ws) y ferrita acicular (ac) a (a) 500 aumentos y (b) 1000 aumentos. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 15. Microestructura observada en el material base a 500X.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 16. Microestructura observada en la ZAT a 500X a) GMAW, b) GMAW-LSC .....</b>	<b>33</b>

<b>Figura 17. Microestructura de la Zona de Fusión a 500X a) Proceso GMAW convencional, b) Proceso GMAW-LSC.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 18. Perfil de microdureza de las muestras 1, 2, 9, 11.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 19. Diagrama de barras comparativo de la resistencia a la tracción de las juntas soldadas. ST: sin tratamiento, T1: tratamiento post-soldadura 1 y T2: tratamiento post-soldadura 2.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 20. Perfiles de dureza para las muestras, a) zona superior del cordón de soldadura, b) zona central y c) zona inferior.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 21. Perfiles de microdureza vickers para las muestras A y B.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 22. Barrido de dureza de la junta soldada completa.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 23. a) perfil de dureza soldadura láser, b) perfil de dureza soldadura híbrida láser-GMAW.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 25. Resultados de dureza en las probetas a) 1A3 y 2D3, b) 3D2, 4DCT, 5A2, c) 6M3 y 7MA3. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 26. Muestras luego del ensayo de tracción, a) muestras sin tratamiento (SST), b) muestras con tratamiento (PWHT).....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 26. Perfil de microdureza en las soldaduras.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 27. Resultados placas de 12 mm a) Tracción (Sut), b) Cedencia (Sy).....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 28. Resultados placas de 20 mm a) Tracción (Sut), b) Cedencia (Sy).....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 29. Microdureza Vickers de las soldaduras S460MC LasTIG. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 30. Resistencia a la tracción de las soldaduras S460MC Láser-TIG. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 31. Microdureza en las uniones soldadas SMAW, SAW, FCAW y A-GTAW .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 32. Valores de límite elástico y resistencia máxima de la junta para los procesos.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 33. Perfiles de durezas para validación de los modelos. (a) Cupón X70-V1; (b) Cupón X70-V2 .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 34. Tramos para medidas de microdureza de uniones en condiciones 1, 2 y 3.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 35. Evolución de la microdureza Vickers asociada con las secciones monitoreadas a) 1, 2, 3 y b) 4. Para las tres condiciones de soldadura en tándem del acero ASTM A572 G50 con ER70S-6.....</b>	<b>59</b>

## RESUMEN

Los procesos de soldadura al arco generan cambios microestructurales en los metales soldados debido a los aportes de calor, esto conlleva a cambios en las propiedades mecánicas. En la presente monografía se buscó estudiar el efecto que generan los procesos de soldadura al arco sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de las juntas, y correlacionar este efecto como indicador de la soldabilidad de dichos materiales. Se analizaron diferentes investigaciones en las cuales se observó la influencia de variados procesos de soldadura al arco, cambiando múltiples parámetros de los procesos, así como los aportes de calor generados durante la soldadura sobre diferentes aceros de alta resistencia y baja aleación (ARBA). Según el análisis realizado se encontró que existe una correlación entre el tipo de microestructura y las propiedades mecánicas y estas dependen directamente del aporte de calor al cual se ve sometido el material durante el proceso de soldadura. También se logró determinar que la poca variación de las propiedades mecánicas y la microestructura son un claro indicador de la buena soldabilidad de estos aceros.

**Palabras Clave:** Acero ARBA, soldadura, junta, soldabilidad, microestructura, ZAT, propiedades mecánicas.

## **ABSTRACT**

The arc welding processes generate microstructural changes in the welded metals due to the contributions of heat, this leads to changes in the mechanical properties. In this monograph we sought to study the effect generated by these processes on the mechanical properties and microstructure of the joints, and to correlate this effect as an indicator of the weldability of these materials. Different investigations were analyzed in which the influence of various arc welding processes was observed, changing multiple parameters of the processes, as well as the heat inputs generated during welding on different high strength and low alloy steels (HSLA). According to the analysis carried out, it was found that there is a correlation between the type of microstructure and the mechanical properties and these depend directly on the heat input to which the material is subjected during the welding process. It was also possible to determine that the little variation in mechanical properties and microstructure are a clear indicator of the good weldability of these steels.

**Key words:** HSLA steel, weld, joint, weldability, microstructure, ZAT, mechanical properties.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel mundial los procesos de soldadura por arco son los más usados en la construcción de estructuras metálicas, al presentar la mejor relación costo-beneficio al unir piezas o elementos (Arias Rendón, 2013). Especialmente, uno de los sectores metalmeccánicos más desarrollados que existe en la actualidad es el de la construcción de carrocerías, ya que, gracias al desarrollo de nuevas técnicas, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado que se utilizaban antiguamente. Sin embargo, la soldadura produce transformaciones estructurales importantes en el metal utilizado durante la fabricación de la estructura, especialmente, debido a cambios en la composición y transformaciones de fase durante la solidificación y enfriamiento, las mismas que deben ser bien entendidas para diseñar y producir soldaduras confiables que garanticen la durabilidad de las mismas (Zurita Velasteguí, 2014). En general, la microestructura final depende, fundamentalmente, de la interacción del ciclo térmico creado por la soldadura y la composición química del metal base (Gonzalez , Suárez, Vicario , & Muñoz, 2006), además, de su estado de entrega antes de soldar. Para mejorar la relación resistencia/peso se han desarrollado numerosos aceros de alta resistencia y de baja aleación (ARBA), que tienen un bajo contenido de carbono (en general menos de 0,30%) y se caracterizan por una microestructura consistente en una fase de ferrita con perlita. Desarrollados a principios de la década de 1930, los aceros ARBA se producen comúnmente en la forma de lámina mediante microaleación y laminado en caliente controlado. A partir de estos aceros se fabrican placas, barras y formas estructurales.

Típicamente, las láminas de aceros ARBA se utilizan en partes de carrocerías automotrices y otros equipos de transporte; el uso de estos aceros se justifica en la

necesidad de contar con aceros cuyos límite de elasticidad sean mayores a los de los aceros comunes, de modo que se obtenga una gran capacidad de carga con secciones más ligeras (Calderón, 2014), y por ende, una reducción en el consumo de combustible; en minería, agricultura y diversas aplicaciones industriales. Las placas de ARBA se emplean además en barcos, puentes, construcción de edificios y para formas como vigas, canales y ángulos que se usan en edificios y estructuras variadas (Kalpakjian & Schmid, 2008).

En la soldadura por arco, el calor requerido se obtiene de la energía eléctrica. Se produce un arco entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo que se va a soldar, mediante una fuente de alimentación CA o CD (Kalpakjian & Schmid, 2008). Mediante la aplicación de calor intenso, el metal en la unión entre las dos partes se funde y causa que se entremezclen directamente con el metal de aporte fundido intermedio. Tras el enfriamiento y la solidificación, se crea una unión metalúrgica. Puesto que la unión es una mezcla de metales, la soldadura final, debería tener las mismas propiedades de resistencia que el material base. En la soldadura por arco, el electrodo (recubierto o alambre) es guiado a lo largo de la junta ya sea manual o mecánicamente. El electrodo es una varilla cuya función es transportar la corriente entre la punta y las piezas. Además de esto puede también fundirse y aportar metal a la junta (Lincoln Electric Company, 2018).

Muchos aspectos del procedimiento de soldadura influyen en la microestructura y en las propiedades de la junta soldada, por ejemplo, tipo y densidad de corriente, voltaje, gas de protección, precalentamiento, temperatura entre pases, velocidad de aporte, metal de aporte, diseño de la junta, espesor del metal base, estabilidad del arco, carbono equivalente y la cantidad de cordones de soldadura aplicados. Estudiar cada uno de estos parámetros por separado es difícil, debido a que, en muchos casos, estos no varían

independientemente. Se ha observado que al aumentar el calor durante el precalentamiento y la temperatura entre pases, durante el proceso de soldadura se reflejaría en disminución de la resistencia y tenacidad de la junta soldada; un efecto similar podría presentarse si se incrementa la entrada de calor en la junta soldada (Gómez Mendoza, 2016).

Las adiciones de aleaciones a los aceros ARBA fortalecen la ferrita, promueven la templabilidad y ayudan a controlar el tamaño de grano. La soldabilidad disminuye a medida que aumenta el límite elástico. Para todos los propósitos prácticos, soldar estos aceros es lo mismo que soldar aceros al carbono que tienen carbono equivalente similar. El precalentamiento a veces puede ser necesario, pero el post-calentamiento casi nunca es necesario (ASM International, 1990). La aplicación incorrecta del proceso de soldadura puede llegar a causar fallas en las juntas por elevadas tensiones residuales elevadas, ocasionando fisuras. Estas fallas se encuentran relacionadas con factores como la velocidad de avance de la soldadura, velocidad de enfriamiento, entre otros.

Por todo lo anterior, es de gran importancia realizar un análisis profundo para algunos de los procesos de soldadura al arco utilizados comúnmente, y correlacionar la incidencia que tienen los parámetros de proceso en los cambios microestructurales y en las propiedades mecánicas del material, para así determinar la combinación de estos que lleven a un proceso de soldadura adecuado y satisfactorio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar los efectos que tienen diversos procesos de soldadura al arco y sus parámetros sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de aceros de baja aleación y alta resistencia (ARBA).

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- 1.** Evaluar el efecto que tiene la entrada de calor del proceso de soldadura al arco sobre la microestructura de aceros ARBA.
- 2.** Analizar el efecto que los parámetros de soldadura al arco tienen sobre las propiedades mecánicas de aceros ARBA.
- 3.** Discutir la correlación entre los cambios de las propiedades y la microestructura como indicador de la soldabilidad de aceros ARBA con procesos de soldadura al arco.

### **3. DESARROLLO DEL TEMA**

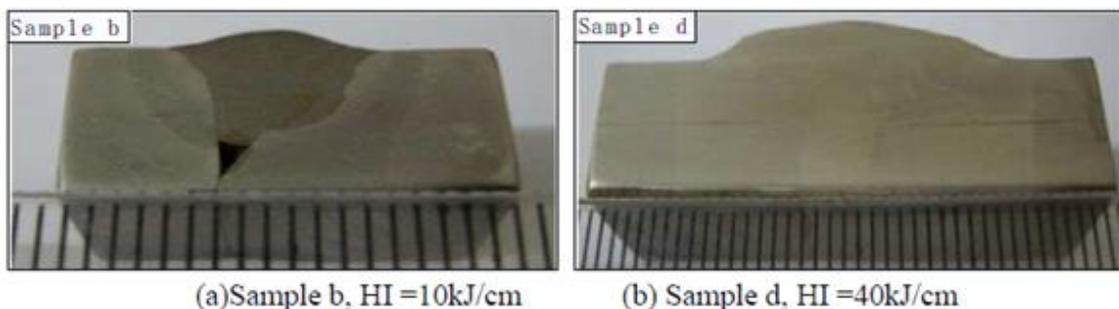
#### **3.1 Efecto de la entrada de calor del proceso de soldadura al arco sobre la microestructura de aceros ARBA**

La soldadura produce transformaciones estructurales importantes en el metal utilizado durante la fabricación de la estructura, especialmente por cambios en la composición y transformaciones de fase durante la solidificación y enfriamiento (Zurita Velasteguí, 2014). Debido a esto, surge la necesidad de realizar estudios sobre la incidencia que tienen estos procesos de soldadura sobre los materiales durante su construcción, ya que la microestructura final y las propiedades mecánicas dependen, fundamentalmente, de la interacción del ciclo térmico creado por la soldadura y la composición química del metal base (Gonzalez , Suárez, Vicario , & Muñoz, 2006).

Wanderlind (2018) estudió las juntas soldadas de dos aceros disimiles ASTM A572 G50 y A36, utilizando el proceso GMAW con curva controlada de corriente y tensión, con transferencia metálica por STT (transferencia de tensión superficial), con alambre ER70-S con Ø1,2 mm de diámetro. Se valuó la velocidad de alimentación ( $V_a$ ) entre los 3,5 m/min y 5 m/min; el foco de la columna de arco eléctrico (FC) con valores entre 1,0 y 1,5 y la amplitud entre la corriente pico y la corriente base. Wanderlind realizó pruebas experimentales para medir energía de soldadura, eficiencia de deposición y resistencia mecánica, además analizó la microestructura formada en la región de soldadura y el perfil de dureza vickers. Con la caracterización metalográfica se observó para el acero ASTM A36, una matriz de ferrita con presencia reducida de perlita, para el acero ASTM A572 G50 matriz ferrítica, con presencia más marcada de colonias de perlita, orientadas en la

dirección de laminación. Para ambos materiales, el autor encontró el mismo patrón de alteración microestructural con regiones definidas, esto debido a las diferentes temperaturas alcanzadas durante la soldadura. En la zona fundida verificó la formación de ferrita de Widmanstätten. Al inicio de la ZAT, identificó una región con un tamaño de grano perlítico muy grande, lo que denominó zona de grano grueso (ZGG). También observó, en el recorrido longitudinal de cada placa, una región de granos de tamaño intermedio de perlita, proporcional a las temperaturas alcanzadas, pasando por la región de refinamiento de grano en la que un pico de temperatura más bajo proporcionó una pequeña difusión de carbono ferrita dando lugar a pequeñas colonias de perlita.

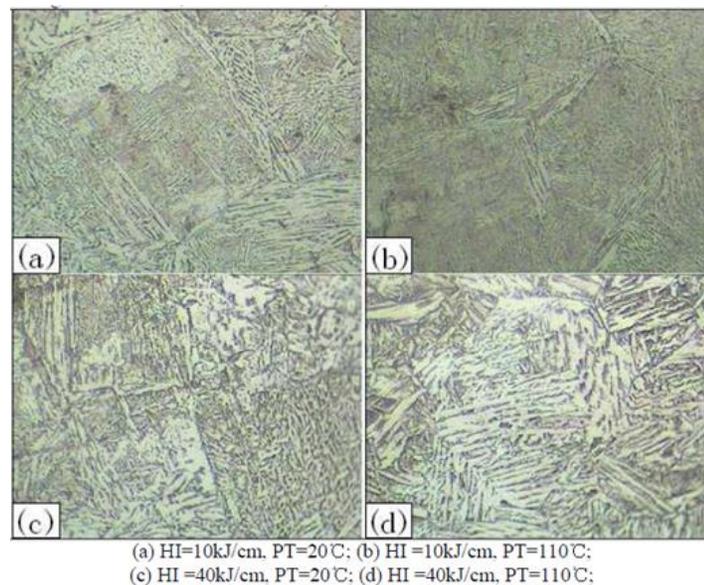
En 2011, Zhou, Yang, Ye, Dai, & Peng, estudiaron el efecto de los parámetros de soldadura en la microestructura de la ZAT de juntas soldadas a tope en un acero ASTM A572 G65 de 10 mm de espesor por medio de GMAW. Al observar las juntas soldadas a diferentes entradas de calor se evidenció claramente penetración completa en la junta soldada con entrada de calor de 40 kJ/cm y una ZAT más ancha que la de la junta soldada con 10 kJ/mm, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Macroestructura que muestra el ancho de la ZAT (en mm) con diferentes aportes de calor.

**Fuente:** (Zhou, Yang, Ye, Dai, & Peng, 2010)

La microestructura observada en la figura 2(a) está compuesta principalmente por listones de martensita, varios constituyentes Austenita-Martensita (A-M) y algo de ferrita de límite de grano que se distribuye a lo largo de los granos de austenita previa. Se observa una constitución similar en la figura 2(b), pero con el tamaño de grano más pequeño, indicando que para un menor aporte de calor el precalentamiento contribuye para obtener microestructura de grano fino, mientras que para una entrada de calor de 40 kJ/cm se evidencia lo opuesto, en la junta soldada con precalentamiento tiene una microestructura más grande (Fig 2(d)) en ZAT de grano grueso que sin precalentamiento (Fig. 2(c)). Además de algunos componentes de listones de martensita, ferrita de límite de grano y Austenita-Martensita. Se observó bainita superior como la microestructura principal en la figura 2(d), y la microestructura en la figura 2(c) está compuesta de bainita granular, constituyentes A-M, una pequeña cantidad de ferrita de límite de grano y listones de martensita (Zhou, Yang, Ye, Dai, & Peng, 2010).



**Figura 2.** Microestructuras de ZAT de grano grueso formadas bajo diferentes parámetros de soldadura  $\times 400$ .

**Fuente:** (Zhou, Yang, Ye, Dai, & Peng, 2010)

Dong, Hao & Deng, (2014) investigaron la soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW) de un acero ARBA de 6 mm de espesor, variando el aporte de calor donde analizaron la influencia de esta en las propiedades mecánicas y microestructura en la ZAT. Se mantuvo el voltaje constante en 11 V. Algunos parámetros relevantes se describen en la tabla 1.

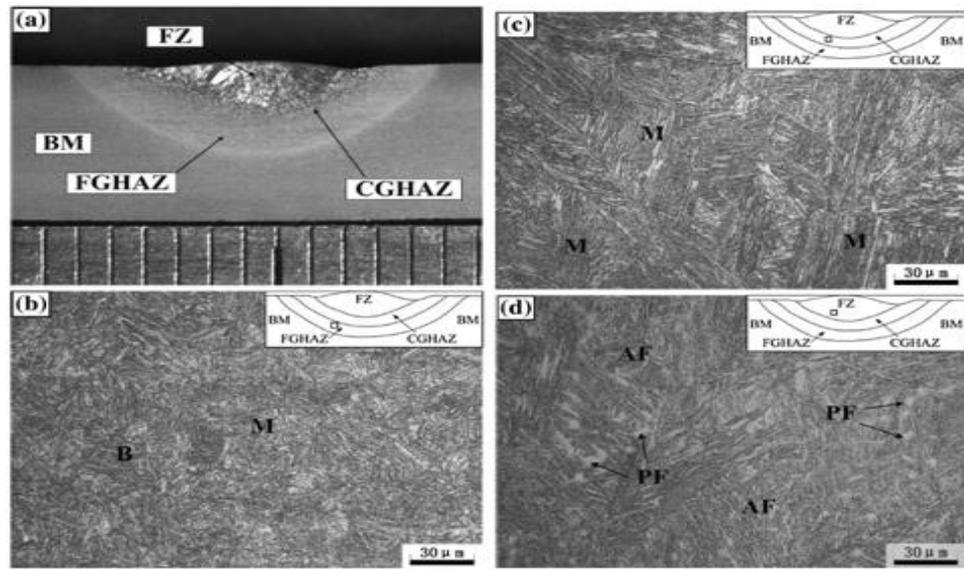
**Tabla 1.** Parámetros de soldadura, entrada de calor de soldadura, penetración de soldadura, ancho de soldadura para GTAW de acero ARBA

Muestra	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (mm/s)	Entrada de calor (kJ/mm)	Penetración de soldadura (mm)	Ancho de soldadura (mm)
1	180	3	0,46	1,8	8,0
2	220	3	0,57	2,5	11,0
3	260	3	0,67	2,7	12,3
4	260	5	0,40	2,2	9,0
5	260	8	0,25	1,7	7,3
6	300	3	0,77	2,8	13,4

**Fuente:** (Dong, Hao, & Deng, 2014)

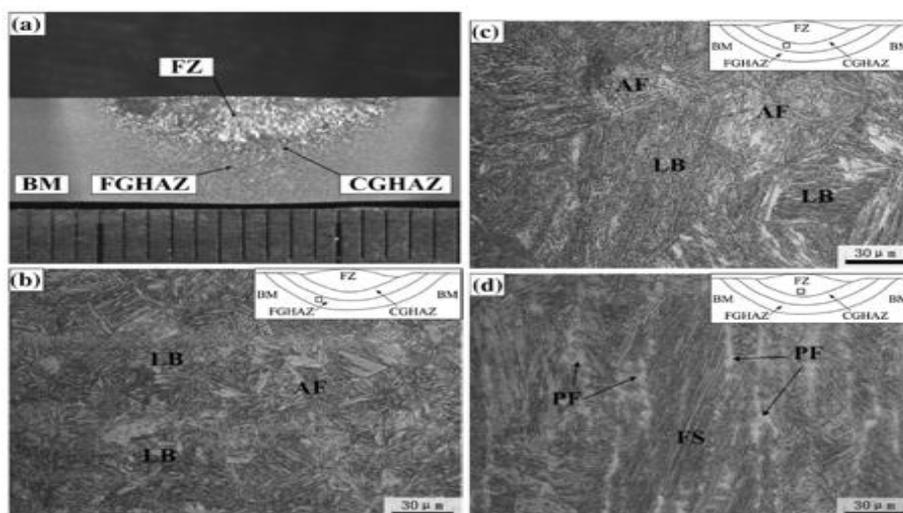
La microestructura del metal base observada por los autores fue bainita granular (GB). Cuando realizaron un aporte bajo de calor la microestructura en la ZAT de grano fino consistía principalmente en Bainita inferior de grano fino, con 0,25 kJ/mm apareció una pequeña cantidad de martensita en ZAT de grano fino, con una entrada de calor de 0,40 kJ/mm la microestructura consistió en listones de martensita y algo de bainita. El aumento del tiempo de enfriamiento restringió la transformación de martensita y produjo algo de bainita en la ZAT, con 0,67 kJ/mm la microestructura cambió a ferrita acicular y bainita inferior (Figura 4 (b, c)). Con un aporte de calor de 0,77 kJ/mm, la microestructura en la ZAT de grano grueso consistió en bainita inferior, bainita superior en menor medida y ferrita acicular gruesa. El tamaño de grano en la ZAT de grano grueso se hizo muy grande con un aporte de calor de 0,77 kJ/mm.

La microestructura en la zona de fusión consistió en ferrita acicular y poligonal con algunos precipitados de carburo. El aumento de la entrada de calor cambió la morfología de la ferrita en ZF. Aumentando la entrada de calor de soldadura a 0,67 kJ/mm, se evidenció en el límite de grano ferrita primaria (PF). La ferrita acicular en la ZF se hizo más gruesa y luego se formó ferrita alotriomórfica (FS), como se muestra en la Fig. 4(d).



**Figura 3.** Microestructura en junta con aporte de calor de 0.25 kJ/mm (a) sección transversal, (b) ZAT GF, (c) ZAT GG, y (d) ZF. B bainita, M martensita, ferrita acicular AF, ferrita primaria PF, metal base MB, ZAT de grano fino FGHAZ, ZAT de grano grueso CGHAZ, zona de fusión ZF

**Fuente:** (Dong, Hao, & Deng, 2014)



**Figura 4.** Microestructura en junta con aporte de calor de 0,67 kJ/mm (a) sección transversal, (b) ZAT GF, (c) ZAT GG y (d) ZF. Bainita inferior LB, ferrita alotriomérica FS, ferrita acicular AF.

**Fuente:** (Dong, Hao, & Deng, 2014)

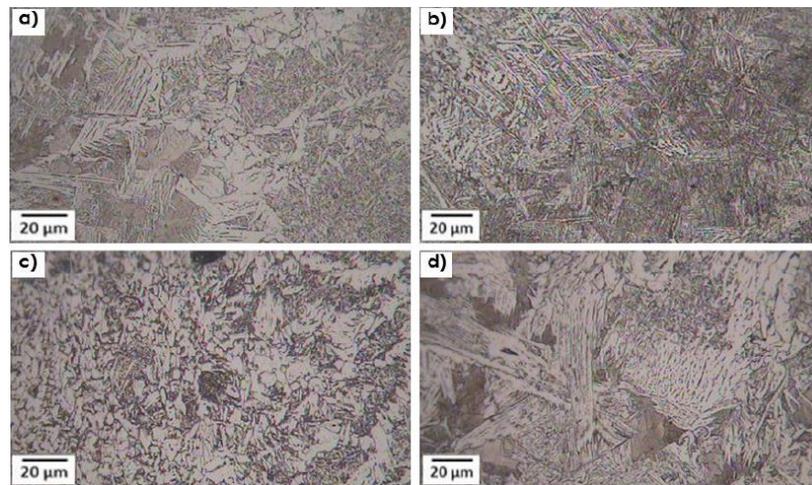
En 2017, Ríos realizó un estudio sobre el efecto de los parámetros de soldadura robotizada en juntas de aceros disimiles de aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 mediante GMAW. Se realizaron 36 juntas y se seleccionaron las 10 con las mejores combinaciones de parámetros como se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Parámetros de soldadura GMAW.

#	Corriente (A)	Voltaje (v)	Vel Soldad. (mm/min)	Temp. Prealent. (°C)	Entrada de calor (kJ/mm)	ZAT (mm)
P3	261,25	28,13	609	219	0,724	2,09
P6	219,25	25,4	609	235	0,549	1,77
P8	247,83	28,77	552	206	0,775	2,15
P12	229,25	27,8	552	226	0,693	1,87
P18	165,17	23,64	609	248	0,385	0,88
P23	159,17	23,24	609	221	0,364	1,81
P25	207	28,97	609	248	0,591	1,55
P27	201,17	26,79	609	239	0,531	1,81
P28	242,25	28,86	609	235	0,689	1,86
P31	235	27,92	552	240	0,713	1,87

**Fuente:** Tomado y adaptado (Ríos, 2017)

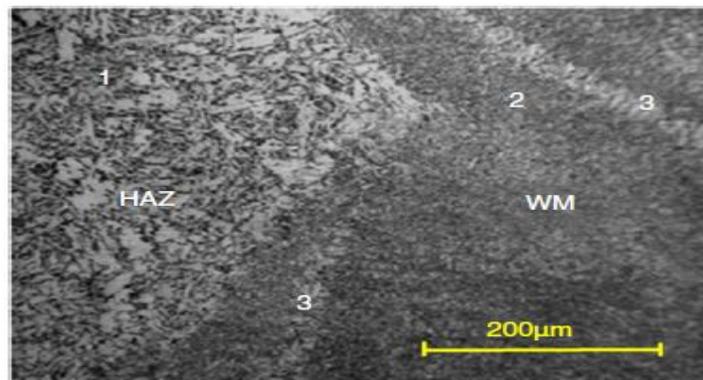
El autor analizó las microestructuras en la ZAT del acero ASTM A572 G50 en las probetas P31, P3, P12 y P27 por ser las más significativa. El estudio de metalografía arrojó que la ZAT está formada por una zona recristalizada formada por diversos tipos de ferrita. Para la muestra P31 se encontró ferrita alotriomórfica fina que se forma en los límites de grano austenítico (Figura 5(a)). En la muestra P12, la microestructura estuvo formada por una matriz de ferrita acicular que crece como agujas finas con presencia de ferrita idiomórfica en pocas cantidades (Figura 5(b)). La muestra P3 mostró una ZAT que consiste en ferrita de grano fino con poca presencia de ferrita acicular fina entre granos (Figura 5(c)). La muestra P27 presentó una microestructura formada por ferrita de grano grueso con presencia de ferrita acicular y ferrita en pocas cantidades (Figura 5(d)).



**Figura 5.** Microestructuras en la ZAT del acero ASTM A572-50 a 500X: a) ferrita acicular fina y alotriomórfica, b) ferrita idiomórfica, c) ferrita de grano fino y, d) ferrita de grano grueso.

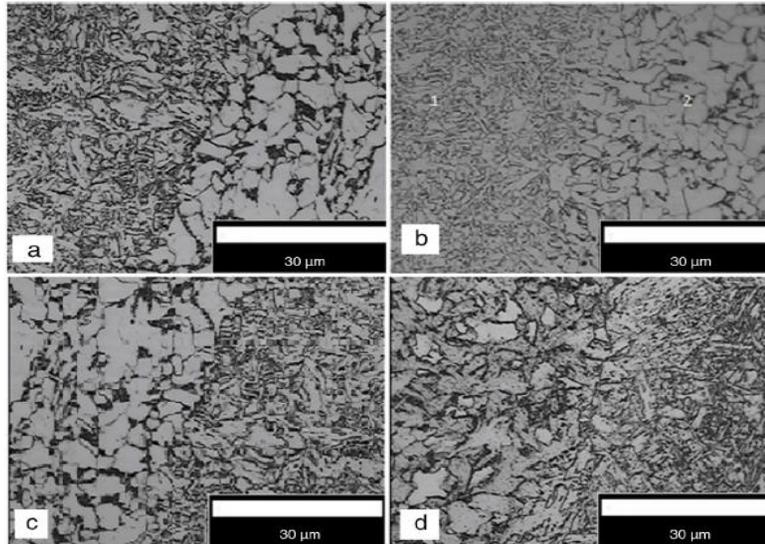
**Fuente:** Tomado y adaptado de (Ríos, 2017)

Por su parte, Jorge, Cándido, Ríos y otros (2018) estudiaron las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero HSLA-80 de 30 mm de espesor soldado con el proceso SMAW, con diferentes condiciones de tratamiento térmico: solo precalentamiento, precalentamiento y post-calentamiento, solo post-calentamiento, y sin pre o post-calentamiento. Se determinó la influencia de estos tratamientos en las propiedades mecánicas y la microestructura de la junta. Los autores encontraron, para el MB una microestructura típica de bainita. Debido al alto aporte de calor de la soldadura y el tratamiento post soldadura (CPO) se promovió la formación de ferrita granular (FG) y de ferrita intergranular (FI) con tratamiento de precalentamiento (CPR). Esto debido al precalentamiento, lo que hizo que se redujera la velocidad de enfriamiento, induciendo a la nucleación de FI o la generación de FG. Los autores observaron, para todas las muestras tratadas térmicamente en las diferentes condiciones la presencia de bainita en la ZAT y de ferrita acicular en la ZF como granos columnares. Otro resultado obtenido fue la presencia de aproximadamente el 40% de las regiones columnares y el 60% de las regiones de recalentamiento (Figura 6), la microestructura columnar está formada por FA cuya ocurrencia en la ZF está asociada con elementos como Mn y Ni que existen en los electrodos y estabilizan la AF.



**Figura 6.** Micrografía SEM de la junta soldada sin post-tratamiento térmico. 1 - bainita fina (FB); 2 - ferrita acicular (AF); y 3 - ferrita de límite de grano (GF).

**Fuente:** (Jorge, y otros, 2018)



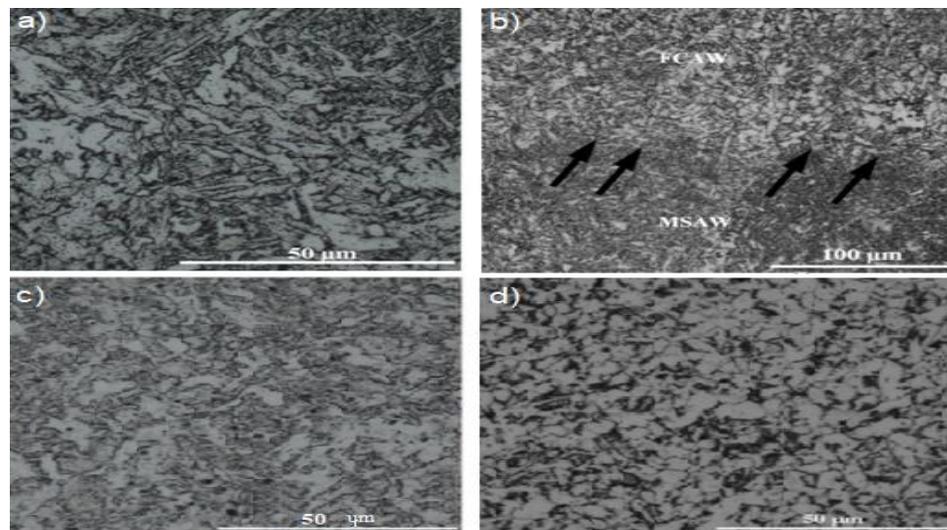
**Figura 7.** Micrografía SEM de la transición ZAT-MB: (a) CPR / SPO, (b) CPR / CPO, (c) SPR / CPO; y (d) SPR / SPO.

**Fuente:** (Jorge, y otros, 2018)

Alipooramirabad, Paradowska, Ghomashchi, & Reid (2017) estudiaron el efecto de los procesos de soldadura SMAW y MSAW+FCAW (soldadura de arco corto modificado + soldadura por arco con núcleo fundente) sobre la microestructura de un acero API 5L X70 de 20 mm de espesor y la entrada de calor promedio en cada uno de los procesos utilizados fue de 0,767 y 0,667 kJ/mm para SMAW y MSAW+FCAW respectivamente. Para el proceso SMAW, se utilizó un consumible E6010 con un diámetro de 3,2 mm para la pasada de raíz y un electrodo E8010 de 4 mm en las 29 pasadas restantes. Por otra parte, para el proceso MSAW + FCAW se utilizó para la pasada de raíz un electrodo ER70s-6 con el proceso MSAW y las 24 pasadas restantes usando un electrodo tubular E81TNi con núcleo de fundente con el proceso FCAW.

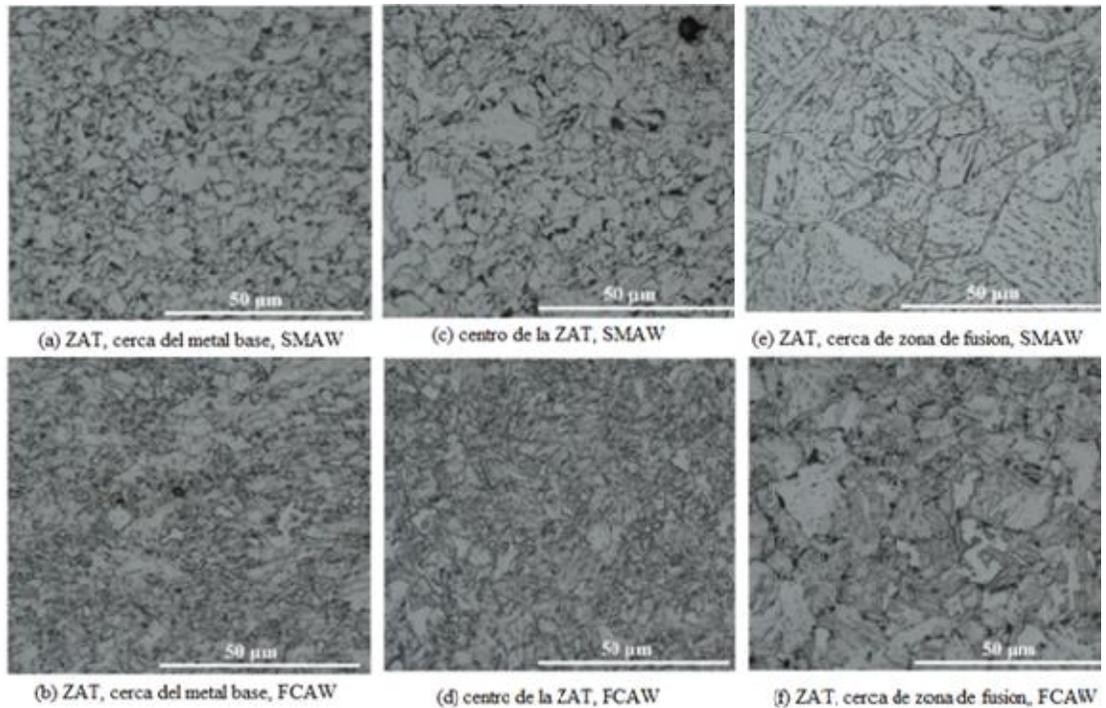
Los autores observaron que el material base contiene bainita y ferrita acicular con algo de ferrita poligonal y un pequeño porcentaje de perlita. Luego de los procesos de soldadura

la microestructura encontrada en la pasada de raíz de MSAW fue de ferrita de Widmanstätten, ferrita acicular y poligonal (Figura 8(a)); por otra parte, la microestructura encontrada en la raíz de la junta SMAW (Figura 8(b)), está compuesta de ferrita acicular engrosada por el calentamiento de pases posteriores, también detectó ferrita poligonal y de Widmanstätten junto a algo de bainita. En la ZAT hubo un crecimiento de grano continuo desde el material base hasta la zona de fusión con una microestructura compuesta mayormente por ferrita acicular cerca del metal base que cambia a ferrita poligonal y ferrita bainítica al acercarse a la ZF. La microestructura del metal de soldadura para la combinación MSAW + FCAW está compuesta principalmente por ferrita de Widmanstätten, ferrita acicular y bainita, lo que confirma una tasa de enfriamiento mayor. Al compararse con FCAW, el proceso SMAW posee formas toscas de la ferrita junto con perlita, indicación de un enfriamiento más lento al permitir la formación de perlita.



**Figura 8.** Micrografías ópticas que muestran (a) soldadura MSAW en el pase de raíz; (b) el límite (flechas) entre el pase raíz MSAW y el primer pase FCAW; (c) Microestructura típica de la mitad de la soldadura de las soldaduras FCAW y (d) SMAW.

**Fuente:** (Alipooramirabad, Paradowska, Ghomashchi, & Reid, 2017)

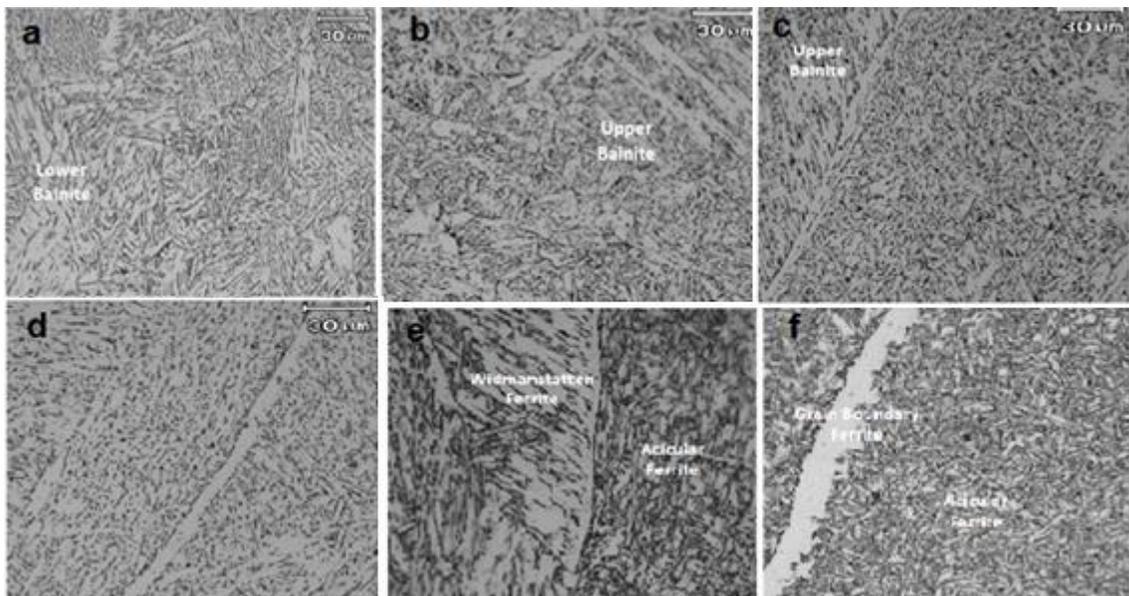


**Figura 9.** Micrografías ópticas que muestran la ZAT tanto en SMAW (a, c, e) como en combinación de MSAW y FCAW (b, d, f).

**Fuente:** Adaptado de (Alipooramirabad, Paradowska, Ghomashchi, & Reid, 2017)

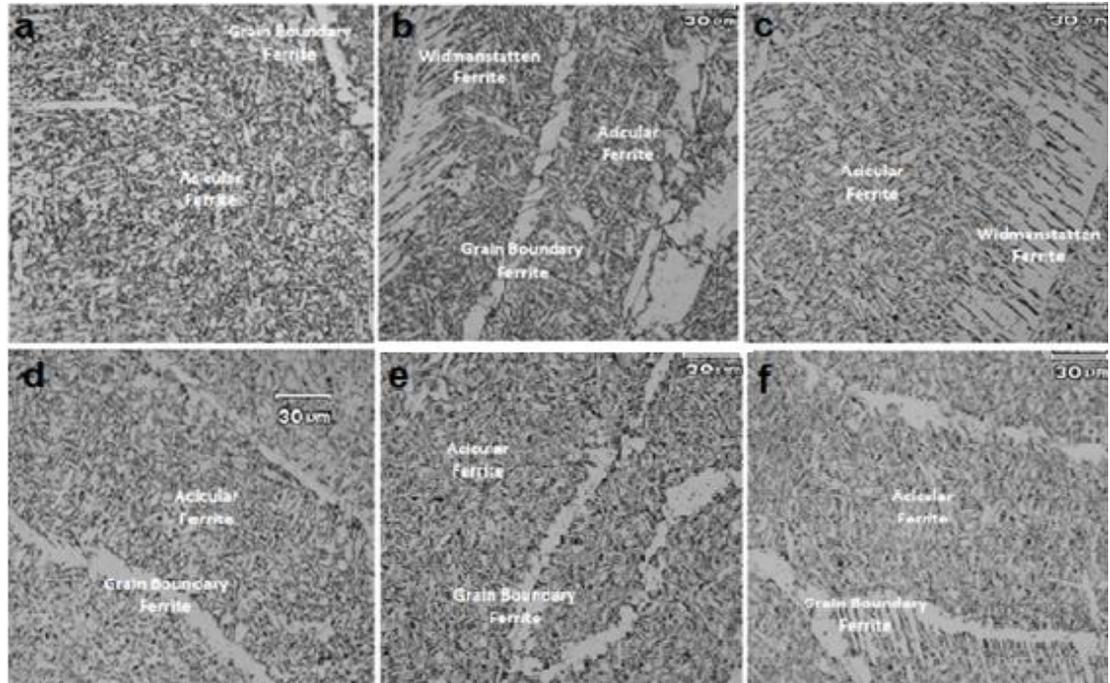
Suryana, Pramono, Muda, & Setiawan (2019) también estudiaron el acero API 5L grado X65, validando el efecto de la entrada de calor sobre las propiedades mecánicas y microestructura de las juntas soldadas mediante el proceso SAW, el estudio se realizó con placas de 11 mm de espesor y las juntas se soldaron variando la corriente de 200, 300, 400 y 500 amperios con voltajes de 25, 27, y 30. Los autores determinaron que cuando la entrada de calor fue de 0,75 kJ/mm, se formó una microestructura de bainita inferior, debido a que se genera una velocidad de enfriamiento rápida, al aumentar la entrada de calor a 0,81 kJ/mm y 0,9 kJ/mm la velocidad de enfriamiento disminuyó, formándose bainita superior (Fig. 10). Cuando aplicaron una entrada de calor de 1,215 kJ/mm a 2,25 kJ/mm la microestructura predominante fue la ferrita acicular, aunque hubo límites de

granos de ferrita y ferrita de Widmanstätten, debido a la velocidad de enfriamiento más lenta, estas condiciones se muestran en las Figuras 10 (e) y 11(f). El porcentaje de ferrita acicular se incrementó y se observó disminución de la ferrita de Widmanstätten y la ferrita de límite de grano, debido a la gran intensidad de corriente que aumentó la entrada de calor, lo que retardó la tasa de enfriamiento correspondiente para la formación de ferrita acicular.



**Figura 10.** Microestructura de la pieza soldada a: a) 0,75 kJ/mm, b) 0,81 kJ/mm, c) 0,9 kJ/mm, d) 1,125 kJ/mm, e) 1,215 kJ/mm, f) 1,35 kJ/mm, de entrada de calor.

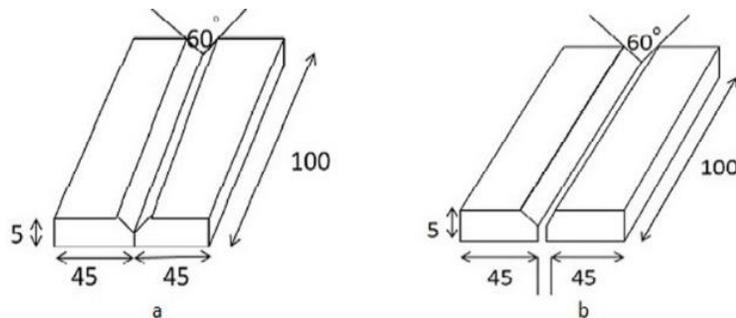
**Fuente:** Tomado y adaptado de (Suryana, Pramono, Muda, & Setiawan, 2019)



**Figura 11.** Microestructura de la pieza soldada a: a) 1,5 kJ/mm, b) 1,62 kJ/mm, c) 1,8 kJ/mm, d) 1,875 kJ/mm, e) 2,025 kJ/mm, f) 2,25 kJ/mm de entrada de calor.

**Fuente:** Tomado y adaptado de (Suryana, Pramono, Muda, & Setiawan, 2019)

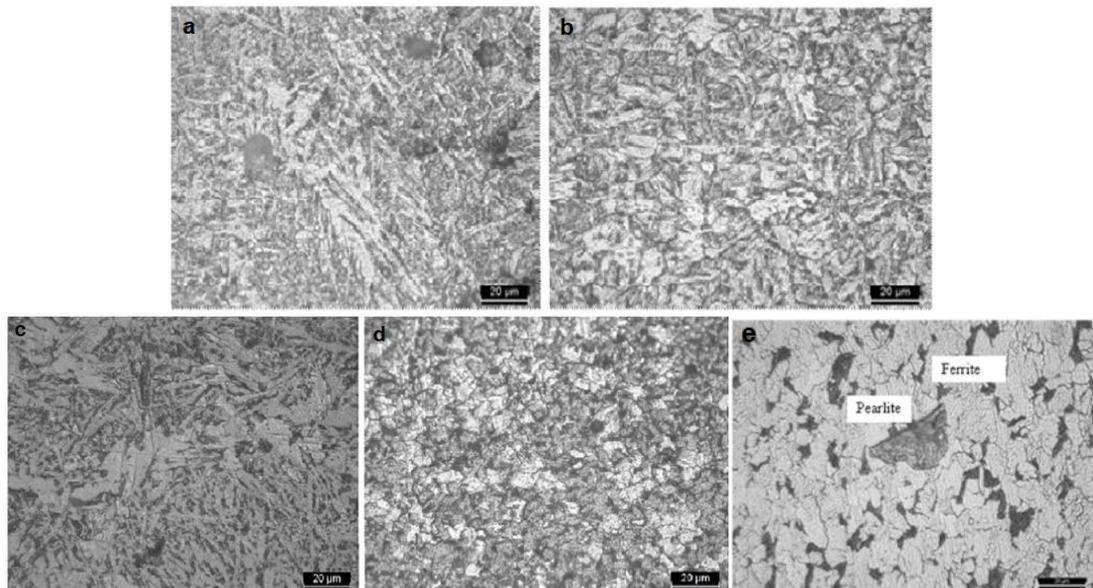
Ullah, Rajputa, Guptaa, Verma, & Soota (2019) estudiaron el efecto que tiene la abertura de raíz de la soldadura en las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero ARBA mediante el proceso GMAW, variando el espaciado de raíz entre 0 y 2 mm (Figura 12), la soldadura se realizó con una corriente de 150 A y un voltaje de 17 V, utilizando como gas protector el gas CO<sub>2</sub>.



**Figura 12.** Configuración de junta (a) espacio de cero mm y (b) espacio de dos mm.

**Fuente.** (Ullah, Rajputa, Guptaa, Verma, & Soota, 2019)

Los autores encontraron, para el material base una estructura consistente en ferrita (blanca) y perlita (oscura) como se muestra en la Figura 13(e).



**Figura 13.** Micrografías ópticas de uniones soldadas en, muestra de espacio de cero mm (a) ZF y (b) ZAT, y espacio de dos mm (c) ZF, (d) ZAT y (e) material base.

**Fuente.** Adaptado de (Ullah, Rajputa, Guptaa, Verma, & Soota, 2019)

Según los autores, en la zona de fusión (ZF) de ambas muestras (0 y 2 mm de abertura de raíz), como se muestra en las figuras 13(a) y 13(c) respectivamente, se pudo observar estructura de grano columnar o ferrita acicular, debido a la velocidad de enfriamiento lenta en la zona de fusión. En la región ZAT (Figuras 13(b) y 13(d)), por el contrario, los granos son más finos debido al tiempo más corto de enfriamiento, por lo tanto, no tienen tiempo de alargarse. Para el caso de la abertura de raíz de 2 mm los granos tienen mayor tamaño en comparación con la de 0 mm, esto es debido a que tiene más material de aporte, el cual tarda más tiempo en enfriarse.

Por su parte Kiran, Basu, & De estudiaron, en 2017 para un acero ARBA, la influencia de los parámetros del proceso de soldadura al arco sumergido (SAW) de dos alambres en tándem, como la corriente del alambre principal, los pulsos de corriente del alambre posterior y la velocidad de soldadura en las dimensiones del cordón de soldadura y las propiedades mecánicas en la soldadura. La composición química del acero estudiado se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Composición química del metal base y el electrodo utilizados.

<b>Elemento</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>V</b>	<b>Al</b>	<b>Mo</b>
MB	0,048	1,583	0,412	0,623	0,642	0,023	0,026	0,047	0,148

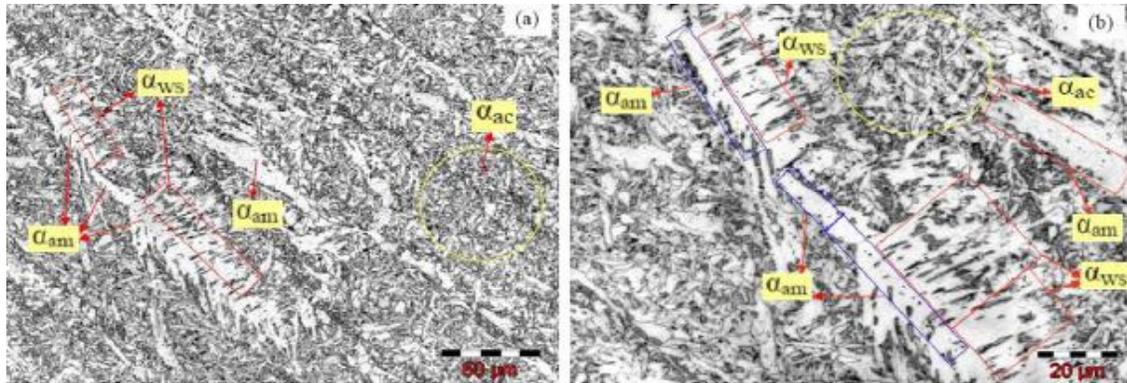
**Fuente:** (Kiran, Basu, & De, 2012)

**Tabla 4.** Parámetros utilizados en el proceso de soldadura

<b>Parámetros</b>	<b>Factor de nivel</b>				
	-2,3784	-1	0	1	2,3784
Corriente arco principal (A)	300	384	445	506	590
Pico ve+ pulso de corriente en arco posterior (A)	319	343	360	377	401
Pico ve- pulso de corriente en arco posterior (A)	401	562	680	797	958
-ve tiempo de pulso en arco posterior (ms)	8,35	9,56	10,44	11,32	12,53
Velocidad de soldadura (mm/s)	7	10	12,23	14,45	17,45

**Fuente:** (Kiran, Basu, & De, 2012)

La microestructura de la zona de fusión consistió en ferrita alotriomórfica, ferrita Widmanstätten y ferrita acicular desarrolladas intragranularmente. La fase de ferrita alotriomórfica apareció como venas paralelas y la fase de ferrita de Widmanstätten como ramas paralelas de la ferrita alotriomórfica. El crecimiento de la ferrita de Widmanstätten con la ferrita alotriomórfica como base se observa en la Figura 14(b).



**Figura 14.** Micrografías de la zona de fusión que muestran las fases de ferrita alotriomórfica (am), ferrita de Widmanstatten (ws) y ferrita acicular (ac) a (a) 500 aumentos y (b) 1000 aumentos.

**Fuente:** (Kiran, Basu, & De, 2012)

Los autores concluyeron que cuando se aumentaron los pulsos de corriente para el hilo posterior, aumentó el tamaño de la zona de fusión, reduciendo así la velocidad de enfriamiento, esto inhibe las fases de ferrita acicular en la microestructura de la soldadura y da como resultado propiedades mecánicas deficientes; contrariamente, el aumento en la velocidad de soldadura tiende a reducir el tamaño de la zona de fusión, lo que produjo una mayor velocidad de enfriamiento, produciendo una mayor fracción de volumen de la fase de ferrita acicular y mejores propiedades mecánicas del cordón de soldadura.

Castañeda (2016) estudió la soldabilidad del acero ASTM A572 G50, mediante el proceso GMAW con control de baja salpicadura (GMAW-LSC, por sus siglas en inglés) comparándolo con el proceso GMAW convencional, en modo de transferencia de corto circuito, utilizando como gases protectores 100% CO<sub>2</sub> y la mezcla de 90% Ar-CO<sub>2</sub>, respectivamente. Otros parámetros del proceso se muestran en la tabla que sigue. La dureza se midió mediante el ensayo Knoob (HK), el cual es una alternativa al ensayo Vickers.

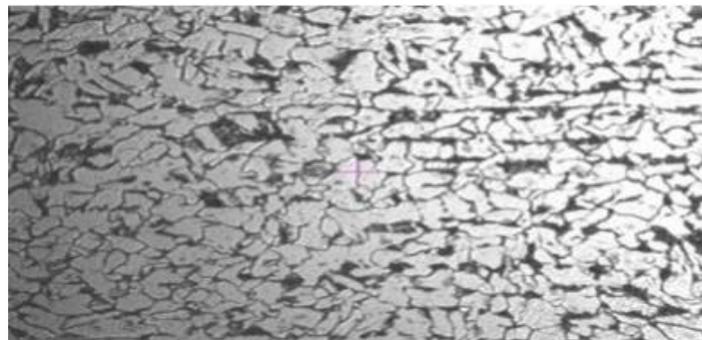
**Tabla 5.** Parámetros de soldadura utilizados y entrada de calor aportado.

Proceso	Aporte	Vel. de soldadura (in/min)	Amperaje (A)	Voltaje (v)	Calor de entrada (kJ/cm)
LSC	ER70S-3	Parametrizado			20
Convencional	ER70S-3	6,15 in/min	116	18	30

**Fuente:** (Castañeda , 2016)

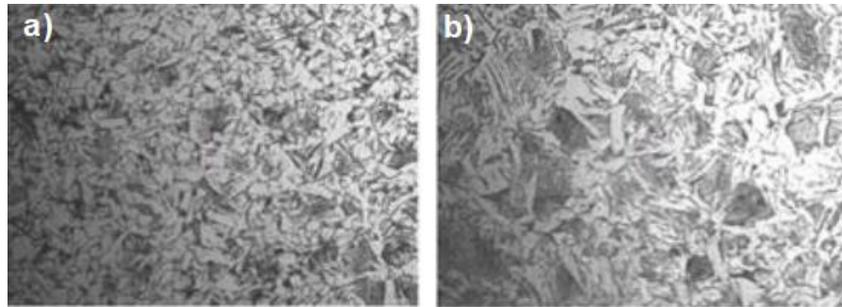
El proceso GMAW-LSC utiliza corriente eléctrica con longitud de onda rectificadas, lo cual le da estabilidad a la aplicación. Comparándola contra el proceso GMAW convencional, el cual exhibe una transferencia de onda no rectificadas, disminuyendo la estabilidad de arco, sin importar que la mezcla de gas utilizada contenga alto contenido de argón que proporciona estabilidad de arco eléctrico (Castañeda , 2016).

El metal base presentó una estructura perlítica alineada de acuerdo a la orientación del laminado (Figura 15). Con una distribución de aproximadamente 70/30, entre la fase ferrítica y la fase perlítica. En la ZAT de la junta del proceso GMAW convencional (Figura 16(a)) se observó una microestructura de ferrita y perlita no uniforme con dureza de 219 HK, producto de un enfriamiento poco uniforme. Para el proceso GMAW-LSC observó también estructura de ferrita y perlita de granos más uniformes con dureza de 176 HK, debido a menor velocidad de enfriamiento y una estructura más homogénea.



**Figura 15.** Microestructura observada en el material base a 500X

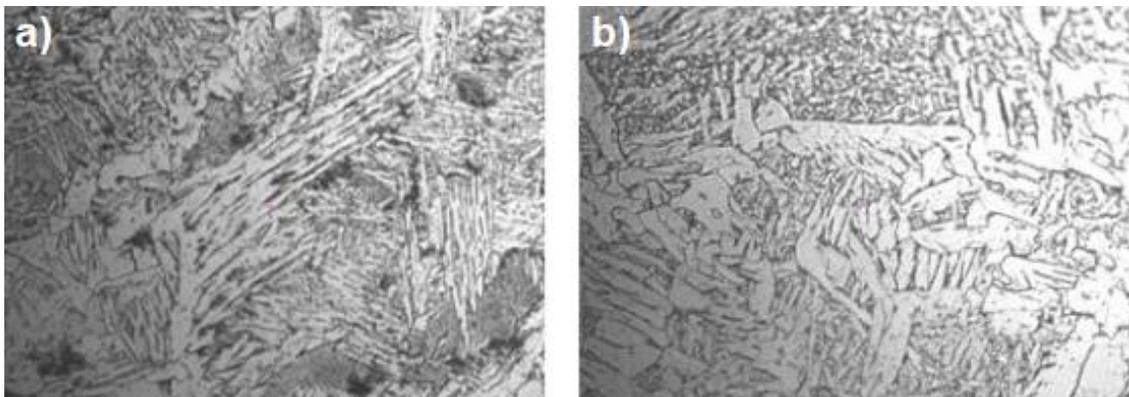
**Fuente:** (Castañeda , 2016).



**Figura 16.** Microestructura observada en la ZAT a 500X a) GMAW, b) GMAW-LSC

**Fuente:** (Castañeda , 2016).

Para la zona de fusión (Figura 17), el autor observó, para el proceso de soldadura GMAW convencional componentes de ferrita y perlita con estructura Widmanstätten con dureza en el rango de 199-213 HK, mientras que, para la zona de fusión con el proceso GMAW-LSC se observó una microestructura de perlita y ferrita Idiomórfica.



**Figura 17.** Microestructura de la Zona de Fusión a 500X a) Proceso GMAW convencional, b) Proceso GMAW-LSC.

**Fuente:** (Castañeda , 2016).

La nucleación y crecimiento de grano en aceros ARBA está influenciado por la velocidad de enfriamiento y la composición química. “Este mecanismo se lleva a cabo a través de la nucleación de óxidos durante el proceso de soldadura, estas partículas de óxido se determinan por el tipo de soldadura y los gases utilizados” (Castañeda , 2016), la variación de los gases protectores utilizados permitió observar que la fracción de volumen de ferrita

acicular es definitivamente influenciada por el oxígeno y el contenido de dióxido de carbono en el gas argón de protección. Se concluye que “el comportamiento entre los dos procesos, en cuanto a la microestructura es muy similar, en la zona afectada por el calor y la zona de soldadura su estructura en ambos casos de Ferrita y Perlita con variaciones en el tipo de ferrita de forma acicular, Widmanstätten e Idiomórfica, este tipo de formación y efecto en la estructura tiene una relación entre calor ingresado, velocidad de enfriamiento y el gas de protección”.

De acuerdo con la información analizada, se logra identificar un efecto en la microestructura de las juntas de aceros ARBA soldadas con los procesos de soldadura al arco estudiados, en el cual todos los autores coincidieron. Dicho efecto es el tamaño de grano de la microestructura, el cual, a su vez, depende de la velocidad de enfriamiento, la cual se ve afectada por diferentes factores como: precalentamiento, espesor del material, entrada de calor y abertura de raíz. Esto es, existe una relación inversamente proporcional entre el tamaño de grano y la velocidad de enfriamiento, así, al aumentar la velocidad de enfriamiento el tamaño de grano disminuye, por el contrario, al disminuir la velocidad de enfriamiento el tamaño de grano aumenta. Aunque una entrada de calor más baja puede producir granos finos comparado con la de la más alta entrada de calor, la naturaleza del proceso también juega un papel importante en la refinación de la microestructura del metal de soldadura (Gómez Mendoza, 2016). De igual forma se encontró una relación entre la entrada de calor y la obtención de fases de listones de martensita la cual es una fase frágil y perjudicial para la resistencia a tracción de la junta, la aparición de martensita se dio en las soldaduras donde utilizaron entradas de calor bajas lo que proporciona velocidades de enfriamiento altas y el posible surgimiento de agrietamiento en frío.

Las microestructuras encontradas en las juntas soldadas de los diferentes aceros ARBA es variada dependiendo del tipo de acero y de los procesos utilizados, no obstante las microestructuras más comunes en la zona de la soldadura fueron diferentes fases de ferrita como la ferrita Widmanstätten, acicular, idiomorfica y alotriomorfica, con una tendencia de aumento de ferrita acicular proporcional al aumento en la entrada de calor, además de otras fases como bainita inferior, bainita superior, perlita y en algunos casos listones de martensita. Así mismo, se ha logrado comprobar que el ancho de la zona afectada por el calor depende fundamentalmente del calor aportado por el proceso de soldadura, es decir, a mayor calor aportado a la junta mayor es el ancho de la ZAC.

Wanderlind (2018); Zhou, Yang, Ye, Dai y Peng (2010); Ríos (2017) y Castañeda (2016) coincidieron en que para un acero ASTM A572 la microestructura consiste en una matriz ferrítica orientada en la dirección de laminación, además de colonias de perlita, en una proporción de 70/30, respectivamente; sin embargo, los resultados de las microestructuras en la ZAT obtenidas no coinciden a pesar de utilizar el proceso GMAW en sus estudios, esto se debe principalmente por las combinaciones de parámetros utilizadas, las velocidades de enfriamiento y las temperaturas pico en cada estudio. Wanderlind por su parte obtuvo perlita de grano fino y grano grueso; En cambio Zhou, Yang, Ye, Dai y Peng obtuvieron listones de martensita, ferrita de límite de grano y A-M con una entrada de calor de 10 kJ/cm con tamaño de grano más pequeño en la junta soldada con precalentamiento en comparación con la junta sin precalentamiento y bainita granular, ferrita de límite de grano además de listones de martensita en la junta soldada con 40 kJ/cm sin precalentamiento y bainita superior, listones de martensita, ferrita de límite de grano más A-M en la junta con precalentamiento con tamaño de grano mayor en la junta

con precalentamiento; En contraste Ríos y Castañeda si obtuvieron microestructuras parecidas compuestas por diferentes fases de ferrita en el primer caso y una formada por ferrita y perlita en el segundo.

Para los aceros API 5L, en sus variantes X65 y X70, estudiados por Alipooramirabad, Paradowska, Ghomashchi, & Reid (2017) y Suryana, Pramono, Muda, & Setiawan, (2019) la microestructura del material base está compuesta mayormente por bainita, con microconstituyentes de ferrita acicular, algo de ferrita poligonal y perlita.

### **3.2 Efecto de los parámetros de soldadura al arco sobre las propiedades mecánicas de aceros ARBA**

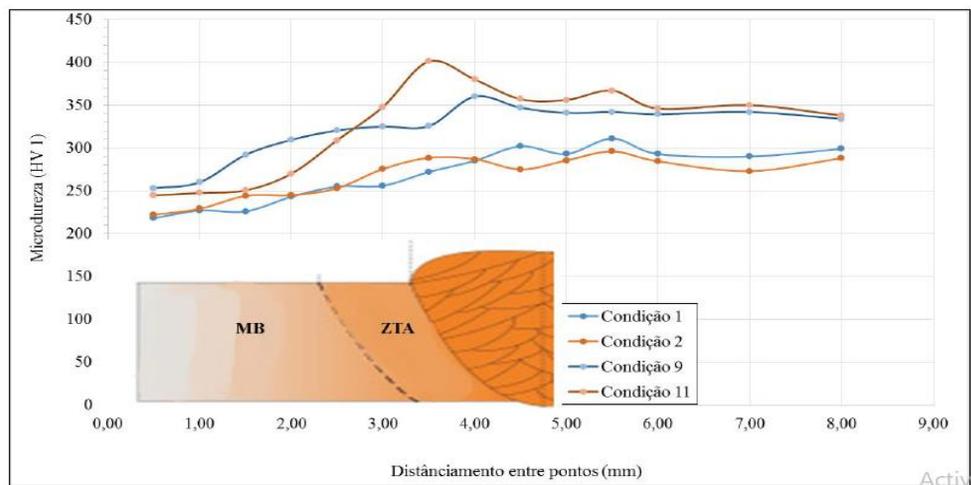
En 2018, Vidor evaluó la soldadura de un acero ASTM A588 con dos metales de adición y doce condiciones de parámetros de soldadura. En la tabla 6 se presentan las combinaciones de parámetros eléctricos, los dos tipos de alambre de adición y los resultados de los ensayos de tracción luego de realizadas las soldaduras. El autor evaluó los resultados obtenidos para los valores de resistencia a la tracción, las condiciones que mostraron resistencia a la tracción menor al 95% de la resistencia del metal base fueron las condiciones siete, ocho y diez. Las fallas presentadas para la condición diez se deben a la falta de llenado de la junta debido a la alta velocidad de avance de la soldadura.

**Tabla 6.** Combinación de parámetros para cada una de las muestras, resultados de los ensayos de tracción de las muestras soldadas.

Metal de aporte	Corriente (A)	Resistencia a la tracción (MPa)					
		Velocidad de soldadura (mm/min)					
		700			1000		
		Voltaje (v)					
		16	17,5	18,5	16	17,5	18,5
ER70S-6	150	1   558,6			4   527		
	180		2   525			5   545,3	
	200			3   559			6   528,3
ER80S-G	150	7   492,3			10   416,3		
	180		8   467,3			11   511	
	200			9   529,6			12   506

**Fuente:** Adaptado de (Vidor, 2018)

En cuanto a la validación de los parámetros de soldadura, se descartaron algunas condiciones (condiciones 3, 4, 5, 7, 8 y 12), con parámetros más bajos o altas velocidades de soldadura, donde no se obtuvo relleno suficiente de las juntas, comprometiendo su resistencia. Para caracterizar las muestras mediante ensayos mecánicos se realizaron con las condiciones precalificadas (condiciones 1, 2, 9 y 11). El autor destacó los altos puntos de microdureza obtenidos en la condición 11, mostrados en la figura 18 eliminando así su uso, debido a su dureza excesiva y fragilidad.

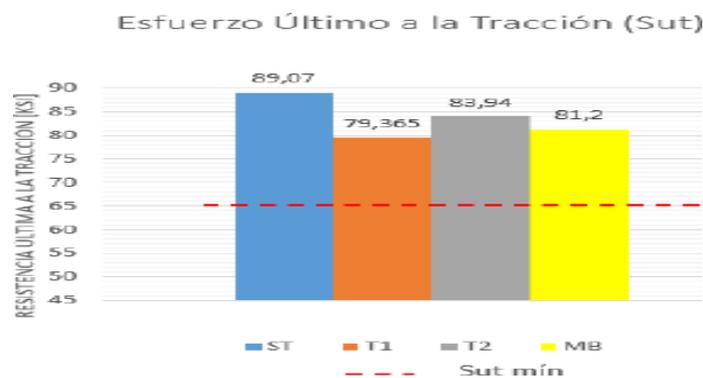


**Figura 18.** Perfil de microdureza de las muestras 1, 2, 9, 11.

**Fuente:** (Vidor, 2018)

Los resultados de las propiedades mecánicas mostraron que los parámetros de soldadura fueron predominantes en relación a los tipos de metales de aporte. Se concluyó que la selección inadecuada de los parámetros eléctricos fue en detrimento de las propiedades mecánicas, resultando en defectos como falta de fusión y llenado incompleto de la junta.

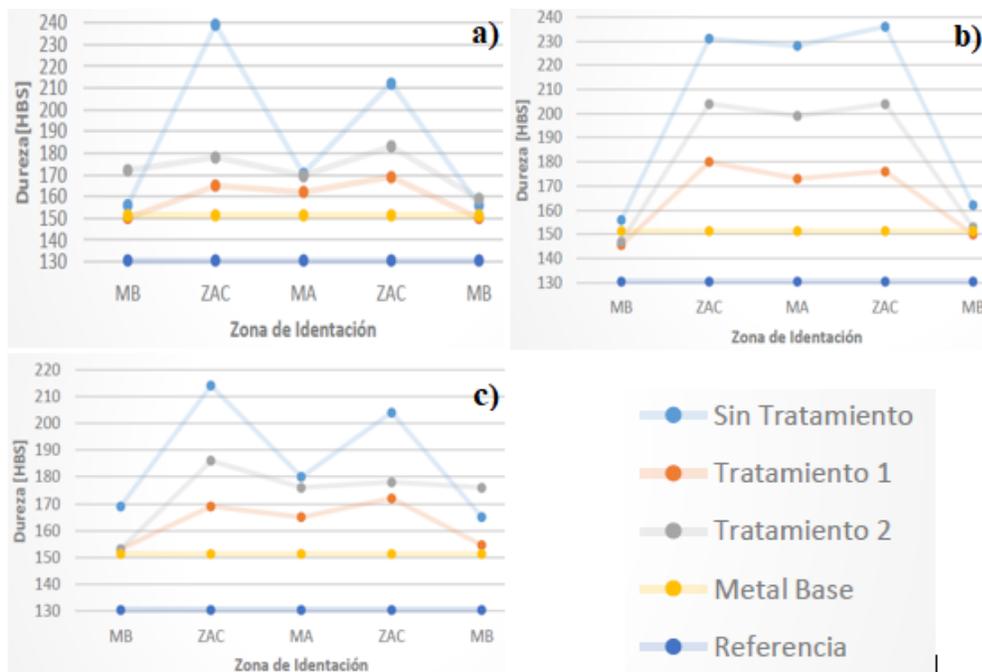
Campo y Jaramillo (2019) realizaron una comparación de algunas propiedades mecánicas de juntas soldadas tratadas térmicamente de un acero ASTM A572 G50 de 40 mm de espesor por medio de SMAW y FCAW. Con base en los resultados de los ensayos fue posible determinar la variación de la microestructura y de las propiedades mecánicas en las juntas soldadas. En la figura 19 se muestran los valores promedio de resistencia a la tracción de cada una de las probetas; todas las probetas presentaron valores mayores a la resistencia mínima a la tracción establecida para el material base; ST presenta un valor notablemente superior con respecto al material base ensayado debido a que no se realizó un tratamiento térmico post-soldadura; T1 y T2 presentaron valores promedios cercanos al valor obtenido para el material base ensayado, consecuencia de los tratamientos térmicos realizados; razones por las que todas las probetas fallaron en el metal base.



**Figura 19.** Diagrama de barras comparativo de la resistencia a la tracción de las juntas soldadas. ST: sin tratamiento, T1: tratamiento post-soldadura 1 y T2: tratamiento post-soldadura 2.

**Fuente:** (Campos & Jaramillo, 2019)

El autor concluyó que es necesario la realización de un tratamiento térmico post-soldadura debido a que la junta después del proceso de soldadura presenta poca ductilidad, lo cual se tradujo en una mayor posibilidad de fallar frente a la aplicación de esfuerzos de tensión presentes en la aplicación. En la figura 20(a), el autor evidenció que la probeta ST tenía menor ductilidad en comparación a las demás, esta obtuvo valores elevados de dureza en la ZAT, la probeta T1 con mayor ductilidad presentó las durezas más bajas, mientras que la probeta T2 tuvo valores intermedios entre las probetas ST y T1. Esta tendencia se evidencia tanto para la toma realizada en la zona central e inferior del ensayo de dureza como se observa en las figuras 20(b) y figura 20(c) respectivamente.



**Figura 20.** Perfiles de dureza para las muestras, a) zona superior del cordón de soldadura, b) zona central y c) zona inferior.

**Fuente:** Tomado y adaptado (Campos & Jaramillo, 2019)

Por otro lado, Vidal Dos Santos y Rubens Gonçalves (2019) evaluaron la microestructura, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión electroquímica de un acero ASTM A572 G50 antes y después de los procesos de soldadura GMAW (muestra A, con alambre

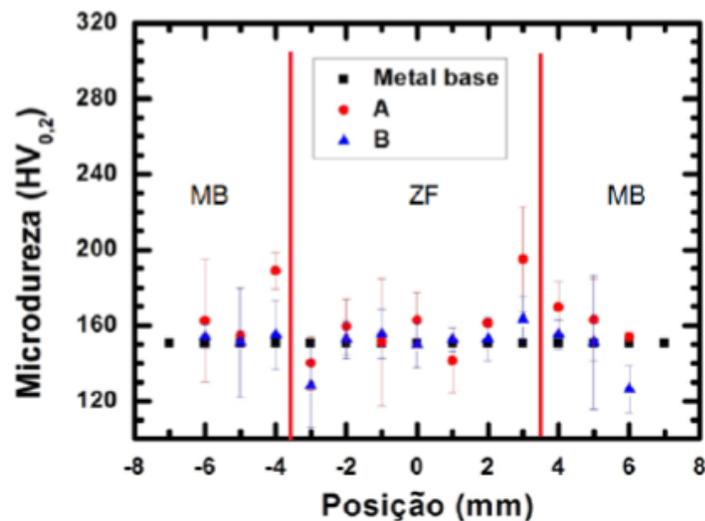
de soldadura ER 70S-6 y gas de protección 75% Ar-25% CO<sub>2</sub>) y FCAW (muestra B, con un alambre de soldadura 81 T1-A1, con 99,99% CO<sub>2</sub> como gas de protección, muestra B). La Tabla 7 muestra las propiedades mecánicas de los resultados de las pruebas de tracción para las muestras de metal base y juntas soldadas A y B.

**Tabla 7.** Propiedades mecánicas resultados de los ensayos de tracción del metal base y las juntas soldadas A y B.

Material	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{RT}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
Metal base	420	581	32
Muestra1	420	598	30
Muestra 2	433	602	37

**Fuente:** (Vidal dos Santos & Gonçalves, 2019)

Se encontró que los procesos utilizados para realizar las juntas soldadas no alteran negativamente la resistencia a la tracción del material, obteniendo en todos los casos la falla en el material base; por otra parte, la entrada de calor si alteró la dureza aumentándola en la ZAT en la junta con GMAW (A) y modifico aleatoriamente la dureza en la junta soldada con FCAW (B) como se aprecia en la figura 21.



**Figura 21.** Perfiles de microdureza vickers para las muestras A y B.

**Fuente:** (Vidal dos Santos & Gonçalves, 2019)

Suarez y Vanegas (2015) desarrollaron un estudio de caracterización metalográfica y mecánica de un acero ASTM A572 G50, al mismo tiempo desarrollaron un estudio de la soldabilidad del material acorde con el código AWS D1.1. Para realizar las soldaduras los autores utilizaron un proceso GMAW, con una junta a tope en v, parámetros del proceso se muestran en la tabla 8.

**Tabla 8.** Parámetros del proceso utilizados, tomados del WPS de los autores.

Material de Aporte	Corriente (A)	Voltaje (v)	Velocidad avance (mm/s)	Gas de protección
ER70S-6	100-340	17-22	5-10	75% Ar/25% CO <sub>2</sub>

**Fuente:** (Vanegas & Suarez, 2015)

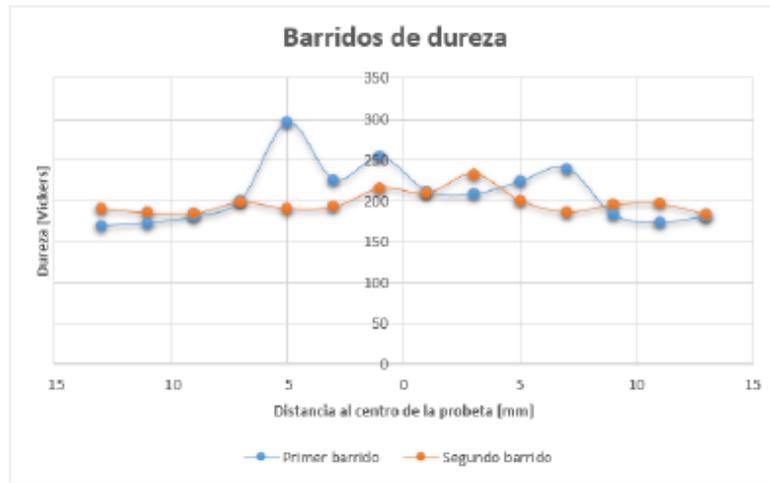
Los autores observaron que, los valores de esfuerzos máximos, presentados en el metal base y en el metal soldado son cercanos, estando el del metal soldado un poco por encima al del metal base. En el caso del esfuerzo de rotura se presenta una diferencia muy pronunciada, estando el del metal soldado muy por debajo al del metal base (Tabla 9). Esto puede deberse a que la región en donde fallaron las probetas soldadas al estar en una zona aledaña al cordón de soldadura posiblemente sufrió cambios microestructurales debido al recocido que puede haber provocado ablandamiento en el metal base, lo que se traduce en un aumento de la deformación previa a la falla de este (Vanegas & Suarez, 2015).

**Tabla 9.** Esfuerzos representativos del metal base y material soldado.

	Metal base		Metal soldado	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Carga máxima (KN)	64,5	62,5	94,24	92,98
Esfuerzo máximo (MPa)	541,83	525,03	543	528
Carga de rotura (KN)	46,5	46	46,26	46,46
Esfuerzo de rotura (MPa)	390,63	386,42	267	264

**Fuente:** (Vanegas & Suarez, 2015)

Los autores realizaron barridos de dureza, los cuales se muestran en la figura 23, se puede observar que se presentan ciertos incrementos leves de dureza en las regiones que corresponden a las zonas afectadas térmicamente de las láminas soldadas, el máximo valor se registra a 5 milímetros del centro de la probeta soldada en la parte izquierda (Vanegas & Suarez, 2015).



**Figura 22.** Barrido de dureza de la junta soldada completa.

**Fuente:** (Vanegas & Suarez, 2015)

Las regiones en donde se produjo el aumento de dureza son aquellas en las que la velocidad de enfriamiento es mayor, lo que permitió que se produzcan microestructuras de tipo acicular en las cuales no hay difusión y por tal razón quedan esfuerzos retenidos. Por su parte Oyyaravelu (2018) realizó un estudio comparativo de las propiedades mecánicas y microestructura de placas acero ASTM A516 de 4 mm de espesor empleando técnicas de soldadura híbridas láser y un método láser-GMAW. En la tabla 10 se muestra la combinación de parámetros utilizada y se realizaron ensayos de tracción a la unión soldada por láser-GMAW, soldadura láser y al material base, la resistencia a la tracción y el límite elástico fueron 571 MPa, 356MPa, 583 MPa, 351MPa, 563 MPa y 341 MPa, respectivamente, que son ligeramente superiores (1,4%) que el metal base. La resistencia

a la tracción y el límite elástico de la unión por láser fue 3,43% y 2,85% mayor que el metal base. Entre las tres piezas soldadas, la unión fabricada mediante un proceso híbrido láser-GMA presentó la mayor resistencia (Oyyaravelu, 2018). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

**Tabla 10.** Parámetros de proceso utilizados para soldadura láser y láser-GMA-híbrido de acero SA516 grado 70.

<b>Parámetros</b>	<b>Láser</b>	<b>Láser híbrida</b>
Material de aporte	autógeno	ER70S-6 1.2 mm
Velocidad de alambre	-	70 mm/s
Gas de protección	Argón	Argón
Flujo de gas	15 lts/s	15 lts/s
Voltaje	-	18
Velocidad de soldadura	400 mm/s	1000 mm/s

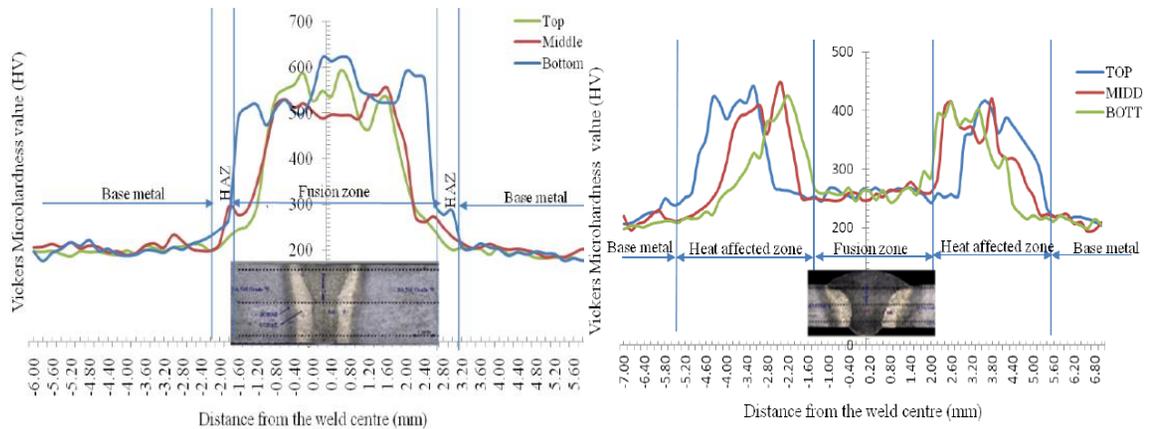
**Fuente:** (Oyyaravelu, 2018)

**Tabla 11.** Propiedades mecánicas de muestras soldadas con metal base, láser y láser-GMA-híbrido.

<b>Propiedades</b>	<b>Metal base</b>	<b>Laser</b>	<b>Laser-híbrida</b>
Límite de fluencia (MPa)	341	351	356
Esfuerzo último (MPa)	563	583	571
% elongación	30	23	11,43
Microdureza (HV)	Arriba	206	288
	Medio	202	280
	Abajo	198	273

**Fuente:** (Oyyaravelu, 2018)

El autor observó que las muestras de los ensayos de tracción fallaron en modo dúctil, de igual manera que la ZF es relativamente más fuerte que las demás regiones de la soldadura. Sin embargo, el alargamiento de la soldadura láser fue el doble que el de la soldadura láser híbrida, podría deberse al reducido porcentaje en peso de manganeso. Tanto el rendimiento como la resistencia máxima a la tracción del láser y de la soldadura láser híbrida con láser GMAW eran casi equivalentes al metal base (Oyyaravelu, 2018).



**Figura 23.** a) perfil de dureza soldadura láser, b) perfil de dureza soldadura híbrida láser-GMAW.

**Fuente:** adaptado de (Oyyaravelu, 2018)

Se tomaron perfiles de dureza en la parte superior, media e inferior para ambas soldaduras, como se muestra en las figuras 23(a) y (b). Se observó simetría para la soldadura por láser, la dureza promedio en la zona de fusión de la soldadura y la zona afectada por el calor fue de 491 HV y 411 HV, respectivamente. Este resultado afirmó que el aumento general de la dureza en la zona de fusión se debe a la aparición de la martensita. Además, el valor de dureza medido en la zona de fusión de la soldadura hecha con láser fue un 40% mayor que el de la soldadura híbrida láser-GMAW. La microdureza promedio para la soldadura híbrida láser-GMAW en la zona de fusión y la zona afectada por el calor fue de 249,4 HV y 345 HV, respectivamente. Según los resultados, la microdureza de la soldadura híbrida láser-GMA es 15% mayor que en el metal base. Los resultados revelaron que la dureza más baja (260 HV) en la zona de fusión se debe principalmente a la formación de ferrita acicular y a la reducción del porcentaje en peso de manganeso (Medida por EDS) que restringe el incremento de dureza.

Collantes y Sánchez (2019) realizaron un estudio del comportamiento de juntas soldadas de acero ASTM A572 G50 de 3 mm de espesor, mediante el proceso GMAW, considerando las variables que influyen en el proceso, a saber, abertura de raíz, progresión, voltaje, amperaje, velocidad de alimentación, velocidad de avance y gas de protección.

**Tabla 12.** Parámetros variados del proceso de soldadura

Muestra	Abertura de raíz (mm)	Progresión	Voltaje (v)	Amperaje (A)	Vel de alambre (in/min)	Vel de soldadura (in/min)	Calor aportado (kJ/mm)
1A 3	3	Ascend.	15,5	90	100	55,02	1,52
2D3	3	Descend.	19	110	120	177,08	0,71
3D2	2	Descend.	15	139	190	224,67	0,56
4DTC	0	Descend.	15	140	190	150	0,84
5A 2	2	Ascend.	14,6	100	100	47,57	1,84
6M3	3	Descend.	15,3	124	140	171,14	0,67
7MA3	3	Ascend.	14	98	125	49,76	1,65

**Fuente:** Adaptado de (Collantes & Sánchez, 2019)

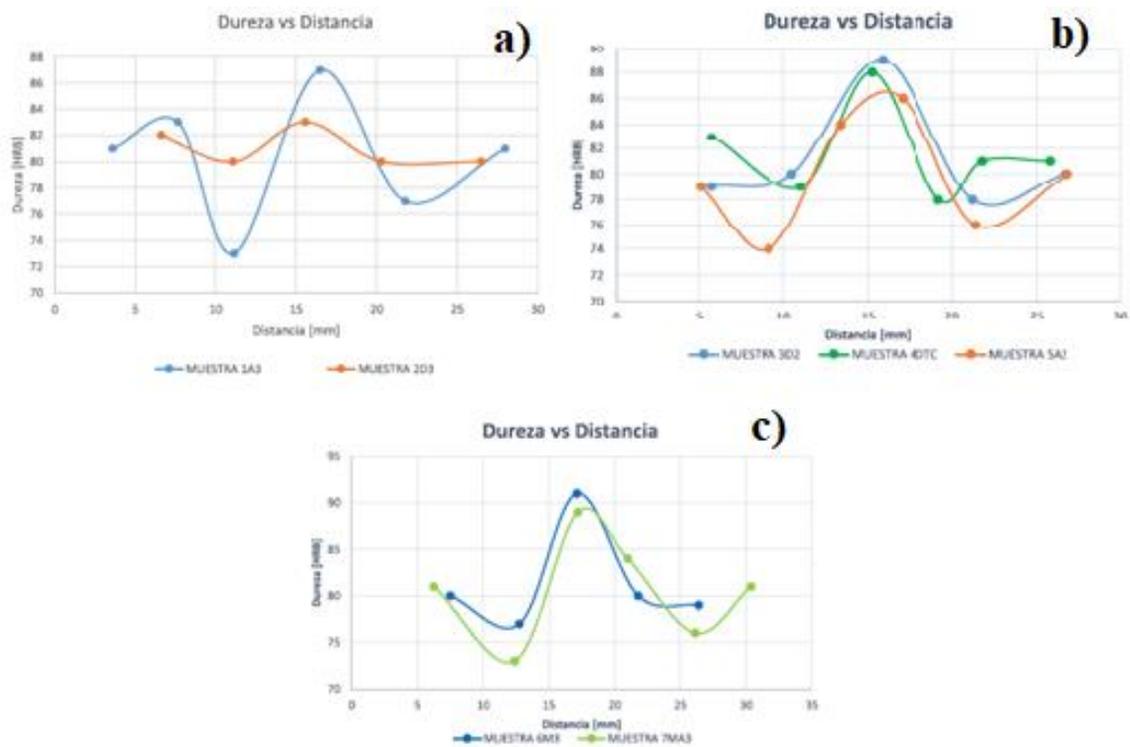
La resistencia a la tracción de las probetas 1A3, 2D3, 5A2, 6M3 y 7MA3 superaron el valor mínimo de tracción del metal base 450 [MPa], fueron aprobadas por el requerimiento de la AWS D1.1 para este ensayo.

**Tabla 13.** Resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las probetas.

Muestra	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción promedio (MPa)	Obs.	% elongación en 50 mm	Calificación según AWS D1.1
T1-1 A	28659	461,9	ZAT	16,8	Aceptada
T2-1 A	27221		FJS	13,9	Aceptada
T1-2D	29309	470,9	FJS	14,2	Aceptada
T2-2D	28863		FJS	12,8	Aceptada
T1-3D	16265	283,6	ZAT	4,3	Rechazada
T2-3D	18841		ZAT	4,3	Rechazada
T1-4DTC	24878	425,9	FJS	6,7	Rechazada
T2-ADTC	26543		ZAT	13,2	Rechazada
T1-5 A	26854	465,7	ZAT	15,0	Aceptada
T2-5 A	28953		ZAT	17,2	Aceptada
T1-6M	28632	470	FJS	17,8	Aceptada
T2-6M	29720		FMB	26,7	Aceptada
T1-7MA	28397	455,7	FJS	14,2	Aceptada
T2-7MA	28426		FMB	19,4	Aceptada

**Fuente:** (Collantes & Sánchez, 2019)

Las muestras T1-1A, T1-3D, T2-3D, T2-4DTC, T1-5A y T2-5A presentaron falla en la ZAT, mientras que T2-1A, T1-2D, T2-2D, T1-4DTC, T1-6M y T1-7MA presentaron falla en la junta soldada (FJS). Por su parte, T2-6M y T2-7MA presentaron falla en el material base (FMB). Además, los autores llevaron a cabo barridos de dureza. En la escala Rockwell B. Todas las muestras presentaron mayor valor en la zona del cordón, seguido por el material base y finalmente por la zona afectada por el calor, como se presentan en las Figuras 25 (a, b y c).



**Figura 24.** Resultados de dureza en las probetas a) 1A3 y 2D3, b) 3D2, 4DCT, 5A2, c) 6M3 y 7MA3.

**Fuente:** adaptado de (Collantes & Sánchez, 2019)

Vieira, Al-Rubaie, Preti, Richter y Delijaicov (2019) compararon las propiedades mecánicas en muestras de acero ASTM A572 G50 de una pulgada de espesor, soldadas por el proceso de arco sumergido (SAW) con un alambre EM 12K de  $\varnothing$  3,97 mm,

sometidas a un tratamiento térmico de alivio de tensión (PWHT) y en la condición como soldado (SST), siguiendo los requisitos reglamentarios de AWS D1.1-2015. El pase de raíz de la junta fue realizado con el proceso GMAW con un alambre macizo de Ø1.2 mm. Los parámetros de los dos procesos de unión se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14.** Parámetros del proceso de unión de las placas.

Proceso	Voltaje (v)	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (cm/min)	Temp máx entre pases (°C)
GMAW	31,9	300	20,6	-
SAW	30-32,1	500-600	35-55	250

**Fuente:** (Vieira , Al-Rubaie , Preti , Richter , & Delijaicov, 2019)

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción (Tabla 15) para las condiciones SST y PWHT fueron aceptables y verificadas en el estudio. A pesar de la ruptura de las muestras de SST en la soldadura (Figura 26), esta condición mostró resultados de límite de resistencia y de fluencia por encima del mínimo especificado por la norma para el acero ASTM A572 Grado 50.

**Tabla 15.** Propiedades mecánicas de las muestras.

Condición	Propiedades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
SST	LR (MPa)	558,8	562	558,8	564,1
	LE (MPa)	394,8	391,4	400,3	406,9
	A (%)	21,3	20,7	21,6	21,8
PWHT	LR (MPa)	522	523	525,4	525,4
	LE (MPa)	354,6	362,5	354,8	354,8
	A (%)	26,2	26,3	27,3	27,3

SST: sin tratamiento térmico, PWHT: post Weld heat treatment, LR: Limite de resistencia, LE: Limite de fluencia, A: elongación

**Fuente:** (Vieira , Al-Rubaie , Preti , Richter , & Delijaicov, 2019)



**Figura 25.** Muestras luego del ensayo de tracción, a) muestras sin tratamiento (SST), b) muestras con tratamiento (PWHT).

**Fuente:** (Vieira , Al-Rubaie , Preti , Richter , & Delijaicov, 2019)

En las mediciones de microdureza Vickers, fue posible observar que la condición PWHT mostró resultados 10 a 20% más bajos que la condición SST, reforzando así la idea que la reducción en el límite de resistencia acompañó a la reducción en la dureza. La condición sin tratamiento presentó endurecimiento en la ZAT, seguido por el metal de aporte, validando así los resultados obtenidos por Acuña, 2019, quien encontró esta misma tendencia en este acero con el proceso SAW (Acuña, 2019).

Yan y otros (2013) investigaron los efectos de los parámetros de soldadura sobre la apariencia del cordón de soldadura y las propiedades mecánicas en la soldadura por arco sumergido en tándem de dos alambres (SAW-T) de placas de acero ARBA de 20 mm de espesor. Las placas de acero se soldaron usando diferentes combinaciones de corriente de soldadura, voltaje, espacio entre alambres y velocidad de soldadura, dichos parámetros son mostrados en la tabla 16.

Luego de realizar ensayos de tracción a las muestras, los autores infirieron que el aumento en la velocidad de soldadura resultó en una mejora notable en el límite elástico, en la resistencia máxima a la tracción y el alargamiento (Yan, y otros, 2013).

**Tabla 16.** Parámetros de soldadura adoptados en la investigación experimental

No.	Corriente (A) alambre		Voltaje (v) alambre		Vel. de soldadura (mm/min)	Espacio entre alambres (mm)
	guía	trasero	guía	trasero		
1	615	480	34	40	3,5	50
2	615	480	34	40	5,5	50
3	600	500	33	40	3,5	55
4	600	500	33	35	3,5	55
5	600	500	33	45	2,5	55
6	600	500	33	45	3,0	55
7	600	550	35	40	3,0	80
8	600	500	35	35	3,0	80
9	600	500	35	40	4,0	80

**Fuente:** (Yan, y otros, 2013)

**Tabla 17.** Composición química material base y material de aporte; propiedades de mecánicas del cordón de soldadura

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
MB	0,20	0,55	1,0	0,04	0,04	<0,030	<0,25	<0,30
Aporte	<0,10	<0,07	0,8-1,1	<0,03	<0,03	<0,020	<0,020	<0,30

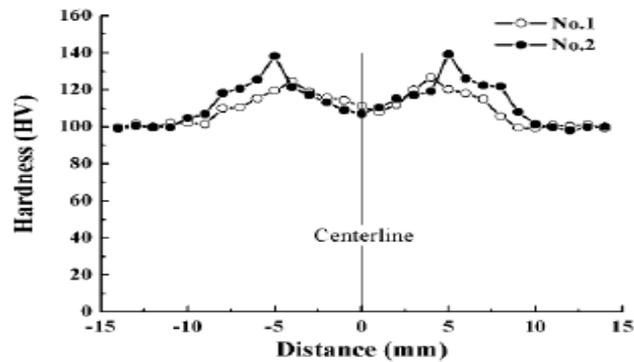
  

Muestra	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Elongación (%)
1	352	496	11,25
2	362	519	12,87
7	343	483	9,82
8	350	489	10,49

**Fuente:** tomado y adaptado de (Yan, y otros, 2013)

También determinaron que el aumento de la entrada de calor del alambre guía o el alambre trasero da como resultado el deterioro del límite elástico, la resistencia a la tracción máxima y el alargamiento. Lo anterior se debe a que un mayor aporte de calor inhibe la formación de fases como la ferrita acicular y la bainita y provoca una disminución de las propiedades mecánicas. Los valores de dureza Vickers en la ZAT de las uniones soldadas para las muestras N ° 1 y N ° 2 se presentan en la figura 26. La dureza como soldada cerca de la línea de fusión es alta, más lejos de la línea central de la soldadura, la dureza cae

rápidamente a la del metal base. Ambas soldaduras exhiben baja dureza debido a su estructura ferrítica, en comparación con las ZAT. La muestra No 2 tenía la dureza más alta en comparación con la muestra No 1. Se encuentra que a medida que aumenta la velocidad de soldadura, el aumento de la velocidad de enfriamiento reduce la fracción de ferrita de Widmanstätten y ferrita alotrópica que son de dureza relativamente baja en la microestructura del metal de soldadura (Yan, y otros, 2013).



**Figura 26.** Perfil de microdureza en las soldaduras

**Fuente:** (Yan, y otros, 2013)

En 2015, Izurieta estudió las juntas soldadas a tope de placas de 12 y 20 mm posterior a los procesos de corte térmico (corte por plasma y arc air) en el acero ASTM A588 y su incidencia en las propiedades mecánicas, las juntas se soldaron con el proceso FCAW con gas protector CO<sub>2</sub>, los parámetros del proceso se muestran en la tabla 18.

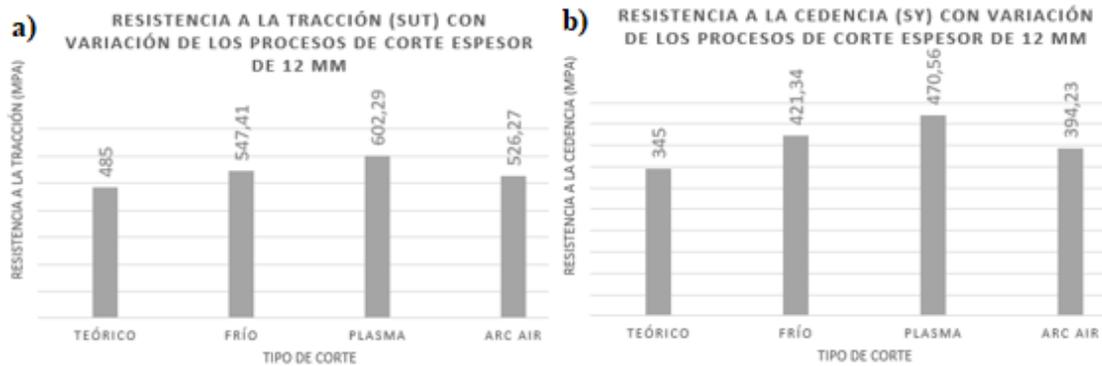
**Tabla 18.** Parámetros de soldadura

<b>FCAW</b>	<b>Corriente (A)</b>	125	<b>Voltaje (v)</b>	28	<b>Vel. Alambre (in/min)</b>	170
-------------	----------------------	-----	--------------------	----	------------------------------	-----

**Fuente:** (Izurieta, 2015)

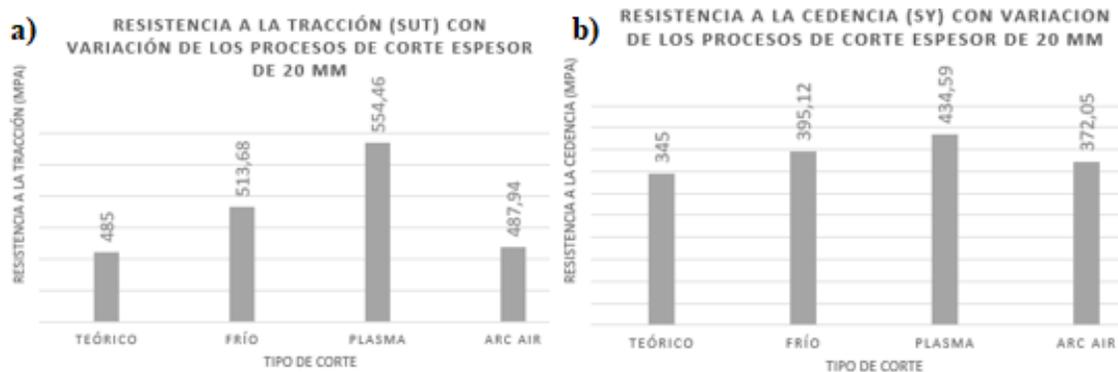
Los resultados obtenidos con variación de los procesos de cortes térmicos y también en el espesor del acero ASTM A588, se compararon con resultados en probetas cuyas juntas

fueron soldadas posteriores al corte en frío. Los resultados de los ensayos de tracción para los espesores de 12 mm y 20 mm se muestran en las figuras 27 y 28.



**Figura 27.** Resultados placas de 12 mm a) Tracción (Sut), b) Cedencia (Sy).

**Fuente:** Adaptado de (Izurieta, 2015)



**Figura 28.** Resultados placas de 20 mm a) Tracción (Sut), b) Cedencia (Sy).

**Fuente:** Adaptado de (Izurieta, 2015)

Al comparar los procesos de corte térmico, el proceso de corte por plasma es el que menor zona afectada por el calor produce; por el contrario, el proceso por Arcair produce una ZAT mucho mayor, así mismo los resultados de tracción de las juntas soldadas posterior al corte por plasma en las placas de ambos espesores fueron mayores que en el corte por Arcair y por corte en frío.

Por su parte Šebestová, Horník, Mrňa, & Doležal (2018) realizaron un estudio sobre el efecto de la corriente eléctrica del arco sobre la velocidad de enfriamiento de la soldadura

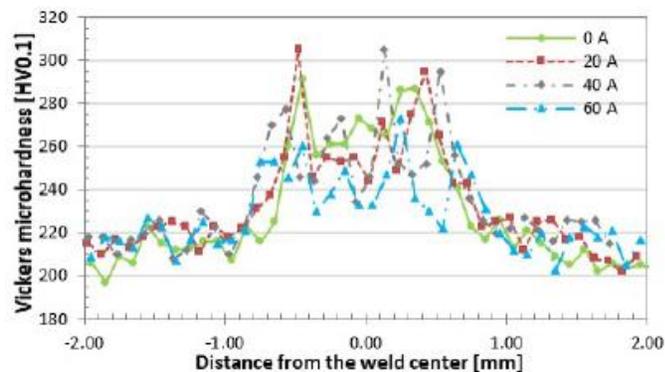
en el proceso de soldadura láser acompañada de soldadura con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (TIG) para uniones a tope de acero S460MC de 3 mm de espesor.

**Tabla 19.** Propiedades mecánicas de acero S460MC

Acero	Límite de fluencia (MPa)	Esfuerzo a tensión (MPa)	Elongación (%)
S460MC	>460	520-670	>14

**Fuente:** (Šebestová, Horník, Mrňa, & Doležal, 2018)

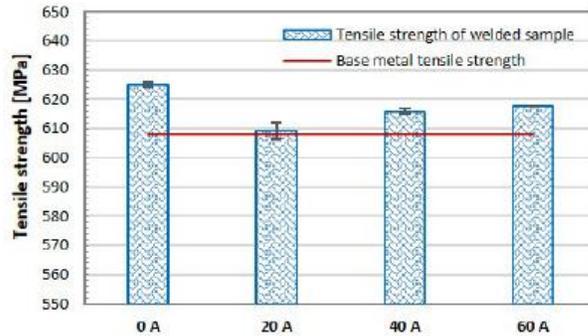
Todas las juntas se soldaron a tope con el proceso Láser-TIG, con una potencia laser constante de 1,5 kW y una velocidad de 20 mm/s, donde se aplicó argón como gas protector coaxialmente tanto al laser como al electrodo de GTAW. La variable modificada fue la corriente eléctrica, de la siguiente manera: 0 A, 20 A, 40 A, 60 A, respectivamente. Siendo la corriente de 0 A la soldadura laser y los valores más altos la soldadura hibrida precalentando el metal base. Tanto las soldaduras láser como Láser-TIG presentan una microdureza elevada desde el metal base hasta la línea de fusión (Figura 29). La línea de fusión y la ZAT GF estrecho alcanzaron valores máximos de microdureza. La adición de TIG al proceso de soldadura por láser redujo la dureza en el metal fundido y aumentó la microdureza en la ZAT GG.



**Figura 29.** Microdureza Vickers de las soldaduras S460MC LasTIG.

**Fuente:** (Šebestová, Horník, Mrňa, & Doležal, 2018)

Todas las muestras de tracción fallaron por el material base. En la siguiente figura se presentan los resultados obtenidos de las probetas ensayadas para cada aporte de calor. Se observaron cambios de menos del 3% con respecto al metal base.



**Figura 30.** Resistencia a la tracción de las soldaduras S460MC Láser-TIG.

**Fuente:** (Šebestová, Horník, Mrňa, & Doležal, 2018)

La resistencia a la tracción no se afectó notablemente por los procesos de soldadura laser ni Láser-TIG. Se observó un efecto positivo del precalentamiento sobre la microdureza ZAT-GG. Sin embargo, observó que la microestructura de la ZAT-GG no es crucial para las propiedades de resistencia en la soldadura de este acero.

Pamnani, Karthik, Jayakumar, Vasudevan y Sakhivel (2016) evaluaron las propiedades mecánicas de juntas soldadas por los procesos SMAW, SAW, F-CAW y A-GTAW (Soldadura de electrodo de tungsteno con gas activo) (parámetros en la tabla 20) en placas de acero DMR-249A de 10mm de espesor, estas mediciones se hicieron mediante el proceso de indentación automatizada de bola (ABI).

**Tabla 20.** Parámetros de soldadura para juntas soldadas.

Proceso	Corriente (A)	Voltaje (v)	Velocidad (mm/s)	# de pases	Aporte de calor primer pase (kJ/mm)	Aporte de calor último pase (kJ/mm)
SMAW	120	25	1,5	5	10	2
SAW	485	30	7,5	4	7,76	1,94

FCAW	155	25	3,33	6	7,0	1,16
A-GTAW	270	20	1	2	10,8	5,4

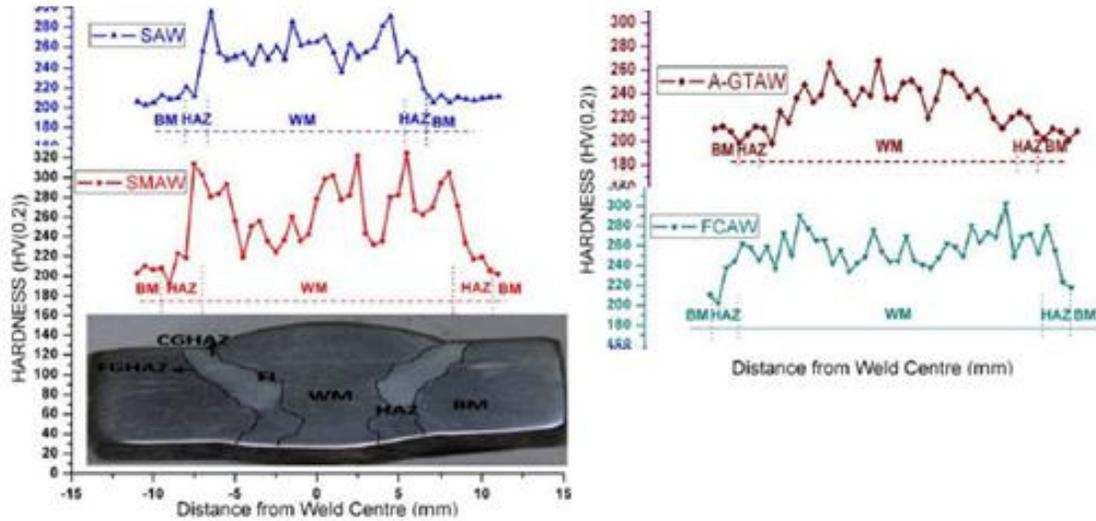
**Fuente:** (Pamnani, Karthik, Jayakumar, Vasudevan, & Sakthivel, 2016)

Los valores de microdureza fueron medidos a través de la junta soldada a 2 mm por debajo de la superficie y se muestran en la figura 31. Los autores observaron similitudes en los perfiles de dureza de todas las juntas soldadas. La dureza del cordón fue más alta que la del metal base. Los valores de dureza se incrementan gradualmente al acercarse desde el material base a la ZAT y se observó una pequeña disminución en el valor de dureza cerca de la zona de fusión seguida de valores de dureza más altos en el metal de soldadura.

**Tabla 21.** Valores UTS e YS en metal base, ZAT y metal de soldadura

Zona	Prop	SMAW	SAW	FCAW	A-GTAW
BM	YS	412	414	416	410
	UTS	574	576	570	572
ZAT	YS	511	428	438	496
	UTS	744	632	668	685
ZF	YS	475	496	491	533
	UTS	673	714	680	753

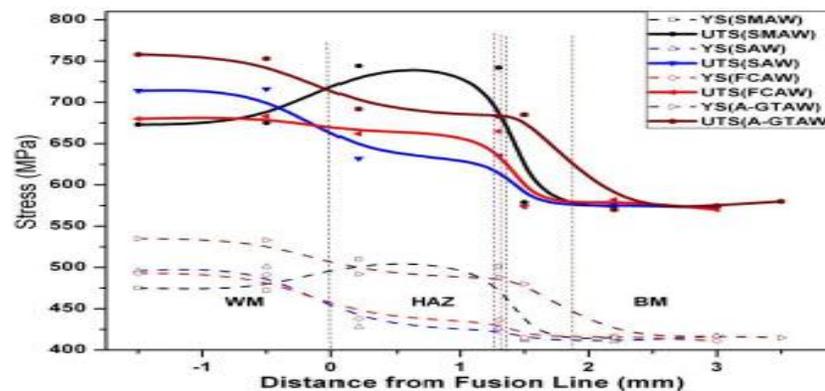
**Fuente:** Adaptado de (Pamnani, Karthik, Jayakumar, Vasudevan, & Sakthivel, 2016)



**Figura 31.** Microdureza en las uniones soldadas SMAW, SAW, FCAW y A-GTAW

**Fuente:** Adaptado de (Pamnani, Karthik, Jayakumar, Vasudevan, & Sakthivel, 2016).

Se comprobó que la resistencia a tensión de las juntas disminuyó gradualmente del metal de soldadura al metal base en SAW, FCAW, SMAW y A-GTAW. El metal de soldadura en la junta A-GTAW exhibió mayor límite elástico, seguido de SAW, FCAW y SMAW, respectivamente. La ZAT de la junta SMAW mostró un límite elástico más alto seguido de A-GTAW, FCAW y SAW, respectivamente (Figura 32). En todas las uniones soldadas por arco, el límite elástico y resistencia máxima siguieron un patrón similar.



**Figura 32.** Valores de límite elástico y resistencia máxima de la junta para los procesos.

**Fuente:** (Pamnani, Karthik, Jayakumar, Vasudevan, & Sakthivel, 2016)

Los autores pudieron observar la variación en las propiedades mecánicas a lo largo de las juntas soldadas desde el metal fundido hasta el material base y con base en la evaluación de las propiedades mecánicas en las uniones, recomendaron el uso de FCAW y SAW por proporcionar suficiente resistencia y la menor variación en las propiedades mecánicas en las uniones.

Chávez (2018) elaboró un procedimiento de soldadura en juntas de acero ASTM A572 G50 de 25 mm de espesor mediante el proceso GMAW seleccionando parámetros para garantizar prestaciones óptimas en las juntas soldadas. La soldadura se llevó a cabo con un electrodo ER70S-6 de 1,2 mm de espesor con una velocidad de alimentación de 80 cm/min, amperaje de 140 A, voltaje de 17 V, gas protector 80% Ar-CO<sub>2</sub> y velocidad de soldadura de 9 cm/min. Los resultados de tensión obtenidos (Tabla 22) muestran que los parámetros utilizados no alteran las propiedades de tracción del material, aun cuando la muestra 1 falló por la soldadura, su valor de tensión es mayor que el material base. De igual forma la muestra 2 falló por el material base con un valor de rotura mayor al esfuerzo mínimo de este. Ambas probetas mostraron ductilidad antes de la fractura, lo que indicó que el proceso de soldadura no afecta de manera significativa las propiedades mecánicas del acero.

**Tabla 22.** Resultados del ensayo de tensión

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Fuerza de rotura (Kg)	Esfuerzo máximo (MPa)	Observaciones
1	25,21	19,28	28305	571	Fractura soldadura
2	25,41	19,06	27600	559	Fractura en MB

**Fuente:** (Chávez , 2018)

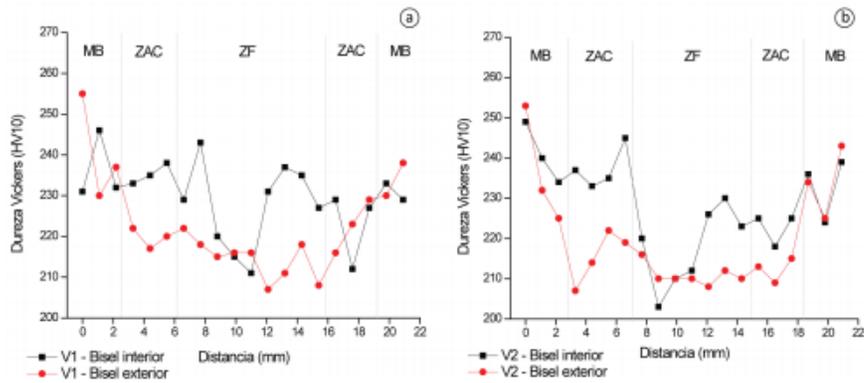
Costa, Reyes, Saldaña, González, & Delgado (2015) estudiaron el impacto de los parámetros de soldadura por arco sumergido (SAW) en la resistencia mecánica y dureza de la ZAT de un acero API 5L X70. Las variables de entrada fueron corriente, voltaje y velocidad de avance, buscando optimizar los parámetros del proceso de forma que se pudiera obtener uniones soldadas con resistencia a la tensión y dureza de la ZAT adecuadas. Los autores llevaron a cabo un diseño central compuesto que totalizó 17 pruebas. Obtuvieron 16 combinaciones de parámetros con la optimización, luego escogieron una para validar los modelos. Para seleccionar los parámetros de validación fijaron que la velocidad de avance de la soldadura fuera igual para los dos biseles. Luego eligieron los parámetros que tuvieran menor corriente y voltaje.

**Tabla 23.** Resultados de resistencia a la tensión para los cupones de validación

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga máxima (Kgf)	Esfuerzo máximo (MPa)	Zona de fractura
X70-V1	12,25	18,94	16980	718	Soldadura
X70-V2	12,37	19,00	17320	723	Soldadura

**Fuente:** (Costa, Reyes, Saldaña, González, & Delgado, 2015)

Los cupones con los parámetros de validación indicaron que la dureza en la soldadura (ZAT y ZF) fue menor que la del material base. Los resultados mostrados en la tabla 23 indicaron que el modelo fue satisfactorio ya que, con excepción del cupón X70-V1 en la línea I (bisel exterior), los resultados están dentro del intervalo de confianza calculado para la respuesta predicha. Los autores concluyeron que el proceso SAW en el acero API 5L X70 de 12.7 mm de espesor puede ser optimizada con los parámetros: 620A, 29V y 33 IPM (bisel interior); 735A, 34V y 33 IPM (bisel exterior). La combinación de esos parámetros resultó en propiedades mecánicas óptimas en las juntas.



**Figura 33.** Perfiles de durezas para validación de los modelos. (a) Cupón X70-V1; (b) Cupón X70-V2

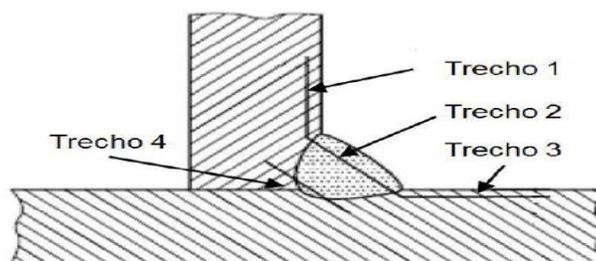
**Fuente:** adaptado de (Costa, Reyes, Saldaña, González, & Delgado, 2015).

Escalet Rossini (2018) realizó un estudio para optimizar el proceso de soldadura GMAW robotizado en tándem en acero ASTM A572 G50, en el estudio se soldó una junta de 15 mm en T (figura 34) con un electrodo ER70S-6 y tres condiciones diferentes (Tabla 24).

**Tabla 24.** Parámetros utilizados en las condiciones 1, 2 y 3

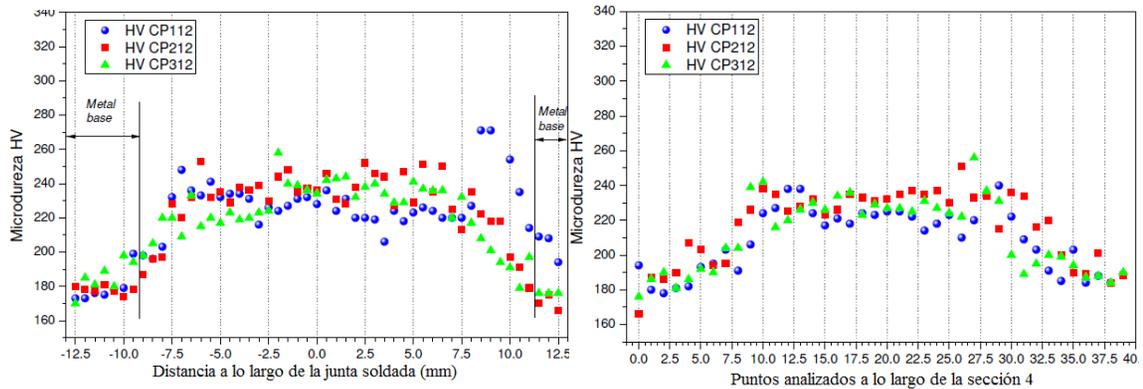
Condición	Trasnferencia	Velocidad (mm/min)	Ángulo (°)	Corriente (A)	Voltaje (v)	Calor (kJ/mm)
1	Pulsado	460	0	301	26	1,02
	Pulsado			256	29	0,97
2	Continuo	570	0	427	32	1,44
	Pulsado			294	29	0,90
3	Continuo	570	10	418	32	1,41
	Pulsado			295	29,6	0,92

**Fuente:** (Scalet Rossini, 2018)



**Figura 34.** Tramos para medidas de microdureza de uniones en condiciones 1, 2 y 3.

**Fuente:** (Scalet Rossini, 2018)



**Figura 35.** Evolución de la microdureza Vickers asociada con las secciones monitoreadas a) 1, 2, 3 y b) 4. Para las tres condiciones de soldadura en tándem del acero ASTM A572 G50 con ER70S-6

**Fuente:** (Scalet Rossini, 2018)

Se concluyó que la condición 2 es la mejor, permitiendo una velocidad de soldadura 19,3% mayor sin efectos adversos, además con esta condición se consiguieron valores de dureza entre 20-30% más bajos en la ZAT que los encontrados en la condición 1, como se muestra en la figura 35. Esto se asocia a un mejor equilibrio microestructural en la ZAT para la condición de soldadura 2, la cual produjo en la zona de grano grueso de ferrita acicular, ferrita poligonal y perlita. Los cambios más moderados en la dureza también se refleja en un comportamiento de la ductilidad más uniforme del material en la zona de la soldadura (Scalet Rossini, 2018).

De acuerdo con la información analizada anteriormente se logró determinar que el efecto de los parámetros de soldadura sobre las propiedades mecánicas de las juntas de aceros ARBA está relacionado con los cambios que los parámetros generan sobre la entrada de calor y la velocidad de enfriamiento experimentados durante el proceso. Cabe resaltar que cada proceso presenta diferentes parámetros que se pueden alterar para lograr juntas de buena calidad sin alterar de manera adversa las propiedades mecánicas.

Los procesos estudiados en juntas de aceros ARBA evidenciaron que con las combinaciones de parámetros adecuadas las juntas aumentaban la resistencia a tracción y su dureza. Cuando se realizan soldaduras con enfriamientos drásticos o velocidades de soldadura altas la resistencia a la tracción y alta dureza. Resultando perjudicial para las juntas al aplicar las cargas de trabajo, por el riesgo de fisuras por esfuerzos residuales. En algunos casos los precalentamientos y tratamientos térmicos resultaron beneficiosos, disminuyendo cambios bruscos de dureza y manteniendo alta resistencia a tracción.

La mayoría de los resultados encontrados mostraron que las juntas estudiadas se endurecen, exhibiendo los valores de dureza más altos en la ZAT; por otra parte Collantes & Sánchez (2019) encontraron que la ZAT se ablandó y el metal de aporte se endureció conservando (en la mayoría de sus condiciones) las propiedades mecánicas de las juntas; así mismo, Costa, Reyes, Saldaña, Gonzales y Delgado (2015) encontraron una reducción en la dureza de las juntas con respecto al material base, debido a las condiciones del proceso de soldadura, que causan un efecto de recocido en el material. En cuanto a la resistencia a la tracción, las juntas fallaron con un valor de esfuerzo mayor en comparación al material base.

Los estudios enfocados en ASTM A572 mostraron que este puede ser soldado con múltiples procesos si se utilizan parámetros adecuados, obteniendo resultados óptimos en cuanto a las propiedades mecánicas; siendo necesaria, en algunos casos la implementación de tratamientos térmicos post-soldadura para mejorar su desempeño en las condiciones de carga.

### **3.3 Correlación entre los cambios de las propiedades y la microestructura como indicador de la soldabilidad de aceros ARBA con procesos de soldadura al arco**

Sánchez & Rincón (2017) analizaron en un estudio, la soldabilidad del acero ASTM A572 grado 50 utilizando el proceso FCAW-S en comparación con el proceso SMAW según el código de soldadura AWS D 1.1 2010. En el análisis metalográfico de las juntas soldadas se identificaron dos tipos de microestructura en la ZAT las cuales fueron ferrita y perlita; en el cordón de soldadura se observó ferrita con perlita con granos previos austeníticos. Con los resultados obtenidos se concluyó que este acero se puede soldar de manera óptima mediante el proceso FCAW-S sin alterar las propiedades mecánicas, ni la microestructura significativamente. Comparando los datos de dureza de ambos procesos, se estableció que el proceso FCAW-S endureció el material aumentando su resistencia a tracción y así aumentando su fragilidad, por el contrario con el proceso SMAW el material base no sufre un cambio de dureza significativa lo que indica que sus propiedades mecánicas no son fuertemente afectadas (Sánchez & Rincón, 2017).

Por su parte Calderón (2018), estudió la soldabilidad de tres aceros comunes utilizados en la construcción de estructuras soldadas, ASTM A36, A572 Grado 50 y ASTM A588 Grado A con el proceso FCAW bajo las mismas condiciones para cada uno de los tres aceros, basándose en la norma AWS B-4.0M-2000. Los tres aceros demostraron tener buenas características de soldabilidad, no presentaron muchas variaciones en la microestructura y se obtuvieron propiedades mecánicas similares o superiores a las de sus respectivos materiales base. El acero ASTM A36 exhibió la peor soldabilidad entre los tres estudiados, presentando discontinuidades, porosidades y falta de penetración en algunas de las muestras, se le atribuye la falta de penetración en una de las juntas de ASTM A36 a la falta de precalentamiento. Seguido por el ASTM A588 Grado A, que mostró una buena soldabilidad, sin porosidades, discontinuidades ni falta de penetración. Los autores

concluyeron que el acero de mejor soldabilidad con el proceso FCAW bajo las mismas condiciones y parámetros de proceso fue el ASTM A572 G50. Las porosidades encontradas en los cordones son propias del proceso FCAW y aprobadas por la norma, aunque el factor humano también influye sobre las características del cordón (Calderón, 2014).

Barrera, Giraldo, & González (2015), realizaron un estudio de la soldabilidad del acero ASTM A572 G50 comparando los procesos GMAW y SMAW, variando la posición de soldadura, utilizando los parámetros encontrados en la norma AWS D 1.1-2010. La soldadura se llevó a cabo en dos pases uno de raíz y uno de presentación en ambos casos. Se encontró que la soldadura GMAW cumple con las con los requisitos establecidos por la norma, mientras que los valores de dureza encontrados en la junta soldada con GMAW muestran poca variación entre la dureza del material base, ZAT y el cordón, evidenciando compatibilidad mecánica y metalúrgica. Como no se hallaron concentradores de esfuerzo por cambios bruscos de dureza, también se evidenció una ZAT reducida y poca variación en las microestructura de las zonas de soldadura. Por otra parte la junta soldada con SMAW muestra cambios en la dureza de las zonas de soldadura, la junta con este proceso también mostró una ZAT más grande que en el caso de GMAW y mayor variación en la microestructura y tamaño de grano de las zonas de soldadura (Barrera, Giraldo, & González, 2015).

Por otro lado, Hernández (2018) estudió la soldabilidad en un acero ASTM A572 G50 mediante el proceso SMAW variando el tipo de bisel (V sencilla, V doble, U, J y en escuadra) en platinas de ½ pulgada con electrodos E6010 (70-115 A y 20-25 V) y E7018 (100-145 A y 20-25 V), siguiendo las especificaciones establecidas en el código

estructural AWS D1.1. El autor evaluó la soldabilidad de manera cuantitativa, mediante los resultados del ensayo de tracción, dureza y metalografías. El ensayo de tracción en la probeta con bisel en U presentó ruptura en la ZAT, con fractura frágil, disminución del 22,2% de la carga máxima del material base. La ruptura en la muestra con bisel en V se presentó en la zona de la soldadura, muy cerca del bisel, y presentó fractura dúctil, resistiendo una carga 27,7% menor en relación con el material base. Para la muestra con bisel en J el fallo se presentó en el bisel de soldadura, presentando una fractura frágil, soportando una carga 43,4 % menor con relación al material base. Para la muestra con bisel en doble V la fractura fue de tipo dúctil y en el metal base, soportando una carga máxima de 116,8 kN, siendo el de mejor resultado de tracción, la junta con bisel en doble V también se endureció por la mayor entrada de calor, viéndose reflejado en el aumento de la resistencia a tracción y fragilidad. Los autores concluyeron que además de la resistencia mecánica y alargamiento, es muy importante evitar la presencia de fases frágiles de baja ductilidad, dado que estas ejercen una fuerte influencia sobre la formación de fisuras que podrían ser el origen de fracturas en condiciones de operación (Hernández, 2018).

Brondani (2016) estudió la influencia del precalentamiento en la soldadura de placas de acero ASTM A572 G50 de gran espesor, donde analizó el efecto del precalentamiento en la resistencia mecánica y la ductilidad. Las soldaduras se realizaron con el proceso GMAW con gas activo sobre placas de 63 mm de espesor con un aporte de calor promedio de 1,6 kJ/mm. Se soldaron las placas, una con un precalentamiento de 65°C y otra a temperatura ambiente. Los resultados arrojados por los ensayos de tracción, dureza y micrografía mostraron que las propiedades de las juntas cumplen con los criterios de

aceptación del código AWS D1.1 2010, sin mostrar variaciones importantes entre la junta con y sin precalentamiento, lo que implica que este precalentamiento no tiene gran importancia en la soldabilidad de juntas de gran espesor de acero ASTM A 572 G50 (Brondani, 2016).

El análisis global de esta sección evidencia que los cambios en la microestructura y las propiedades mecánicas de diferentes aceros ARBA soldados con procesos al arco están directamente relacionados. Como es sabido, las propiedades mecánicas dependen de la microestructura y a su vez, la microestructura final depende, fundamentalmente de la interacción del ciclo térmico generado por el arco, debido a las temperaturas pico alcanzadas, cambios en las velocidades de calentamiento y enfriamiento, composición química del material, entrada de calor y otros factores que son dependientes de cada proceso de soldadura.

En general, la entrada de calor, temperaturas pico y las velocidades de enfriamiento determinan el tipo de microestructura final en la junta. Dado que, entradas de calor más altas producen tasas de enfriamiento más bajas lo cual genera microestructuras de grano grueso en el metal de soldadura. Por el contrario, una entrada de calor más baja produce tasas de enfriamiento más rápidas, lo que resulta en microestructura fina. Si bien, una entrada de calor más baja puede producir granos finos en comparación con la de más alta entrada de calor, el proceso de soldadura y las condiciones de precalentamiento juega un papel importante en la refinación de la microestructura del metal de soldadura. Cabe resaltar que entradas de calor muy bajas o muy altas generan microestructuras no deseadas que terminan en propiedades mecánicas deficientes en la soldadura, bien sea por exceso de fragilidad o de ductilidad.

#### 4. CONCLUSIONES

- La microestructura de aceros ARBA sometidos a procesos de soldadura por arco se ve afectada por temperaturas pico, la entrada de calor y los cambios de temperatura experimentados, es decir la entrada de calor tiene un efecto sobre la microestructura final obtenida y su tamaño de grano, el cual depende de la velocidad de enfriamiento, que a su vez se ve afectada por diferentes factores como el precalentamiento, el espesor del material, los parámetros eléctricos y la abertura de raíz. De igual forma se encontró que tasas de enfriamiento altas pueden generar fases frágiles como la martensita.
- Las propiedades mecánicas de los aceros ARBA se ven afectadas por los procesos de soldadura al arco, los parámetros de soldadura tienen una importancia relevante en los efectos generados, la adecuada selección de estos determina si el efecto provocado es favorable o desfavorable. Las combinaciones de parámetros adecuadas mejoran la resistencia a tracción. Mostrando que al realizar las soldaduras exponiendo la junta a tasas de enfriamiento altas la resistencia a la tracción y la dureza aumentan drásticamente, resultando perjudicial.
- Teniendo en cuenta que los procesos de soldadura por arco generan diferentes efectos al emplearlos en aceros ARBA, se encontró que estos efectos están correlacionados, dado que, altas velocidades de enfriamiento se reflejan en mayor dureza y resistencia a la tracción. Análogamente, si la velocidad de enfriamiento disminuye, provoca una dureza y una resistencia a la tracción menor. También se evidenció que se deben escoger combinaciones de parámetros de soldadura que generen aportes de calor adecuados para propiciar la formación de fases de refuerzo y evitar fases frágiles.

## 5. BIBLIOGRAFÍA.

- Acuña, M. (2019). *Estudio de la influencia de la incorporación de arenas ferrosas como parte del fundente utilizado en el proceso de soldadura por arco sumergido sobre las propiedades mecánicas y microestructura de juntas soldadas de acero ASTM A572*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Alipooramirabad, H., Paradowska, A., Ghomashchi, R., & Reid, M. (2017). Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 70-81. doi:10.1016/j.jmapro.2017.04.030
- American Welding Society. (2010). *AWS D1.1-Código para Soldadura Estructural - Acero*. Miami, FL 33126: American Welding Society.
- Arias Rendón, M. I. (2013). *Levantamiento del mapa de modo de transferencia de metal para el electrodo ER100S1 aplicado con proceso de soldadura GMAW*. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Escuela de Mecánica y Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia.
- ASM International. (1990). *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Ohio: ASM International.
- Barrera, J. C., Giraldo, J. G., & González, M. A. (2015). *Estudio de la soldabilidad del acero estructural ASTM A572 grado 50 con proceso GMAW en junta en T, posición 3F progresión descendente, comparado con el proceso SMAW progresión ascendente*. Bogotá: Institución Universitaria Los Libertadores.

- Brondani, F. (2016). *Influência do preaquecimento na soldagem de chapas de grandes espessuras de aço ASTM A572*. Jaraguá Do Sul: Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De Santa Catarina.
- Calderón, J. (2014). *Estudio comparativo de la soldabilidad en aceros (ASTM A36, A572 G50 y A588) mediante el proceso FCAW*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Campos, J. C., & Jaramillo, L. E. (2019). *Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero ASTM A-572 tratadas termicamente*. Quito: Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Nacional.
- Castañeda , J. (2016). *Soldabilidad de aceros ASTM A572 G50 por el proceso GMAW-LSC, utilizando 100% CO2 como gas de proteccion en la aplicación de uniones de soldadura de filete en componentes para la industria pesada*. Saltillo: Corporación Mexicana De Investigación En Materiales.
- Chávez , F. (2018). *Elaboración y calificación de un procedimiento de soldadura GMAW para la fabricación de tubería forzada con material ASTM A572 G50. centrales hidroeléctricas Ángel I, II y III. Puno*. Callao, Perú: Universidad Nacional Del Callao.
- Collantes, S. E., & Sánchez, M. F. (2019). *Estudio del comportamiento de las juntas soldadas utilizando acero HSLA con el proceso gas metal arc welding (GMAW) en la fabricación de vehículos de transporte de pasajeros*. Quito, Ecuador: Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.
- Costa, P., Reyes, F., Saldaña, R., González, D., & Delgado, E. (2015). Optimización de los Parámetros de Soldadura por Arco Sumergido en Acero HSLA: una Aplicación para Manufactura de Tuberías de Conducción de Hidrocarburos. *Soldagem & Inspeção*, 4, 456-466. doi:10.1590/0104-9224/SI2004.12

- Dong, H., Hao, X., & Deng, D. (2014). Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint. *Metallography Microstructure and Analysis*, 3, 138-146. doi:10.1007/s13632-014-0130-z
- Gómez Mendoza, F. D. (2016). *Influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y micro-estructurales finales de la zona afectada por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos*. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional De Colombia.
- Gonzalez , R., Suárez, J., Vicario , F. J., & Muñoz, A. (2006). Procesos metalúrgicos de aceros microaleados de alta resistencia 450 EMZ tipo II en la zona afectada térmicamente debido al efecto multipasada en soldaduras por arco sumergido. *Revista Metalúrgica*, 256-269.
- Hernández, Y. (2018). *Estudio de la soldabilidad del acero estructural ASTM A572 G50 con proceso SMAW*. Tunja: Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia.
- Izurieta, A. (2015). *Estudio de las juntas soldadas a tope posterior a los procesos de corte termico en el acero ASTM A588 y su incidencia en las propiedades mecánicas*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Jorge, L., Cândido, V., Rios, A., Garcia, F., Pereira, A., Luz, F., & Monteiro, S. (2018). Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermally treated HSLA-80 steel. *Journal of materials research and technology*, 7(3), 598-605. doi:10.1016/j.jmrt.2018.08.007
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: PEARSON Educación.

- Kiran, D. V., Basu, B., & De, A. (2012). Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2041–2050. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.05.008
- Lincoln Electric Company. (2018). Obtenido de <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/arc-welding-detail.aspx>
- Oyyaravelu, R. (2018). Comparative study on metallurgical and mechanical properties of laser and laser-arc-hybrid welding of HSLA steel. *Materials Today: Proceedings*.
- Pamnani, R., Karthik, V., Jayakumar, T., Vasudevan, M., & Sakthivel, T. (2016). Evaluation of mechanical properties across micro alloyed HSLA steel weld joints using Automated Ball Indentation. *Materials Science and Engineering: A*, 214-223.
- Ríos, L. (2017). *Estudio del efecto de los parámetros de soldadura robotizada en un componente estructural de aceros disímiles por medio de GMAW*. Lerma De Villada, México: CIATEQ.
- Sánchez, M., & Rincón, E. (2017). *Análisis de soldabilidad del acero estructural ASTM A572 G50 con el proceso de soldeo al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegido (FCAW-S) y compararla con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW)*. Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Scalet Rossini, L. (2018). *Otimização do processo de soldagem robotizada tandem GMAW do aço ASTM A572 G50*. São Carlos: Universidade Federal De São Carlos.
- Šebestová, H., Horník, P., Mrňa, L., & Doležal, P. (2018). Microstructure and mechanical properties of hybrid lasTIG welds of HSLA steel. *Procedia CIRP*, 743-747.

- Suryana, Pramono, A., Muda, I., & Setiawan, A. (2019). The Influence of Heat Input to Mechanical Properties and Microstructures of API 5L-X65 Steel Using Submerged Arc Welding Process. *MATEC Web of Conferences*, 269, 01009. doi:10.1051/matecconf/201926901009
- Ullah, N., Rajputa, S., Gupta, V., Verma, V., & Soota, T. (2019). To study mechanical properties and microstructures of MIG welded high strength low alloy steel. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2550–2555. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.112
- Vanegas, L., & Suarez, D. (2015). *Caracterización metalográfica, evaluación de las propiedades mecánicas de tracción e impacto y estudio de la soldabilidad bajo código AWS D1.1 del acero ASTM A 572 G50 comercializado por la empresa steckerl aceros*. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.
- Vidal dos Santos, F., & Gonçalves, J. (2019). Avaliação das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão eletroquímica do aço ASTM A572 e de juntas soldadas. *Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia*, 09(25), 20-48.
- Vidor, M. (2018). *Avaliação dos efeitos do metal de adição no processo de solda a arco elétrico sobre um aço patinável*. Universidade De Caxias Do Sul, Caxias do Sul, Brasil.
- Vieira, F., Al-Rubaie, K., Preti, O., Richter, R., & Delijaicov, S. (2019). Impacto nas Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais do Material ASTM A572 Grau 50 Soldado por Arco Submerso com Alívio de Tensões Térmico. *Soldagem & Inspeção*, 24-31. doi:https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.31
- Wanderlind, A. (2018). *Efeitos dos parâmetros de soldagem GMAW com curva controlada na união dos aços dissimilares ASTM A572 G50 e ASTM A36*. Criciúma, Brasil: Universidade Do Extremo Sul Catarinense-UNESC.

- Yan, C., Huang, J., Wang, L., Zhu, D., Yang, S., & He, S. (2013). Influence of welding parameters on weld appearance and mechanical properties in twin-wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. *Advanced Materials Research*, 753-755, 358-362. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.358
- Zalazar, M., Ramini, M., Surian, E., Bruna, R., & Baralla, E. (2009). *Efecto del procedimiento de soldadura sobre las propiedades de uniones soldadas de aceros microaleados para cañería*. Sao Paulo.
- Zhou, J., Yang, J., Ye, Y., Dai, G., & Peng, X. (2010). Effect of heat input on microstructure and properties in heat affected zone of ASTM A572 G65 steel. *Advanced Materials Research*, 148, 553-557. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.553
- Zurita Velasteguí, J. E. (2014). *Estudio de los procesos de soldadura SMAW y GMAW sobre acero astm A-36, A-500 y su incidencia en las propiedades mecánicas en las juntas soldadas de la estructura de buses*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.