



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**SOLDADURA DISÍMIL DE TERMOPLÁSTICOS UNIDOS MEDIANTE
LA TÉCNICA FSW Y EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES
MECÁNICAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.**

PRESENTA:

M.C. MARIO ALBERTO SÁNCHEZ MIRANDA

ASESOR:

DR. GONZALO MARIANO DOMÍNGUEZ ALMARAZ.

MORELIA, MICH. SEPTIEMBRE DEL 2022



AGRADECIMIENTOS.

A DIOS, sobre todas las cosas, ya que sin él nada es posible.

A mi hijo Rafael, que nació durante mi formación Doctoral y que fue, es y seguirá siendo inspiración de motivación en mi vida, al igual que mi esposa.

A toda mi familia, especialmente a mi padre Rodolfo Sánchez Maciel ya que a pesar de mis errores y tropiezos siempre ha estado junto a mí, he logrado entender sus consejos. Gracias papá por todo.

A mi asesor Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, gracias por su tiempo, paciencia, dedicación, apoyo, esfuerzo, comprensión y más.

Al M.C. Juan Jesús Villalón López, como operador del equipo CNC con el que se llevó a cabo la mayor parte de esta investigación Doctoral.

A todo el comité evaluador que semestre a semestre con sus opiniones, aportaron, dirigieron y enfocaron este proyecto de investigación.

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me fue otorgado para llevar a cabo esta formación Doctoral.

RESUMEN

En esta Tesis Doctoral se analizó el comportamiento de la soldadura por fricción-agitación (FSW “Friction Stir Welding”), de termoplásticos disímiles mediante el análisis de diferentes parámetros del proceso, así como la evaluación de las propiedades mecánicas resultantes. Se realizaron ensayos de resistencia a la tensión de polímeros que poseen propiedades físico-mecánicas disímiles, los cuales fueron unidos mediante la técnica antes mencionada. Se utilizaron placas de termoplásticos de media pulgada de espesor: polipropileno (PP), acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). En este trabajo se estudiaron dos soldaduras disímiles; ABS unido con PP y UHMWPE con PP. En ambos casos se evaluó la calidad (en términos de eficiencia de soldadura), de los cordones de unión en relación con los parámetros utilizados del proceso. Una vez finalizada la etapa de soldadura, se maquinaron las placas soldadas para obtener probetas destinadas a ensayos de tensión, conjuntamente con ensayos de microdureza. Para la soldadura PP – UHMWPE, se realizaron uniones con un previo proceso de calentamiento, mientras que otros especímenes fueron ensayados sin precalentamiento. Para estas mismas uniones se diseñó y fabricó un hombro fijo de aluminio con el fin de mejorar el proceso de soldadura y las propiedades mecánicas resultantes, que fueron corroboradas durante los ensayos de tracción. Una vez concluidas las soldaduras, se maquinaron probetas destinadas a ensayos de tensión, siguiendo la norma internacional ATSM D638-14 para materiales poliméricos. Para dichos ensayos se utilizó una máquina de tensión Zwick Roell modelo Z100, con una velocidad constante de deformación de 5 mm/min. Los resultados de tensión muestran que las juntas ABS-PP presentan una eficiencia de soldadura alrededor del 80% respecto al material base (polipropileno), tomado como referencia para dicha valoración. Para la unión UHMWPE- PP se obtuvo también una eficiencia de soldadura cercana del 80% respecto al mismo material antes mencionado. Además, se realizó el análisis de micro dureza en ambas soldaduras disímiles, tanto en la zona de agitación (cordón de la soldadura) como en las zonas periféricas. Finalmente, las superficies de fractura se analizaron mediante microscopía óptica y electrónica de barrido para deducir las generalidades de causa-efecto en la mejora de la resistencia a la tracción de estas soldaduras poliméricas disímiles.

Palabras Clave: Soldadura por fricción-agitación (FSW); Polipropileno (PP); Acronitrilo-butadieno-estireno (ABS); Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE); Resistencia a la tensión; Eficiencia de soldadura; Microscopia electrónica de barrido (MEB); Microdureza Vickers (HV).

ABSTRACT

In this Doctoral Thesis, the behavior of friction stir welding (FSW) of dissimilar thermoplastics is handled through the analysis of different process parameters as well as the evaluation of the resulting mechanical properties. Tensile strength tests were carried out on polymers that have dissimilar physical-mechanical properties, which were joined by the aforementioned technique. Plates with half inch thick of thermoplastics were used: polypropylene (PP), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). In this work, two dissimilar welds were studied: ABS joined with PP and PP welded with UHMWPE. In both cases, the quality (in terms of welding efficiency) of the beads were obtained and evaluated in regard the process parameters. Once the welding stage was completed, the welding plates were machined in order to obtain tension specimens destined to tension tests, together with microhardness tests. Concerning the PP - UHMWPE joints, some welds were made with a previous heating process; whereas other specimens were tested without previous preheating. For the same joints, a fixed aluminum shoulder was designed and manufactured in order to improve the welding process, which was verified during the tensile tests. Tensile experiments were performed according the international standard ATSM638-14 for polymeric materials. A Zwick Roell model Z100 tension machine was used for tensile tests, with a constant strain rate of 5 mm/min. Results show that the ABS-PP joints present a welding efficiency around 80% with respect to the base material (polypropylene), which was taken as reference. The UHMWPE-PP joints indicated again a welding efficiency close to 80%, also obtained with respect to the same material above mentioned. Furthermore, microhardness analysis was carried out on both dissimilar welds,

in the agitation zone (weld bead), and in the peripheral zones. Finally, fracture surfaces were analyzed using optical and scanning electron microscopy, in order to deduce the generalities of the effect-cause in the improvement of the tensile strength of these dissimilar polymeric welds.

Keywords: Friction stir welding (FSW); Polypropylene (PP); Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS); Ultra high molecular weight polyethylene (UHMW-PE); Tensile strength; Welding efficiency; Scanning electron microscope (SEM); Microhardness (HV).

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
OBJETIVO GENERAL.	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	12
JUSTIFICACIÓN.....	12
HIPÓTESIS	13
 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	 14
1.1. GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS.....	15
1.1.1 MATERIALES POLIMÉRICOS	15
1.1.2 MATERIALES POLIMÉRICOS Y SU CLASIFICACIÓN.	16
1.1.3 MATERIALES POLIMÉRICOS Y SUS PROPIEDADES.	16
1.1.4 POLÍMEROS, USOS Y APLICACIONES	18
1.1.5 UNIÓN DE POLÍMEROS	19
1.2 GENERALIDADES DE LA SOLDADURA.....	19
1.2.1 SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO	19
1.2.2 SOLDADURA EN POLÍMEROS	21
1.2.3. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FRICTION STIR WELDING - FSW).....	21

1.2.4 SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN POLÍMEROS.	25
1.3 ESTADO DEL ARTE.	26
 CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	 38
2.1 INTRODUCCIÓN.	39
2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES A UNIR MEDIANTE FSW.	39
2.2.1 ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS)	40
2.2.1.1. ESTRUCTURA DEL ABS	41
2.2.1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL ABS.	41
2.2.1.3 USOS Y APLICACIONES DEL ABS.....	42
2.2.2 POLIPROPILENO (PP).....	42
2.2.2.1 ESTRUCTURA DEL POLIPROPILENO	43
2.2.2.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO	44
2.2.2.3 USOS Y APLICACIONES DEL POLIPROPILENO	44
2.2.3 POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE).....	46
2.2.3.1 ESTRUCTURA DEL UHMWPE	46
2.2.3.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL UHMWPE	47
2.2.3.3 USOS Y APLICACIONES DEL UHMWPE.....	48
2.3 OBTENCIÓN, CORTE Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES	48
2.4 UNIÓN DE LOS MATERIALES MEDIANTE FSW.	50
2.5 VARIABLES DEL PROCESO FSW.	51
2.6 PRUEBAS MECÁNICAS EN LOS MATERIALES; ENSAYOS DE TENSIÓN, ENSAYOS DE DUREZA, MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	55
 CAPÍTULO 3. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.	 59

3.1 INTRODUCCIÓN	60
3.2. SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE MATERIALES BASE Y DISÍMILES (PP - ABS).....	60
3.2.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE LA UNIÓN ABS Y PP.	70
3.2.2. PERFIL DE MICRODUREZA EN LA SOLDADURA.....	72
3.2.3. SUPERFICIES DE FRACTURA.	75
3.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	76
3.3. SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE LA UNIÓN PP-UHMWPE....	77
3.3.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN PP-UHMWPE	83
3.3.2. PERFIL DE MICRODUREZA EN LA SOLDADURA PP-UHMWPE	86
3.3.3. SUPERFICIES DE FRACTURA	87
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	90
REFERENCIAS	93
ACCIONES DE DIFUSIÓN.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales componentes del proceso de soldadura por fricción-agitación	22
Figura 2. Zonas características de la soldadura por FSW.	24
Figura 3. Soldadura por fricción.....	36
Figura 4. Estructura del ABS.....	41
Figura 5. Usos y aplicaciones del acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).....	42

Figura 6. Estructura del polipropileno (molécula).....	43
Figura 7. Usos y aplicaciones del polipropileno.....	45
Figura 8. Estructura del UHMWPE.....	47
Figura 9. Usos y aplicaciones del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE). ...	48
Figura 10. Probetas de ABS y PP para unirse mediante FSW.	49
Figura 11. Elementos de sujeción de los materiales poliméricos en el proceso FSW.....	51
Figura 12. Herramientales utilizados para el proceso de soldadura por fricción-agitación. a) Pin cabeza de clavo, b) pin cilíndrico y c) pin cónico.....	52
Figura 13. a) Herramienta insertada en el balero, b) placa de aluminio 6061 con preparación para insertarse en el balero.	53
Figura 14. Configuración de la herramienta hexagonal con el balero y la placa de aluminio como hombro estacionario para el proceso de soldadura por fricción-agitación.	54
Figura 15. Horno RCA para el precalentamiento de los materiales.	54
Figura 16. Termómetro con puntero laser para evaluar la temperatura del proceso FSW. ..	55
Figura 17. Probetas para ensayos de tensión (PP-ABS).....	56
Figura 18. Dimensiones de las probetas plásticas para ensayos de tensión según la norma ASTM D638-14.....	56
Figura 19. Probetas de PP-UHMWPE para ensayos de tensión bajo la norma ASTM D638-14.	57
Figura 20. Máquina de tensión Zwick /Roell Z100.....	57
Figura 21. FSW de placas de polipropileno.	62
Figura 22. Corte longitudinal de la soldadura de placas de ABS (porosidad).	63
Figura 23. Corte transversal de la soldadura de placas de ABS (defecto túnel).....	64
Figura 24. FSW de placas de ABS (rebabas).	64
Figura 25. a) Corte transversal FSW de ABS (porosidad) y b) Soldadura ABS (unión 9).....	64

Figura 26. FSW de placas de ABS y PP.....	66
Figura 27. FSW de ABS y PP (defecto de túnel de 5 cm aproximadamente).....	67
Figura 28. FSW de placas de ABS y polipropileno (sin defecto de túnel).....	68
Figura 29. FSW de placas de ABS y polipropileno (defectos de soldadura).	68
Figura 30. Polímeros soldados con velocidades de avance de 3 mm/min (izquierda) y 1.5 mm/min (derecha).....	70
Figura 31. Ensayos de tensión en probetas disímiles PP-ABS, soldadas mediante la técnica de fricción-agitación.	71
Figura 32. Ensayos de tensión para el polipropileno (PP) y el ABS (acronitrilo-butadieno-estireno).	72
Figura 33. Perfil de dureza para la soldadura #13.	73
Figura 34. Perfil de dureza para la soldadura #14.	74
Figura 35. Probetas fracturadas mediante ensayo de tensión.	75
Figura 36. Tipos de fractura en polímeros unidos por FSW y sometidos a tensión.	76
Figure 37. MEB para los ensayos 13; zona de PP (a), y zona de ABS (b).....	77
Figure 38. MEB para los ensayos 14; zona de PP (a), y zona de ABS (b).....	77
Figura 39. Soldadura por fricción-agitación de placas de polietileno y polipropileno, parámetros de proceso del ensayo 3 (a), parámetros de proceso del ensayo 4 (b).	79
Figura 40. Hombro estacionario y cordón de soldadura durante el proceso FSW de PP – UHMWPE.	80
Figura 41. FSW polipropileno-polietileno; a) unión 6 y 1, b) unión 7 y 2, c) unión 8 y 3, .81 d) unión 9 y 4, e) unión 10 y 5.	81
Figura 42. FSW PP-PE; a) unión 16 y 11, b) unión 17 y 12, c) unión 18 y 13, d) unión 19 y 14, e) unión 20 y 15.....	82
Figura 43. Ensayo de tensión de los termoplásticos, a) UHMWPE b) PP.	85

Figure 44. Gráficos de los ensayos de tensión de las cuatro soldaduras con las resistencias más altas.	85
Figura 45. Perfil de dureza para las cuatro modalidades de ensayo FSW, presentando los valores más altos en los ensayos de tensión, para las uniones PP-UHMWPE.	86
Figura 46. Fracturas de las probetas con los valores más altos de los ensayo de tensión	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales tipos de polímeros y sus propiedades	17
Table 2. Principales propiedades mecánicas y físicas de los materiales poliméricos.	50
Tabla 3. Parámetros de soldadura para la unión de placas de PP.	61
Tabla 4. Parámetros de soldadura para la unión de placas de polímero ABS	63
Tabla 5A. Parámetros de soldadura para la unión de placas de ABS-PP.	65
Tabla 5B. Parámetros de soldadura para la unión de placas de ABS-PP.	69
Tabla 6. Ensayos de tensión en probetas soldadas mediante soldadura por fricción-agitación (PP-ABS).	71
Tabla 7. Valores de microdureza de la soldadura #13.	73
Tabla 8. Valores de microdureza de la soldadura #14.	74
Tabla 9. Parámetros preliminares de soldadura para la unión de placas de PP y UHMWPE	78
Tabla 10. Parámetros de soldadura para la unión de placas de PP y UHMWPE.	80
Tabla 11. Resistencia a la tensión en función de los parámetros de soldadura, en las uniones PP-UHMWPE.	84
Tabla 12. Valores de dureza de la soldaduras PP-UHMWPE	87

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En los últimos años se han promovido las técnicas de unión destinadas a materiales disímiles. Esto representa diferentes retos porque cada material posee propiedades mecánicas, químicas, térmicas y físicas específicas que generan dificultades en la selección de la técnica de soldadura apropiada para unir materiales distintos. Dentro de los principales métodos de unión se encuentran la unión con adhesivos, la sujeción mecánica y por último, la soldadura. Esta última modalidad de unión presenta problemas y dificultades para su implementación; particularmente en el caso de soldadura de materiales disímiles. En este caso, las condiciones del proceso de unión, así como las propiedades de los materiales, afectan la soldadura debido a la modificación microestructural, induciendo variaciones en el comportamiento mecánico de las juntas producidas.

Por otro lado, diferentes publicaciones describen el comportamiento físico de los cordones de soldadura producidos por el método FSW (por sus siglas en inglés: “Friction Stir Welding”), de materiales metálicos, poliméricos, incluyendo materiales disímiles; no obstante, limitados artículos tratan los efectos de los parámetros del proceso para obtener una buena eficiencia en términos de resistencia a la tracción. Además, las publicaciones relacionadas con la soldadura de materiales disímiles poliméricos mediante esta técnica, son limitadas en comparación a la unión de polímeros de la misma naturaleza. Consecuentemente, esta técnica de unión es de particular interés para la investigación de la factibilidad de soldado en polímeros disímiles. Adicionalmente a lo antes mencionado, esta técnica de unión presenta potencial para uniones disímiles con un comportamiento mecánico en términos de eficiencia de soldado, apropiado para variadas aplicaciones industriales.

OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo uniones mediante el proceso de soldadura por FSW (Soldadura por Fricción Agitación), de materiales poliméricos con propiedades disímiles, y la posterior evaluación de las propiedades mecánicas resultantes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Llevar a cabo uniones de polímeros disímiles.
- Analizar diferentes variables del proceso FSW (geometría del pin, velocidad de giro, velocidad de avance de la herramienta, etc.) para obtener una soldadura óptima.
- Evaluar las propiedades mecánicas resultantes (ensayos de tensión y micro dureza).
- Relacionar los parámetros utilizados en el proceso FSW con las propiedades mecánicas resultantes de las uniones obtenidas.
- Caracterizar las uniones mediante microscopía electrónica de barrido y óptica.
- Llevar a cabo análisis de la superficie de fractura para establecer las posibles causas de falla.

JUSTIFICACIÓN

La unión de materiales poliméricos disímiles es una tarea de investigación amplia, puesto que el manejo de estos materiales mediante soldadura implica un proceso laborioso y difícil debido a las propiedades intrínsecas. Estas propiedades están relacionadas con la temperatura de transición vítrea, la difusión molecular en estado líquido durante el proceso de agitación y la modificación de las cadenas poliméricas después del proceso de unión. No obstante, la técnica de FWS ha permitido uniones de polímeros de distinta naturaleza con resultados alentadores en sus propiedades mecánicas.

En la actualidad las industrias buscan productos livianos que tengan características de alto rendimiento, siendo esta una preocupación mayor para la mayoría de los fabricantes. En el escenario actual, los polímeros se sitúan como materiales livianos en varios sectores de la industria. Con los años, los polímeros han demostrado ser materiales fuertes que además

pueden combinarse con otros materiales para formar estructuras híbridas. La soldadura por fricción-agitación es uno de los principales logros en la tecnología actual de uniones. Este proceso se ha utilizado con éxito para unir diferentes tipos de metales y recientemente se ha implementado para la unión de termoplásticos [1]. Entre las ventajas fundamentales del método se encuentran: capacidad de unión de aleaciones de difícil soldabilidad, piezas a soldar sin necesidad de biseles, ausencia de metal de aporte y gas de protección, menor distorsión, no genera humos tóxicos, entre las más importantes. Las propiedades mecánicas y de sanidad (sin reactividad química con productos alimenticios), de las uniones producidas por FSW resultan en general superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales en el caso de aleaciones metálicas [2]. Otras de las ventajas principales son; el bajo nivel de tensiones residuales, la reducción de porosidad y no requiere del mecanizado de refuerzos. El diseño de la herramienta es de fundamental importancia referente a la calidad de la unión y la producción en serie. En este sentido existen diversos diseños de herramientas para FSW. Algunos de los aspectos en la geometría del herramental más significativos para una unión óptima de las piezas son: el hombro (móvil o estacionario), longitud y diámetro del pin, con la posibilidad de modificación en su geometría [3].

Adicionalmente, el proceso FSW es frecuentemente menos caro en comparación con otros métodos de unión. Se han obtenido pocos trabajos científicos de esta técnica de unión en nuestro país; por consiguiente, resulta de interés este trabajo de Tesis Doctoral, con alto potencial de aplicación en industrias como: la aeronáutica, automotriz, electrónica, naval, etc.

HIPÓTESIS

Es posible llevar a cabo la unión de polímeros disímiles (con sus propiedades intrínsecas de cada material), mediante la técnica de soldadura por fricción-agitación, controlando los parámetros para obtener uniones con el mínimo de defectos posibles; consecuentemente, con las mejores propiedades mecánicas. También es posible llevar a cabo análisis de las superficies de fractura para establecer las posibles causas de falla.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS

1.1.1 MATERIALES POLIMÉRICOS

La palabra polímero significa "muchas partes", que proviene del griego con las palabras "Poly y Mers". Estos materiales son caracterizados por cadenas de moléculas conocidos como monómeros, las cuales (la mayoría de estas), se unen artificialmente; es decir, el monómero se refiere a una sola molécula que comprende la unidad básica para la cadena del polímero. La mayoría de estos materiales son orgánicos y contienen moléculas compuestas de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. El carbono constituye la "columna vertebral" de la cadena del polímero y los otros elementos antes mencionados se adhieren al mismo. Estas cadenas de polímeros se entrelazan y forman estructuras irregulares, creando mayor resistencia. Una parte de este enlace se genera naturalmente y puede ser incitado por procesos controlados y ciertos aditivos. Gran parte de los polímeros se basan en hidrocarburos, donde los elementos de carbono e hidrógeno forman combinaciones basadas en la relación $C_nH_{2n} + 2$. Estos productos petroquímicos son producidos a partir de parafinas de petróleo (aceite mineral derivado de hidrocarburos) y gas natural, que posteriormente se procesan en productos poliméricos. Dichos elementos son la base de la mayoría de los productos de caucho y polímeros; el más importante de estos compuestos es el etileno. Productos petroquímicos intermedios como: etileno, propileno, butileno, acetileno, butadieno e isobutileno, etc., son precursores de los polímeros industriales. Por ejemplo, con el butadieno se produce nylon; con el acetileno se produce cloruro de polivinilo, con el etileno se produce polietileno de alta y baja densidad, etc. Los compuestos intermedios como los hidrocarburos aromáticos incluyen tolueno, xileno y benceno. Otra categoría de compuestos intermedios son los nafténicos, de los cuales el ciclohexano es el más importante y se utiliza en la fabricación de nylon. Los compuestos intermedios aromáticos, nafténicos y olefinicos se utilizan para producir detergentes, productos farmacéuticos, combustibles para cohetes, explosivos, insecticidas, alcoholes y productos similares. Otro tipo de plásticos que son los celulósicos se originan a partir de productos orgánicos como la madera, maíz, hueso de aguacate, etc. y no del petróleo, carbón o gas [4][5][6].

1.1.2 MATERIALES POLIMÉRICOS Y SU CLASIFICACIÓN.

Se pueden distinguir principalmente dos clasificaciones para los materiales polímeros: termofijos y termoplásticos. Cuando se calientan, los termoplásticos se ablandan y son susceptibles de modificar su forma y dimensiones; posteriormente al enfriarse, estos se endurecen y mantienen su forma. Los termoplásticos se pueden ablandar repetidamente [6]; y se componen de material amorfo o semicristalino; aunque en su mayoría son semicristalinos con un porcentaje de componente amorfo. Los polímeros amorfos son duros y rígidos por debajo de una temperatura definida (temperatura de transición vítrea). Por encima de esta temperatura, el polímero amorfo se vuelve blando y puede conformarse. Además las propiedades mecánicas cambian cerca de la temperatura de transición vítrea. Por otra parte, los polímeros cristalinos tienen puntos de fusión que están por encima de su temperatura de transición vítrea. El grado de cristalinidad tiene importantes efectos en las propiedades mecánicas: los plásticos cristalinos se volverán menos rígidos por encima de su temperatura de transición vítrea, pero no fluirán hasta que la temperatura esté por encima del punto de fusión cristalino. A diferencia de los plásticos amorfos, los cristalinos tienen mayor dureza, rigidez, lubricidad, densidad y resistencia a algunos químicos. Otra clase importante de resinas poliméricas son los elastómeros; estos son polímeros similares al caucho con temperaturas de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, un elastómero es rígido y perderá sus propiedades gomosas [5].

1.1.3 MATERIALES POLIMÉRICOS Y SUS PROPIEDADES.

Los polímeros termoplásticos a menudo exhiben propiedades plásticas y dúctiles. Estos se pueden formar a temperaturas elevadas, enfriar, refundir y formar de nuevo diferentes piezas sin cambiar las propiedades del mismo; no obstante, la temperatura utilizada debe controlarse cuidadosamente, de otra manera, el material se degradará químicamente. Las propiedades de estos materiales están determinadas por el método de unión entre las cadenas de polímeros;

estos enlaces dependen de la temperatura y comprenden enlaces secundarios, como son las fuerzas de Van der Waals.

Los polímeros termofijos tienen fuertes enlaces primarios, a menudo formados por polimerización por condensación (poliuretano, resina alcidicas, utilizadas en la fabricación de pinturas), resina epóxica (resina para encapsular diversos materiales), poliéster insaturado, urea-formaldehído, etc. Estos polímeros tienen fuertes enlaces primarios asemejando su estructura a una molécula grande. Las propiedades son el resultado de cambios químicos sufridos durante el proceso, bajo calor o por un catalizador. Una vez endurecidos, estos polímeros no se pueden modificar, debido a la pérdida de una parte de la molécula durante el proceso de curado. Si se aplica más calor a uno de estos materiales entonces se degradará químicamente. Los polímeros termofijos comunes incluyen fenólicos, aminos, poliésteres, epoxis y alquidos, este último funge como ingrediente para pinturas, barnices y esmaltes [6].

Las principales propiedades de los polímeros son: rigidez, dureza, resistencia y punto de fusión. En los procesos de fabricación de los polímeros se pueden agregar aditivos para mejorar algunas propiedades, dentro de estas, la formabilidad del material. Estos aditivos son rellenos, plastificantes y lubricantes. A menudo se dividen en dos grupos: aditivos relacionados con el rendimiento y aditivos relacionados con el proceso, según la finalidad del material [4]. La tabla 1, muestra los principales tipos de polímeros y sus propiedades.

Tabla 1. Principales tipos de polímeros y sus propiedades

Polímero	Propiedades
*ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno)	Ligero, buena resistencia, excelente dureza.
* Acrílico	Excelente calidad óptica, resistencia al impacto, a la flexión y a la tracción.
** Epoxias	Buena dureza, elasticidad, resistencia química.
** Etil-celulosa	Alta resistencia eléctrica, alta resistencia al impacto.
* Fluorocarbono	Inerte para la mayoría de los productos químicos, resistencia a altas temperaturas.
** Melamina	Excelente resistencia al calor, al agua y a los productos químicos.
** Fenólico	Duro, relativamente fuerte, de fácil formación, generalmente opaco.

* Poliamida	Buena resistencia a la abrasión y dureza, utilizado en materiales de rodamientos que requieren poca lubricación.
* Policarbonato	Alta resistencia y dureza.
* Polietileno	Alta dureza, alta resistencia eléctrica; utilizado en tapas de botellas, utensilios irrompibles y aislamiento de cables.
* Polipropileno	El peso más ligero, más duro que el polietileno.
* Poliestireno	Baja absorción de humedad, dieléctrico.
** Silicona	Resistente al calor, baja absorción de humedad, altas propiedades dieléctricas.
* Vinilo	Resistente al desgarre, buen envejecimiento, buena resistencia a la humedad.

Termopolímero = *, Termofijo = **

Estos materiales presentan ventajas respecto a las aleaciones metálicas, tales como: alta relación resistencia/peso, flexibilidad, relativos bajos costos de fabricación, excelente resistencia a la corrosión y a los solventes, resistencia ambiental, aislamiento térmico y eléctrico, etc., lo que conduce a sus múltiples posibilidades de aplicación. En la actualidad existen miles de grados de polímeros disponibles en el mercado; estos cubren una amplia gama de propiedades, desde blando a duro, dúctil a frágil y débil a resistente. La amplia variedad de polímeros y compuestos poliméricos hacen posible seleccionar, incluso personalizar, el material para alguna aplicación específica. Consecuentemente, estos materiales se usan en aplicaciones bajo requisitos cada vez más estrictos [7].

1.1.4 POLÍMEROS, USOS Y APLICACIONES

En los últimos 20 años el uso de materiales poliméricos ha crecido exponencialmente en muy diversas aplicaciones industriales, que incluyen: empaquetados, construcción, electrodomésticos, electrónica, industria automotriz, aeroespacial, etc. En 1983, el consumo anual de estos materiales a nivel mundial superaba el consumo volumétrico de hierro y acero [8]; Los polímeros tienen ciertas ventajas sobre los metales en términos de propiedades mecánicas y físicas. Además, tienen una variedad de aplicaciones que supera la de cualquier otra clase de materiales. Por otro lado, se pueden usar en la fabricación de materiales ligeros que requieren una resistencia baja-media, como; aislantes eléctricos; aislantes térmicos;

espuma flexible utilizada para empacar o rellenos; adhesivos o agentes de unión; puertas, ventanas, etc. Los polímeros ofrecen una amplia variedad de aplicaciones, además presentan propiedades que no se encuentran en ningún otro material [9].

1.1.5 UNIÓN DE POLÍMEROS

En la manufactura de componentes poliméricos la unión es una de las etapas más críticas. Los métodos para unir estos materiales se pueden dividir en tres categorías principales: sujeción mecánica, adhesiva y por soldadura. La soldadura es un método eficaz para unir permanentemente componentes plásticos [7]. La unión adhesiva y la sujeción mecánica se han empleado desde hace años para unir materiales termoplásticos; sin embargo, estos procesos tienen importantes inconvenientes. La estructura resultante de la unión adhesiva es raramente sometida a pruebas cualitativas y cuantitativas; consecuentemente, es difícil predecir la falla de la unión. Además, el adhesivo puede tener efectos ambientales adversos y debe manipularse con precaución cuando se aplica [1]. La unión es un paso crítico en ciertos componentes poliméricos, especialmente en aplicaciones estructurales. El diseño de una sola pieza sin la necesidad de uniones es la situación ideal; no obstante, las limitaciones mecánicas y otras consideraciones a menudo hacen que sea necesario unir las partes poliméricas, ya sea entre sí con otras partes poliméricas o con cualquier otro material, para completar el ensamblaje. A medida que aumentan los requisitos del componente, también aumentan las dificultades para la unión [10] [7].

1.2 GENERALIDADES DE LA SOLDADURA

1.2.1 SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO

Comparada con otros métodos de unión, como el remachado y el atornillado, las soldaduras FSW tienden a ser más resistentes, más livianas y más baratas de producir. Existen diversos procesos de soldadura y en algunos se produce ocasionalmente una coalescencia entre los materiales mediante la aplicación de presión a una temperatura de soldadura por debajo del

punto de fusión de estos materiales a unir y sin la utilización de material de aporte. La unión tiene lugar por enlace atómico.

A medida que las superficies se presionan, los átomos en las dos superficies se atraen entre sí para formar enlaces entre las superficies, esto permite que los átomos se difundan a través de la interfaz de los materiales, llevándose así a cabo el proceso de unión. En este proceso, la presión y la deformación proporcionan mayoritariamente la unión. En general, no se requiere la fusión de los materiales. La unión por difusión utiliza una presión que deforma las superficies contiguas de los materiales aunque sin una deformación considerable de la pieza de trabajo. Se puede proporcionar la presión para el trabajo mediante varios métodos, que incluyen soldadura de forja, por explosión, soldadura por fricción, soldadura en frío, soldadura a presión en caliente, soldadura ultrasónica, soldadura por rodillo y **soldadura por fricción-agitación (FSW)** [11] [12]. Para permitir la unión atómica deben ponerse en contacto físico las dos superficies de los materiales a unir y estas deben estar limpias, libres de cualquier sustancia que pueda intervenir en la calidad de la soldadura. En estos procesos de soldadura, que no involucran la fusión, se tienen varias ventajas, como; la zona afectada térmicamente se reduce considerablemente, por lo que el material que rodea la unión conserva mejor sus propiedades originales [13]. En la actualidad, la soldadura se utiliza ampliamente en la fabricación de recipientes a presión, estructuras metálicas como puentes, edificios, aviones, naves espaciales, ferrocarriles, barcos, automóviles, etc. Los procesos de soldadura existentes se han mejorado a través del tiempo y se han introducido nuevos métodos de unión [14]. Las técnicas de soldadura a menudo se clasifican e identifican por el método de calentamiento que se utiliza. Todos los métodos de soldadura se pueden dividir en dos categorías generales: calentamiento externo e interno. Los métodos de calentamiento interno se dividen en dos categorías: calentamiento mecánico interno y calentamiento electromagnético interno. Los métodos de calentamiento mecánico interno se basan en la conversión de energía mecánica en calor a través de la fricción superficial y la fricción intermolecular. Estas técnicas de soldadura incluyen: soldadura ultrasónica, soldadura por vibración, soldadura por rotación y **soldadura por fricción** [7][15].

1.2.2 SOLDADURA EN POLÍMEROS

La soldabilidad de los materiales poliméricos depende de su naturaleza: termofijos, termoplásticos o elastómeros. En el caso de las resinas termofijas solo se pueden unir utilizando adhesivos o por mecanismos de sujeción. Los termoplásticos, por otro lado, pueden ablandarse y fundirse. Además, los termoplásticos se pueden remodelar mediante la aplicación de calor y se pueden soldar con éxito por fusión [7] [15].

1.2.3. PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FRICTION STIR WELDING - FSW)

Esta técnica de unión surgió en 1991 en el Reino Unido en el instituto de soldadura (The Welding Institute, TWI); inicialmente sus aplicaciones fueron orientadas para aleaciones de aluminio. Esta técnica de soldadura se ha expandido rápidamente desde su inicio y ha encontrado aplicaciones en una amplia variedad de industrias, incluyendo aeroespacial, automotriz, ferroviaria, marítima, entre otras. El proceso FSW exhibe un número de ventajas en comparación con otros procesos de soldaduras, tal vez el más significativo es la capacidad para soldar aleaciones que son difíciles o imposibles de soldar usando soldadura por fusión. El proceso tiene lugar en la fase sólida, a temperaturas por debajo del punto de fusión del material, no requiere material de relleno ni del uso de un gas de protección, además este proceso carece de humos, centelleo de arco, salpicaduras y contaminación asociada con la mayoría de las técnicas de soldadura por fusión. Por estas razones, FSW se ha convertido en un proceso de unión útil para muchas aplicaciones, con buenas propiedades mecánicas resultantes, conduciendo a numerosas aplicaciones industriales.

El proceso consiste en la generación de calor y mezcla del material producido por el giro (fricción) de la herramienta [16]. El movimiento de rotación y avance de la herramienta (sobre la línea de unión) que está insertada en los bordes contiguos de las placas a unir, promueve un flujo y mezclado de estos materiales desde un extremo hacia el otro, lo que provoca la unión de las dos piezas en estado sólido [13] [17] [18] [19] .

En la Figura 1 se ilustra el proceso de soldadura por fricción-agitación donde se muestran los principales componentes de esta técnica de unión.

Para llevar a cabo el proceso de soldadura FSW, se requieren elementos de sujeción que fijen el material para evitar movimientos, afectando la calidad de la soldadura [20][21][22][23]. El diseño del herramental es fundamental para la mejora del proceso de soldadura; éste consiste originalmente en un hombro que puede o no tocar la superficie de la pieza a unir, y un pin que lleva a cabo la fricción y mezcla los materiales [24] [25].

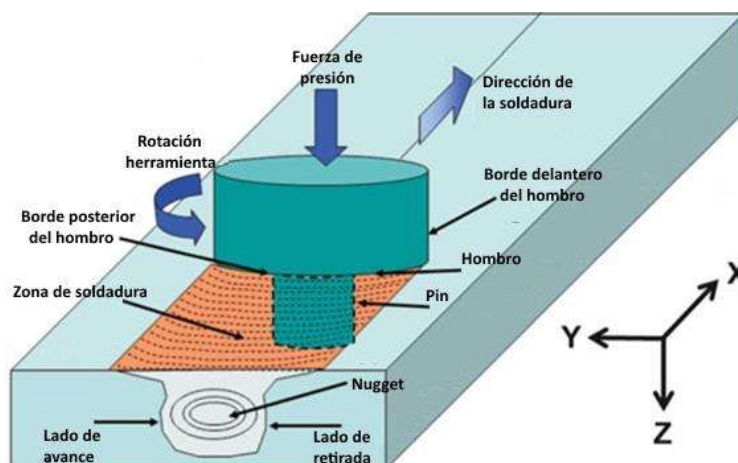


Figura 1. Principales componentes del proceso de soldadura por fricción-agitación [19].

El hombro tiene como función evitar el escape del material a medida que se genera el cordón de soldadura. El pin comúnmente emplea distintas formas, que van desde geometrías totalmente lisas, geometrías roscadas, cónicas, etc. Desde su desarrollo original, los avances en la soldadura por fricción con agitación han sido impulsados a menudo por el desarrollo de nuevos herramentales de soldadura [26].

Durante el proceso de soldadura FSW, la temperatura de trabajo está por debajo del punto de fusión de los materiales evitando así dificultades, como los cambios volumétricos que sufren los materiales. Además, la baja temperatura de soldadura hace posible una considerablemente

menor distorsión y disminución de tensiones residuales, permitiendo la posibilidad de soldar materiales muy delgados o muy gruesos. Este proceso de soldadura generalmente se considera como un proceso mecanizado, por lo que el costo del equipo en comparación con otras técnicas de soldadura es más caro, y se requieren habilidades suficientes por parte del operador. Por otro lado, este proceso de soldadura elimina o reduce drásticamente la formación de humos tóxicos y el consumo de energía durante la soldadura es bajo, reduciendo así el impacto ambiental. Por estas razones, este método de unión se ha desarrollado en los últimos 20 años aplicándose en materiales metálicos y más recientemente, en polímeros, así como su aplicación en materiales disímiles [20] [21].

Para determinar los requisitos del equipo FSW, es necesario tener una idea de la eficiencia de la soldadura que es posible alcanzar para las piezas disímiles, susceptibles de unión. Los principales parámetros del proceso son los siguientes: la posición de la herramienta, la orientación, la rotación, la velocidad de desplazamiento y posicionamiento de los materiales (tope o traslape). Existen otras áreas de estudio relacionadas con los parámetros involucrados en el proceso FSW, los cuales investigan el flujo del material, la formación de defectos, las fuerzas que se generan durante el proceso, el tamaño de grano o el análisis microestructural resultante; además de estudios en modelos experimentales y computacionales que se han desarrollado sobre los efectos de los parámetros del proceso FSW [27] [28].

Existen diferentes tipos de máquinas utilizadas en esta técnica unión (FSW), algunas están configuradas para aplicaciones específicas y otras sueldan una gama amplia de materiales y piezas. El diseño de la máquina determina la capacidad para soldar; por ejemplo, las aplicaciones de producción generalmente usan máquinas FSW que están diseñadas específicamente para el trabajo. En términos de investigación, las máquinas generalmente tienen diversas funcionalidades, de modo que se puedan soldar diferentes materiales. Básicamente, una máquina FSW debe incluir funcionalidad y rendimiento, para generar las soldaduras deseadas. Para realizar soldaduras por fricción-agitación, la potencia mínima requerida es de 3 HP, aproximadamente [20] [29] [30].

En esta técnica de soldado, la disipación de calor depende de todos los parámetros que participan en el proceso mientras que en otros procesos de soldadura, la disipación de calor está determinada por los parámetros externos al proceso (voltaje y corriente). Por otro lado, el tamaño y el tipo de material pueden tener efecto en las fuerzas generadas y la generación de calor durante la soldadura [31] [32].

Similarmente otros procesos de soldadura por fusión, en la soldadura por fricción-agitación, se encuentran zonas características resultantes en la unión de los materiales. En la Figura 2 se pueden distinguir las zonas que son características de un proceso FSW, estas son: el material base (MB), siendo la zona no afectada por el proceso, conservando las propiedades mecánicas y microestructurales originales; la zona afectada térmicamente (ZAT), donde ocurren cambios a nivel microestructural producto de la influencia del calor generado por la fricción de la herramienta en el material; la zona afectada termomecánica (ZATM), es el resultado del calor producido por el proceso y por la agitación del material. En esta última zona, los cambios estructurales son muy notorios en relación a la ZAT. Finalmente, la zona de agitación (ZA), donde se observa la agitación o mezcla del material producto del giro de la herramienta y del calor friccional.

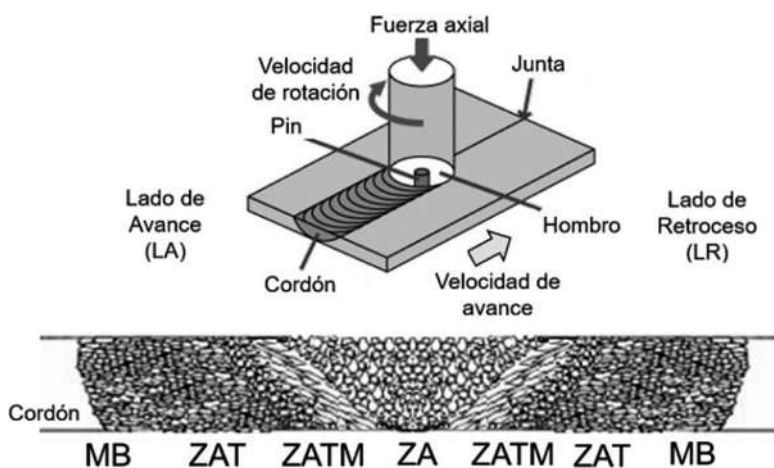


Figura 2. Zonas características de la soldadura por FSW. [33]

Por otro lado, es conveniente mencionar que este proceso de soldadura es eficiente en el uso de la energía: la reducción en el uso de energía es de entre el 60% y el 80% comparado contra el proceso de fusión. Hasta hace poco tiempo, las aplicaciones de esta técnica de soldadura habían estado limitadas en su mayoría al aluminio y otras aleaciones de bajas temperaturas de fusión; además que el equipo no era completamente portátil. Consecuentemente, no era aplicable para la construcción en sitios de estructuras grandes y complejas tales como: líneas de tubería, puentes y tanques de refinería.

Los avances tecnológicos recientes en la composición de herramientas y tecnología, han incrementado la capacidad de unión mediante esta técnica de soldadura para unir aceros de alta resistencia y otros materiales de alta temperaturas de fusión. Adicionalmente, existe equipo portátil específico para realizar soldaduras perimetrales o en circunferencia. Esto permite capacidad para su aplicación en la soldadura de tuberías [34]. A través del tiempo, la soldadura por fricción-agitación se ha convertido en una tecnología de soldadura importante. En los últimos años se han desarrollado estudios en uniones de magnesio, aleaciones de cobre y aceros, entre otros [35]. Aunque originalmente esta técnica de soldadura fue diseñada para aleaciones de aluminio, el alcance de la soldadura por fricción-agitación se ha extendido a una gran variedad de materiales, incluidos los polímeros, compuestos y materiales disímiles. [36]

1.2.4 SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN EN POLÍMEROS.

La soldadura por fricción-agitación de polímeros, es compleja debido a las diferentes propiedades físicas y reológicas de estos materiales. La velocidad de rotación es el principal parámetro en este proceso de soldadura y varía para cada tipo de material en función de sus propiedades físicas; particularmente, la difusión molecular en estado líquido [37] [38]. Una alta velocidad de giro o de rotación de la herramienta genera como resultado la degradación del polímero, mientras que una velocidad baja proporciona una mezcla deficiente. En consecuencia, se debe utilizar parámetros óptimos para la unión. Además, una fluencia excesiva del material puede dar como resultado un defecto de tipo “túnel” que es un hueco a

lo largo de la línea de unión, induciendo una reducción en la calidad de la soldadura. La mezcla uniforme del material durante el proceso de agitación tiene una relación directa con la calidad de la soldadura [39]. Por otro lado, la uniformidad en el flujo de material o la mezcla depende sensiblemente de la geometría del perfil del pin [40]. Consecuentemente, se deben evaluar ciertos perfiles de pin para una mezcla uniforme con el propósito de mejorar la soldadura. Esta técnica de soldadura aplicada en polímeros ha seguido desarrollándose rápidamente en los últimos años con avances en el diseño de herramientas, aporte de calor externo y diferentes condiciones de inmersión [39].

1.3 ESTADO DEL ARTE.

A continuación se presenta la revisión bibliográfica concerniente a la unión de polímeros utilizando esta técnica, para enumerar los diferentes aspectos relacionados bajo este proceso de unión, que se abordan en el desarrollo de esta investigación doctoral.

La unión de hojas de polipropileno (termoplásticos) mediante la técnica de soldadura FSW fue analizada por Santosh y colaboradores. En esta investigación se describe la importancia de los termoplásticos a través de sus amplias aplicaciones, haciendo una investigación experimental del proceso FSW y analizando el efecto de la geometría de la herramienta para unir placas de 6 mm de espesor del material mencionado. También se analiza el efecto de la velocidad de rotación y de avance del herramental en la calidad de la unión. Además, se investiga la calidad de soldadura utilizando 3 geometrías del pin: cilíndrica, cuadrada y cónica y se analiza también el efecto del diámetro del hombro. Los valores de los ensayos de tracción de las soldaduras son determinados y correlacionados con los parámetros utilizados en el proceso de unión. Los resultados obtenidos demostraron que el pin cuadrado genera los mejores resultados de la unión; obteniendo una eficiencia de soldadura de aproximadamente 60% con respecto al material base. Por último, este mismo trabajo resalta la influencia de los parámetros del proceso FSW en la unión del polipropileno [1].

Yahya Bozkurt investiga la eficiencia de los parámetros del proceso FSW en placas de polietileno de alta densidad. Menciona que la mayoría de los investigadores siguen los procedimientos experimentales convencionales, es decir, varían un parámetro a la vez mientras se mantienen constantes los demás parámetros. Este diseño paramétrico convencional requiere recursos y mucho tiempo. Para solucionar este problema, existen diferentes métodos para analizar las variables deseadas. Menciona que el método Taguchi es una de las técnicas que podría aplicarse para optimizar parámetros de soldadura. Se ha encontrado que este método es una técnica simple y robusta. Este método es utilizado para mejorar la calidad de un producto y se puede aplicar a cualquier proceso. Encontró que los parámetros de soldadura óptimos para unir placas de HDPE son: velocidad de rotación de 3000 rpm, velocidad transversal de 115 mm/min y un ángulo de inclinación de la herramienta de 3° [38].

Después del proceso de unión, la estructura interna de los materiales sufre modificaciones; esta particularidad fue estudiada en placas de polipropileno por Seth y colaboradores. Si bien en este trabajo de investigación no se precisa la microestructura final de las juntas obtenidas mediante FSW en materiales termoplásticos, se menciona que mediante estudios de microscopía se identificaron cuatro zonas de microestructura que son: el material base (MB), la zona no afectada por el proceso; la zona afectada térmicamente (ZAT), donde ocurren cambios microestructurales debido al calor generado por el proceso; la zona afectada termomecánica (ZATM), generada por el calor y agitación del material, y finalmente la zona de agitación (ZA), donde se produce la mezcla de los materiales. También se analizó: el diámetro del pin de la herramienta, la velocidad de avance, temperatura y tiempo del proceso y se menciona las siguientes condiciones para una junta de calidad: un diámetro del pin más grande, una baja velocidad de desplazamiento y una alta temperatura de fricción [41].

Por otra parte, Arici y Sinmaz, también abordan el efecto de los parámetros del proceso de soldadura (FSW) en láminas de polietileno de 5 mm de espesor. Estos autores proponen una segunda soldadura o pasada sobre el primer cordón generado previamente, obteniendo mejores resultados al eliminar defectos de raíz que resultaban en la primera soldadura [42].

Así mismo, Arici y Selale propusieron el proceso de FSW en láminas de polietileno de 5 mm de espesor mediante la inclinación del herramental de aproximadamente 1°, observándose una mejoría en la resistencia a la tracción de los materiales. Este efecto fue correlacionado entre los parámetros del proceso de soldadura y los resultados de tracción [43].

El proceso FSW permite unir materiales disímiles, por ejemplo, metal con polímero; como en las investigaciones de Pritam Kumar y colaboradores, donde aplicaron la soldadura por fricción-agitación por puntos (FSSW, Friction stir spot welding), trabajando sobre una configuración tipo sándwich de aleaciones de aluminio y polietileno de alta densidad (AA5052-H32 / HDPE / AA5052-H32). Los materiales acomodados en forma de sándwich representan un material híbrido que consta de dos láminas metálicas separadas por una capa de polímero intermedia (o núcleo), menos densa y menos rígida. Se menciona que la velocidad óptima de rotación para soldar estos los materiales fue de 1800 rpm. [44].

Por otro lado, Adeel Zafar y colaboradores, también concluyen que ciertos parámetros óptimos durante el proceso FSW en polímeros, proporcionan mejores resultados en las propiedades mecánicas. En esta investigación, se utilizan 6 pins o geometrías diferentes del herramental para soldar diferentes polímeros mediante esta técnica, con el fin de determinar los perfiles proporcionando las mejores propiedades mecánicas. Los perfiles de pines utilizados fueron: cónico, cilíndrico, cuadrado, triangular, hexagonal y por último, un pin cilíndrico-roscado. Es este trabajo se menciona que los resultados varían de un perfil de pin a otro; por ejemplo, el pin cónico funciona mejor para un ABS y un polietileno mientras que un pin cilíndrico roscado se considera más adecuado para un polipropileno. Al origen de este comportamiento, está que a cada perfil de pin corresponde un determinado flujo de material [10].

Nasser Sadeghian y Mohammad Kazem, llevaron a cabo la soldadura por fricción-agitación de placas de ABS con dimensiones de 150-100 mm y 8 mm de grosor. En este trabajo se hace alusión a los principales factores a considerar para llevar a cabo una buena soldadura; revelándose la geometría y tamaño del pin como los parámetros con mayor influencia, al

igual que la velocidad de giro y la velocidad de avance. Estos autores utilizaron dos geometrías para el pin; cilíndrica y cónica. Los parámetros del proceso utilizados en este estudio fueron los siguientes: con una inclinación de 2° y geometría cónica, velocidad de giro de 900 rpm y una velocidad de avance de 25 mm/min, se obtuvieron los mejores resultados, con una eficiencia en la unión cercana a la del material base; obtenidos mediante ensayos de tensión. Adicionalmente en este trabajo, se proponen dos ecuaciones que permiten predecir el valor de la resistencia a la tracción; una primera ecuación para la herramienta cónica y la segunda para la herramienta cilíndrica. Los resultados teóricos se aproximan suficientemente a los resultados experimentales [45].

Por otro lado, Arvin Bagheri y colaboradores, mencionan en su trabajo de investigación el sensible incremento de aplicaciones de plásticos de ingeniería, y la consecuente demanda de métodos de soldadura rápidos y confiables para unir estos materiales. Estos autores llevan a cabo uniones en placas de ABS; introduciendo un sistema de calentamiento interno incorporado en el herramental; las temperaturas utilizadas fueron: 50, 80 y 100 °C. Adicionalmente, también introducen un hombro fijo conteniendo al pin giratorio, de tal manera que únicamente el pin realiza la fricción y la mezcla del material. Finalmente, se evaluó la resistencia a la tracción de las piezas soldadas y se correlacionaron con los parámetros del proceso. Los resultados de estos autores arrojan una soldadura con una eficiencia de unión máxima, al emplear la temperatura del herramental de 100 °C, con una velocidad de giro de 1600 rpm y 20 mm/min de avance; el valor máximo a la tensión fue de 88.8% respecto al material base. [46].

Por otra parte, Mendes y colaboradores estudiaron el efecto de las velocidades de rotación y desplazamiento de la herramienta, así como la fuerza axial, sobre la calidad de las soldaduras realizadas mediante esta técnica en placas de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), utilizando una herramienta con hombro estacionario, velocidad de rotación de la herramienta entre 1000 y 1500 rpm, velocidad de desplazamiento entre 50 y 200 mm/min y una fuerza axial que oscila entre 0.75 y 4 kN. Los resultados arrojan que las soldaduras obtenidas tienen una resistencia a la tracción por debajo del material base, alcanzando un valor máximo de

poco más de 60 % para soldaduras hechas con máxima velocidad de rotación y fuerza axial. Las soldaduras con alta resistencia a la rotura se lograron también, utilizando la fuerza axial y velocidad de rotación máxima. Además en este trabajo se menciona que el precalentamiento no tendría efectos en la calidad de la unión [47].

También, Ehsan Azarsa y Amir Mostafapour realizaron uniones de placas de polietileno de alta densidad (HDPE) mediante FSW y mencionan al igual que otros autores, que la calidad de la soldadura (FSW) está influenciada por los parámetros del proceso y que la determinación de los parámetros juega un papel importante en la resistencia de la unión. La herramienta que utilizaron en el proceso consiste de un pin giratorio con un hombro estacionario y un sistema de calefacción dentro del hombro estacionario; pero a diferencia de otros autores, Ehsan y Amir, utilizan 3 temperaturas distintas (70, 110 y 150°C), siendo estas temperaturas un poco más elevadas en comparación con otros autores mencionados que realizan experimentaciones similares. Se concluye que la aplicación de calor de manera externa al proceso favorece la mezcla y la unión de los materiales, pero la temperatura debe ser moderada y controlada ya que a altas temperaturas la resistencia de la unión en los materiales disminuye; tal es el caso utilizando una temperatura de 150°C, ya que se producen defectos tales como porosidades en el cordón de la soldadura. Algunos otros autores utilizan distintos métodos para evaluar la resistencia mecánica de las uniones, en este estudio los autores evaluaron la soldadura mediante un ensayo de flexión. Los parámetros de soldadura óptimos para lograr la máxima resistencia a la flexión fueron: velocidad de rotación de la herramienta de 1400 rpm, velocidad de desplazamiento de la herramienta de 25 mm/min y una temperatura del hombro de 100 °C. Bajo estas condiciones, la resistencia a la flexión fue de aproximadamente 96% respecto al material base [48].

Así mismo, Mehdi Pirizadeh y colaboradores mencionan que en el proceso de FSW de termoplásticos las herramientas tradicionales usualmente producen defectos en las probetas que se sueldan, dicho defecto le denomina “defecto de raíz”. Lo anterior conduce a una mala unión y baja resistencia a la tracción de las piezas soldadas, para lo cual desarrolló una herramienta con dos hombros que tocan tanto la parte superior e inferior de las piezas a soldar

(placas de ABS). Como resultado, la herramienta con este diseño elimina con éxito dichos defectos en las piezas soldadas. Mencionan además que dentro de los parámetros existen valores óptimos para alcanzar una buena unión y con esto una alta resistencia a la tracción [49].

Por su parte, Panneerselvam y Lenin, mencionan que el Nylon-6 es uno de los materiales poliméricos con muchas aplicaciones en ingeniería y es necesario un estudio sobre las propiedades de unión de este material mediante la técnica de soldadura por fricción-agitación. Utilizan este método de soldadura para unir placas de Nylon-6 de 10 mm de grosor con un pin cilíndrico con rosca ya que a diferencia de otros autores el pin se encuentra liso. El proceso FSW de Nylon-6 se llevó a cabo con una velocidad de rotación de la herramienta de 1000 rpm y velocidad de avance del herramental de 10 mm / min. Además, el objetivo de este estudio fue averiguar el efecto de la dirección en la que gira la herramienta y reducir los defectos de soldadura. Se encontró que la unión fabricada con rotación del pin dirigida en sentido contrario a las agujas del reloj produjo soldaduras sin defectos con mejores propiedades en el material [50].

Así mismo, Imad y colaboradores, exponen en su publicación la soldadura por fricción-agitación de láminas de poliamida. Estos autores realizan ensayos mecánicos para evaluar la soldadura; no obstante, además de realizar ensayos de tracción, realizan ensayos de impacto. Estos ensayos se estudian bajo los diferentes parámetros utilizados del proceso de soldadura, y los resultados muestran que la resistencia de las soldaduras aumenta cuando aumenta la velocidad de rotación de la herramienta, hasta un cierto valor. Sin embargo, aumentos adicionales en la velocidad de rotación disminuirán la resistencia de las soldaduras. Con respecto a la velocidad de recorrido de la herramienta o velocidad de desplazamiento, se concluye que la resistencia de las soldaduras disminuye cuando aumenta la velocidad de desplazamiento. La resistencia máxima a la tracción de la soldadura obtenida fue de alrededor de 8.51 MPa. Dado que la resistencia a la tracción del material base es de 15,57 MPa, la resistencia de la unión con los mejores parámetros de soldadura fue de 55% en comparación con el valor de resistencia a la tracción del material base [51].

Jaiganesh y colaboradores mencionan que en la soldadura por fricción-agitación de los termoplásticos, las herramientas tradicionales forman una hendidura en la parte posterior de la soldadura que conduce a un defecto en la raíz, causando una resistencia a la tracción deficiente. A diferencia de los autores antes mencionados que utilizan polipropileno, estos investigadores, sueldan mediante FSW placas de HDPP (high density polypropylene) denominado como "polipropileno de alta densidad", utilizando 3 geometrías distintas del pin: cuadrado, cilíndrico y cónico. En esta investigación, los parámetros de estudio de la soldadura fueron 800-1200 rpm con velocidad de giro de la herramienta, una velocidad de avance de la misma de 40-200 mm/min y una carga axial de 1-5 KN. Los mejores resultados de soldadura, correspondieron con el uso de un pin con geometría cónica. Se encontró que el límite elástico del material mejor soldado fue de 10 MPa, casi el 45% de la resistencia del material base [52].

Sadegh y colaboradores investigaron los efectos de los principales parámetros de la soldadura por fricción-agitación, y evalúan las propiedades de fluencia de las uniones de placas de polietileno (HDPE). Las variables para el análisis de soldadura fueron la velocidad de rotación (450, 560, 710, 900, 1120, 1400 y 1800 rpm), velocidad transversal (10, 12.5, 16, 20, 25 y 31.5 mm/min), geometría de la herramienta (cónica y cilíndrica) y ángulo de inclinación de la herramienta (0, 1 y 2°). Se llevaron a cabo pruebas de dureza en las placas soldadas, utilizando una carga constante de 1 kg-f durante 0.5, 2, 5, 15, 30, 60, 90 y 120 min. Se describe en este artículo que hay varios métodos para evaluar las propiedades de fluencia de los materiales mediante ensayos de dureza, utilizando ecuaciones recomendadas por otros investigadores. Estos autores, comparados con otros autores que utilizan una inclinación del herramental de 1° o 2° para soldar, concluyen que la calidad de la soldadura y la resistencia a la fluencia de las muestras unidas disminuyen con una inclinación, recomendando no inclinar la herramienta. Además, se menciona que una herramienta cilíndrica proporciona mejores resultados de unión que una herramienta cónica. También refiere que las geometrías de los herramientas son relativamente independientes de los parámetros del proceso de soldadura FSW. Los resultados mostraron que la resistencia a la fluencia de las soldaduras obtenidas son mejores que las del material base [53].

Las condiciones termomecánicas durante la soldadura por fricción-agitación (FSW) de metales han sido objeto de análisis en la literatura, en lo que concierne a la FSW de polímeros, la información al respecto es aún muy escasa. Algunos esfuerzos son de Simoes y Rodrigues que realizaron un análisis del flujo de material y los fenómenos termomecánicos teniendo lugar durante la soldadura del polimetilmetacrilato (PMMA). Durante la unión, se registró la evolución de la temperatura en la superficie de los cordones de soldadura utilizando una cámara infrarroja. Se realizó un análisis de las tensiones residuales en las diferentes zonas de soldadura así como la morfología de la misma. Concluyen que las condiciones termomecánicas son desiguales a las registradas durante la soldadura de metales, lo que lleva a mecanismos de flujo de material y morfologías de defectos de soldadura considerablemente diferentes [54].

El proceso FSW se lleva a cabo hasta una cierta distancia, es decir, a lo largo de los materiales que se desean unir. Dashatan y colaboradores realizaron un tipo de soldadura por fricción el cual consiste en unir los materiales mediante una pequeña soldadura en una zona o región de los materiales. Este proceso de soldadura se le conoce como; soldadura por fricción en puntos (FSSW), siendo un nuevo método de unión con aplicaciones recientes en materiales poliméricos. Mediante esta técnica se unieron; polimetil-metacrilato (PMMA) con acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). El proceso de soldadura por puntos consiste en tres pasos que son: 1) el contacto entre el material y la herramienta, 2) la unión, que se lleva a cabo por el calor generado por la fricción y 3) la retirada de la herramienta. Esta investigación analizó el efecto de los parámetros sobre las propiedades mecánicas de la unión. Los autores mencionan que mientras menor sea el calor generado por la fricción menor será la mezcla de ambos materiales. Si el calor generado por la fricción aumenta, al incrementar el tiempo de la fricción, se genera una buena unión de los materiales y buena resistencia de la soldadura. Se demuestra que mediante este tipo de soldadura es posible unir estos dos materiales antes mencionados [55].

De igual manera, Jicheng Gao y colaboradores investigan las propiedades mecánicas y morfológicas resultantes de la unión disímil de polietileno de alta densidad (HDPE) con ABS.

Se configuró el proceso para adaptar un depósito o estanque conteniendo agua, hasta la superficie de los polímeros, para llevar a cabo el proceso de soldadura. En el proceso se agregaron diferentes cantidades de nanotubos de carbono, con el propósito de evaluar los efectos que tienen estos sobre las uniones. Dentro de la evaluación mecánica se encuentran ensayos de tensión, además de un análisis macro y micro-estructural de la unión. Finalmente estos autores mencionan que es factible producir excelentes uniones utilizando el depósito de agua. El uso de los nanotubos de carbono desempeña un papel importante en la mejora de la resistencia a la tracción y en la microestructura de la junta soldada. El valor más alto obtenido de resistencia a la tensión fue de 14.7 MPa que representa un 65.3 % respecto al HDPE [56].

Shayan Eslami describe el proceso FSW en materiales poliméricos disímiles, utilizando diferentes herramientas, como el hombro estacionario. Un esfuerzo importante fue dirigido al desarrollo de herramientas que permitan unir los materiales poliméricos. Se probaron diferentes geometrías del pin para analizar la calidad y apariencia de las soldaduras. Con el hombro estacionario se comprobó que se obtienen cordones de soldadura más uniformes; es decir, las uniones producidas con la configuración de la herramienta mejoraron la calidad de la superficie de las soldaduras y la resistencia. Cabe mencionar que dentro de ésta investigación se utilizaron hombros de diferentes materiales siendo estos de: aluminio, madera, bronce y teflón obteniéndose los mejores resultados con el último material mencionado. Además, concluye que el pin debe tener cierta geometría para promover el flujo y mezcla de los materiales. Finalmente, los materiales a unir fueron poliestireno y polipropileno en una configuración a traslape. Se obtuvo una resistencia a la tensión de 50% respecto al valor del polipropileno (28 MPa) [57]. Este mismo autor investiga la técnica de soldadura con dos materiales poliméricos disímiles: polietileno con polipropileno, centrándose en la evaluación de los parámetros de la soldadura, la herramienta y ensayos de tensión, entre otros aspectos. A diferencia de la investigación anterior, utilizó una termocupla dentro de la herramienta (hombro), para cuantificar el calor generado para cada parámetro utilizado; sin embargo, señala que este método de medición de temperatura no es confiable ya que no detecta una temperatura exacta para un punto en específico del cordón de

soldadura, aunque permite obtener una buena estimación de la temperatura de operación durante el proceso de unión. Además, menciona que no hay diferencia en los cordones de soldadura al usar un pin plano y uno con geometría triangular. El máximo valor a la tensión se obtiene con una velocidad de rotación de 2500 rpm y con una velocidad de avance de 100 mm/min [58]. En otra investigación, Eslami unió mediante FSW dos materiales: Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y polipropileno (PP). Estos polímeros se unieron en una configuración a traslape valorando posteriormente la resistencia a la fatiga. La vida útil de las soldaduras más fuertes se comparó con el material base de mayor rendimiento (PP). En general, los materiales unidos mediante FSW demostraron ser confiables bajo condiciones de estrés cíclico [59].

El extenso uso de polímeros en numerosas industrias ha incitado a los investigadores a promover la unión y ensamblaje de estos materiales, Hajideh trata estos aspectos en su publicación. Este autor se enfoca en los efectos que tienen las distintas geometrías de las herramientas (pin) para llevar a cabo la soldadura en un proceso FSW para uniones disímiles: polietileno con polipropileno. Utilizó cuatro geometrías diferentes de herramienta para unir estos materiales, que fueron: pin con forma de tornillo, cilíndrico, cuadrado y triangular. También analizó la interacción de las variables del proceso, como; velocidad de rotación y velocidad de avance. Para controlar el flujo de los materiales utilizó en la herramienta un hombro estacionario. Llevó a cabo ensayos de tensión de las soldaduras obtenidas, dureza e hizo un análisis microestructural de las uniones. Concluyó que con la herramienta con el pin tipo tornillo se obtiene el mejor desempeño en el proceso de soldadura; comprobando mediante microscopía de barrido la mejor uniformidad y mezcla generada con esta geometría. Otra conclusión fue que la influencia de la geometría de la herramienta fue mayor sobre la calidad de la soldadura, comprada con los parámetros del proceso. Es decir, la geometría del pin es independiente de las variables de soldadura, ya que a una velocidad de rotación de 1860 rpm y una velocidad de avance de 12.5 mm/min, encontró las mejores propiedades mecánicas para cada una de las geometrías del pin utilizadas. Bajo los parámetros previamente mencionados, se obtuvo una resistencia de la soldadura del 98% respecto al polietileno y una mayor dureza respecto al mismo material [60].

Dentro de esta revisión bibliográfica se pueden mencionar los siguientes artículos, los cuales describen una unión disímil de termoplásticos; si bien no es un proceso FSW, pero se refiere el mismo principio que es la fricción. A este proceso se le conoce como soldadura por fricción (FW). En este procedimiento de unión se hace girar una pieza cilíndrica, donde uno de los extremos entra en contacto con otra pieza similar mientras que, bajo presión, gira creando fricción y genera calor entre las dos superficies, plastificando los materiales. En la Figura 3 se ilustra este proceso.

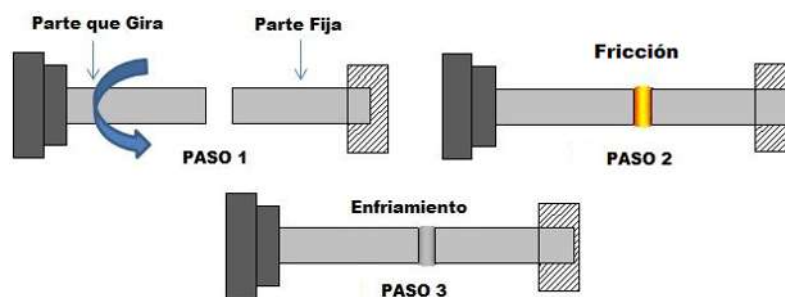


Figura 3. Soldadura por fricción.

Singh menciona en su investigación que la soldadura por fricción es uno de los procesos establecidos para la unión de polímeros similares y disímiles. Utiliza este proceso para unir ABS con Nylon 6, adjuntando polvo de hierro y polvo de aluminio como material de refuerzo. Se prepararon cilindros de estos materiales en una máquina por moldeo a presión en caliente. Los estudios de la soldadura para estos plásticos se realizaron considerando tres parámetros del proceso: velocidad de rotación, velocidad de avance y tiempo necesario para realizar la soldadura. Se verificó la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas y metalúrgicas, como: resistencia a la tracción, dureza Shore D y porosidad en la junta. Los resultados muestran valores diferentes para cada propiedad evaluada con cada uno de los polvos de metal utilizados; es decir, para obtener uniones óptimas (en cada caso), se utilizan parámetros diferentes. No obstante, los estudios sugieren que estos materiales

poliméricos disímiles con la adición de polvo de metal como refuerzo pueden unirse con éxito bajo este proceso de soldadura por fricción [61].

Adicionalmente, un artículo escrito por Kumar describe la metodología de soldadura anteriormente mencionada. En su trabajo de investigación utiliza ABS con poliamida (PA6), con polvo de hierro como refuerzo, menciona que esta soldadura sin aditamentos (polvo de hierro), no se logrará, concluyendo que la concentración de este aditivo es crucial en la unión debido a las propiedades de fusión de los materiales. Realiza ensayos conocidos como; *melting flow index (MFI)*, ó índice de flujo de fusión, que es considerado como una de las principales propiedades de los polímeros y determina el comportamiento reológico de estos materiales. Utiliza distintas concentraciones de polvo de hierro en ambos materiales para medir el MFI en cada polímero, encontrando que con una adición de 40 % en peso en cada material las propiedades reológicas son similares. Bajo estas circunstancias, se logró generar la soldadura de los materiales disímiles. El autor menciona también que la soldadura mediante este método no se puede llevar a cabo mientras los materiales no posean el MFI similar [62].

Finalmente, el mismo autor realiza un análisis MFI en polietileno de media y baja densidad para analizar su índice de flujo de fusión para llevar ambos materiales disímiles al proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW). Al igual que en su trabajo anteriormente señalado, utilizó un reforzamiento de polvo de hierro en los materiales. Concluyó que el MFI no es considerado como parámetro significativo para unir polímeros disímiles en el proceso de soldadura por fricción-agitación. Entonces, la soldadura de estos materiales es posible en FSW sin tener índices de flujo de fusión similares [63].

La presente investigación en el marco de esta tesis Doctoral, se centra en la unión de materiales poliméricos disímiles mediante la técnica FSW, y su posterior evaluación mediante pruebas mecánicas sobre las uniones resultantes.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo en el marco de esta Tesis Doctoral. A continuación, se describen las etapas que se siguieron para llevar a cabo la presente investigación:

- a) Selección de los materiales para el proceso de soldadura. La elección de los polímeros estuvo en función de la disponibilidad y del uso de los mismos.
- b) Obtención, corte y preparación de los materiales poliméricos.
- c) Unión de los materiales por medio de la técnica de soldadura por fricción-agitación.
- d) Análisis de las variables de proceso sobre las propiedades mecánicas resultantes.
- e) Pruebas mecánicas en los materiales soldados. Las pruebas mecánicas consistieron en ensayos de tensión, ensayos de dureza, visualizaciones mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.

2.2. SELECCIÓN DE MATERIALES A UNIR MEDIANTE FSW.

Ciertos componentes plásticos necesitan unirse de manera adecuada, sustituyendo los métodos de sujeción tradicionales como: tornillos, pegamentos, etc. Una alternativa para el logro de estos fines, es la unión de termoplásticos mediante la soldadura por fricción-agitación. Los materiales que se eligieron para la realización de esta Tesis Doctoral, tuvieron como sustento las amplias aplicaciones que se presentan en los usos industriales; además, la investigación de uniones disímiles mediante de soldadura FSW es de interés y poco desarrollada actualmente. Santosh en su publicación que trata sobre soldadura por fricción-agitación de placas de polipropileno, presenta una tabla con los porcentajes de utilización de los termoplásticos que se han unido mediante esta técnica de soldadura. Para el caso del ABS señala que se ha usado un 24% de este termoplástico en procesos FSW en comparación con otros termoplásticos según lo reportado; mientras que para el UHMWPE solo un 4 % se ha empleado mediante este proceso de unión [64] .

Los dos materiales antes mencionados fueron utilizados en esta Tesis Doctoral; para el caso del UHMWPE, el principal interés fue el análisis de este material bajo condiciones de soldadura por fricción-agitación, puesto que la información disponible es muy limitada actualmente. Este autor en su investigación señala que el HDPE es el material polímero más utilizado bajo esta técnica de unión (FSW); mientras que el polipropileno (PP), teniendo propiedades físicas similares con el anterior, presenta algunas ventajas sobre el HDPE. Para el desarrollo de esta tesis Doctoral, se llevaron a cabo las uniones entre placas de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y polipropileno (PP); y también la unión disímil entre placas de ABS y PP. La investigación inició con la soldadura de estos dos últimos materiales, debido a un remanente de los mismos, relacionados con una previa investigación de Tesis Doctoral bajo el mismo método de soldadura [65]. A continuación, se presentan las características y propiedades de los materiales utilizados en este trabajo.

2.2.1 ACRILONITRILO-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS)

El acrilonitrilo-butadieno-estireno mejor conocido como ABS es el nombre asignado a una familia de termoplásticos. A este material se le denomina “plástico de ingeniería”, debido a que su elaboración y procesamiento es más complejo en comparación que los plásticos comunes, tales como: PET (tereftalato de polietileno), PVC (policloruro de vinilo), PS (poliestireno), entre otros tipos de plásticos. La sigla ABS derivan de los tres monómeros utilizados para producirlo, que son: el acrilonitrilo, butadieno y estireno. Al estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques). Los bloques de acrilonitrilo proporcionan rigidez, resistencia contra ataques químicos y estabilidad a alta temperatura, así como dureza. Los bloques de butadieno, que es un elastómero, proporcionan tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente interesante para ambientes fríos, en los cuales otros plásticos pierden sus propiedades y se vuelven quebradizos. El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez. Esta mezcla de propiedades, llamada sinergia, genera un producto final con mejores propiedades, que las propiedades individuales de cada monómero que compone el ABS.

2.2.1.1. ESTRUCTURA DEL ABS

La estructura del ABS es una mezcla de un copolímero vítreo (estireno- acrilonitrilo), y un compuesto elástico principalmente el polímero butadieno. La estructura con la fase elastómera del polibutadieno (forma de burbujas), inmersa en una dura y rígida matriz SAN (estireno-acrilonitrilo). En la Figura 4 se muestra la estructura compuesta por el acrilonitrilo-butadieno- estireno.

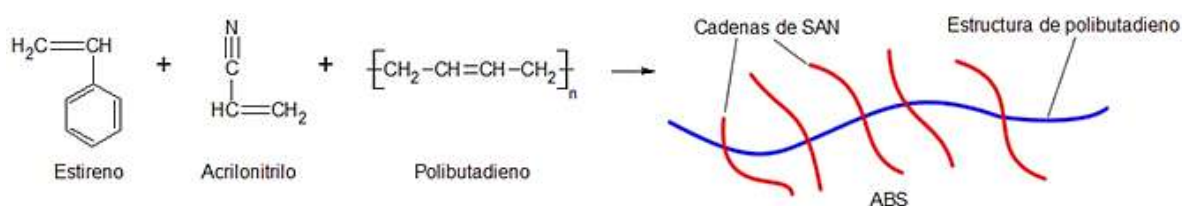


Figura 4. Estructura del ABS.

2.2.1.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL ABS.

Todos los objetos formados de ABS o que contengan parte de este polímero, tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesamiento. La resistencia al impacto de este material se incrementa al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno, aunque disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y la temperatura de deformación también.

El amplio rango de propiedades físicas y químicas que exhibe este polímero es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes, por ejemplo: El *acrilonitrilo* proporciona: resistencia térmica, resistencia química, resistencia a la fatiga, dureza y rigidez; el *butadieno* proporciona: ductilidad a baja temperatura, resistencia al impacto, resistencia a la fusión; el *estireno* proporciona: facilidad de procesamiento (fluidez), brillo, dureza y rigidez.

2.2.1.3 USOS Y APLICACIONES DEL ABS

El ABS se caracteriza por ser un polímero muy fuerte y liviano, cuyas aplicaciones se encuentran en la fabricación de piezas para automóviles (tableros, paragolpes, piezas decorativas tanto en el interior como en el exterior, etc.). El empleo de este plástico reduce el peso total de los automóviles, reduciendo así el uso de combustibles. También se utiliza en electrodomésticos tales como: carcasas de taladros, televisores, radios, aspiradoras, máquinas de coser y secadores de cabello, máquinas de oficina, carcasas de computadoras, teléfonos, etc. El ABS puede crear variadas combinaciones de colores. Dependiendo del molde utilizado, las superficies pueden ser opacas, brillantes o satinadas; también puede ser cromado por electrólisis, estampado o metalizado. Por último, la composición en el ABS es: 20-30% de acrilonitrilo, 20-30% de butadieno y 40-60% de estireno. Los fabricantes modifican los porcentajes de los componentes antes mencionados para ofrecer diferentes propiedades. La Figura 5 muestra algunos objetos hechos de material ABS. [66][67][68][69][70].



Figura 5. Usos y aplicaciones del acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).

2.2.2 POLIPROPILENO (PP)

El polipropileno, también nombrado PP por sus siglas, es el segundo material más utilizado para la producción de plásticos moldeados, desplazando los materiales cerámicos y metálicos

por las bondades de sus propiedades. Este material es un tipo de plástico que empezó a desarrollarse en la segunda mitad del siglo XX, aunque no fue hasta los años 80 que su uso se expandió por todo el mundo y en aplicaciones muy variadas. Hoy en día, su uso está diversificado en industrias de todo tipo y su demanda alcanza aproximadamente 55 millones de toneladas al año.

El polipropileno pertenece a la familia de los polímeros termoplásticos con una apariencia parcialmente cristalina, procesado por la industria química y distribuido con diferentes pesos moleculares de acuerdo con su finalidad. Al ser termoplástico, este tipo de material se puede moldear fácilmente aplicándole calor para conseguir la forma que se desea. Este material es un plástico recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), para estar en contacto con los alimentos: el polipropileno es totalmente seguro y solo podría ser tóxico o peligroso si se fundiera y entrara en contacto con la piel; siendo estos escenarios poco probables. Finalmente está considerado como un plástico ecológico, ya que sus propiedades permiten que este material polimérico se pueda reciclar.

2.2.2.1 ESTRUCTURA DEL POLIPROPILENO

El polipropileno, con fórmula $(C_3H_6)_n$, es una resina sintética producto de la polimerización del propileno. Las moléculas de PP se componen de una cadena principal de átomos de carbono e hidrogeno enlazados entre sí, de la cual cuelgan grupos metilo (CH_3 -). En la Figura 6 se muestra la estructura del PP.

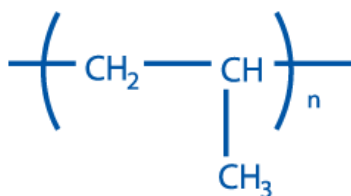


Figura 6. Estructura del polipropileno (molécula).

2.2.2.2. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO

Entre las principales ventajas del polipropileno destacan las siguientes:

- Buena estabilidad térmica, elevado punto de fusión (alrededor de 160°C), que lo hace adecuado para trabajar a relativas altas temperaturas,
- Baja absorción de humedad, sin daño al contacto con el agua,
- Gran resistencia mecánica, tanto al impacto como a la fatiga; es un material rígido,
- Resistencia química: el polipropileno es altamente resistente a la corrosión tanto por agentes ácidos como por agentes alcalinos; también es muy resistente a la acción de detergentes y sustancias electrolíticas,
- Ligereza; es uno de los plásticos con menor densidad, facilitando la fabricación de productos ligeros,
- Buena relación costo/beneficio,
- Sirve como aislante eléctrico,
- Es un material fácil de reciclar; se puede identificar con el número 5 como código de identificación de resinas junto a las siglas PP,
- Gran versatilidad, compatible con la mayoría de técnicas de procesamiento.

2.2.2.3 USOS Y APLICACIONES DEL POLIPROPILENO

Varias industrias utilizan las ventajas mencionadas anteriormente del polipropileno. De hecho, sería difícil encontrar e identificar aquellas industrias que no utilizan el potencial de este material universal, duradero y seguro. Las áreas más comunes y principales usos del PP incluyen:

- Industria alimentaria y producción de envases, botellas, botes, artículos para el hogar recipientes para comida y envases alimentarios e incluso algunos juguetes.
- Industria química y farmacéutica; en particular la producción de tuberías y conductos para la transmisión de agua y medios químicamente agresivos. Además, el PP

también se utiliza para producir recipientes de laboratorio, filtros, accesorios médicos y equipos de diagnóstico y jeringas desechables.

- Industria textil; incluida la producción de alfombras, tapetes, tejidos, cuerdas, fibras sintéticas y determinadas herramientas.
- Industria del mueble y la construcción; por ejemplo: aislamiento de estructuras de edificios, accesorios de baño, cables en instalaciones de gas y calefacción central, producción de muebles y accesorios para muebles; la restauración de la cúpula de la Catedral de San Cristóbal de La Laguna (España) realizada en el 2002, se construyó con fibras de polipropileno, Figura 7.
- Industria del automóvil; en particular la producción de partes de carrocería, parachoques, elementos de espejos, accesorios de cabina.
- Aplicaciones eléctricas y electrónicas; como aislante, el polipropileno se elige como alternativa al PVC para aislar cableado.
- Producción de maletas, contenedores, cubos y tanques pequeños, por ejemplo, para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas [71][72][73][74][75][76][77].

En la Figura 7 se muestran ciertos elementos fabricados con polipropileno.



Figura 7. Usos y aplicaciones del polipropileno.

2.2.3 POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE).

Por su acrónimo en inglés se le conoce como UHMWPE (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*). Se trata del polietileno más pesado de esta familia de los polietilenos y sus propiedades lo clasifican comúnmente entre los plásticos de ingeniería. Las propiedades del polietileno de ultra alta masa molecular son diferentes a los otros tipos de polietilenos (polietileno de baja, media y alta densidad), debido básicamente a su alto peso molecular. Esto implica que sea mucho más denso provocando que sea resistente, y en ciertas aplicaciones, puede sustituir algunos metales. Este material empezó a ser desarrollado en 1950 por la empresa alemana *Ruhrchemie AG*. Desde la década de 1960, el UHMWPE también ha sido el material de elección para implantes ortopédicos; posteriormente, empezó a usarse de forma comercial por la empresa química holandesa *DSM* (Dutch State Mines).

2.2.3.1 ESTRUCTURA DEL UHMWPE

El UHMWPE está formado por una microestructura semicristalina, es decir, que consta de regiones cristalinas y amorfas (alrededor de 50% cada una). Ambas regiones están conectadas a través de las moléculas lazo, que son las promotoras de las excelentes propiedades mecánicas de este polímero. La región cristalina está formada por moléculas ordenadas en estructuras lamelares muy definidas, mientras la región amorfa está compuesta por moléculas colocadas aleatoriamente produciendo una alta densidad de ovillamiento (enredo). Algunos factores como su peso molecular, las condiciones de procesamiento (temperatura, presión, etc.), o las condiciones del ambiente, determinan el grado y la orientación de las regiones cristalinas. La larguísima cadena molecular del UHMWPE se puede entender como un gran ovillo. La temperatura a la que son sometidas determina su mayor o menor movilidad; cuando se enfría por debajo de la temperatura de fusión, la cadena molecular del polietileno tiende a doblarse y crear pliegues por los enlaces C=C, hasta quedar completamente ordenadas todas las lamelas cristalinas. En la Figura 8 se muestran los elementos que conforman la estructura del UHMWPE. Este material se sintetiza a partir de su monómero etileno, que se une para formar el producto de polietileno base.

Estas moléculas son de varios órdenes de magnitud más largas que las del conocido polietileno de alta densidad (HDPE); por ejemplo, las moléculas de UHMWPE generalmente tienen alrededor de 100,000 a 250,000 unidades de monómero por cada molécula que compone a este material, comparado con los 700 a 1,800 unidades de monómeros por cada molécula que compone al polietileno de alta densidad.

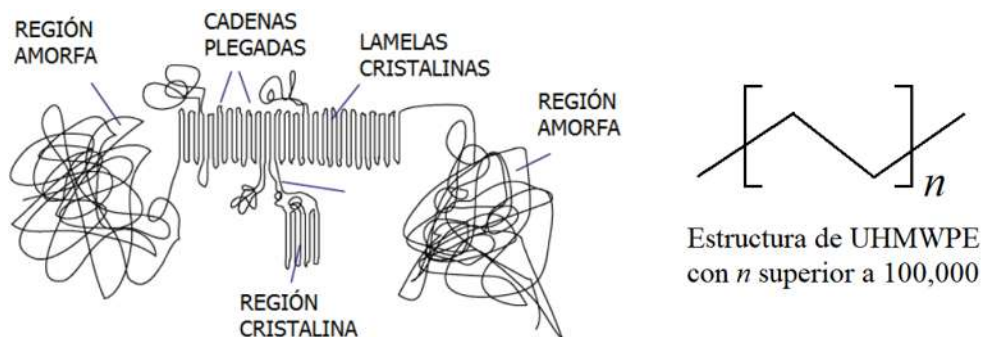


Figura 8. Estructura del UHMWPE

2.2.3.2 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL UHMWPE

Este material termopolímero es inodoro, insípido y no tóxico, mantiene una superficie auto lubricada de bajo coeficiente de fricción, dinámico y estático, que son significativamente inferiores a las presentadas por el acero y por la mayoría de plásticos, con bajo peso: densidad inferior a la del agua. Las propiedades lo convierten en un material de gran resistencia, tanto a la abrasión como a medios agresivos, al impacto y a la fatiga. Es aislante térmico y eléctrico; además, no absorbe agua y posee un grado alimenticio que cumple con la regulación FDA (Food Drugs Administration) para el contacto con alimentos. Además, resistente al ataque químico severo; excelente para ser aplicado en ambientes cáusticos, agua salada, limpiezas a vapor, lavado por "sand blast"; cuando se usa como engranes, mantiene la maquinaria en movimiento sin bloqueos en comparación con los metales. Con este material se producen fibras tan fuertes, que pueden utilizarse para fabricar chalecos a prueba de balas.

2.2.3.3 USOS Y APLICACIONES DEL UHMWPE

Debido a sus propiedades, es el material ideal cuando se trata de fabricar piezas maquinadas como engranes, husillos de transporte, juntas, rodillos, asientos de válvulas, bujes, mesas de cortes, ruedas y sinfines, guías para bandas transportadoras, componentes para tratamientos de aguas, para deslizamiento de productos, recubrimiento de tolvas y todo tipo de piezas mecánicas que necesiten excelente resistencia al desgaste por abrasión y que deban estar en ambientes húmedos. Probablemente sean estas aplicaciones netamente industriales las que mantienen al UHMWPE un poco desconocido. En la Figura 9 se muestran algunos objetos fabricados con este material [78][79][80][81][82][83].



Figura 9. Usos y aplicaciones del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).

2.3 OBTENCIÓN, CORTE Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.

Se utilizaron 3 termoplásticos en esta investigación: (ABS) (acrilonitrilo-butadieno-estireno), PP (polipropileno) y UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular).

En la investigación de tesis doctoral antes mencionada, se realizaron soldaduras bajo la misma técnica de unión (FSW); utilizando placas de ABS; la obtención de este material fue un remanente de la precedente investigación. Para llevar a cabo la soldadura disímil se optó por el polipropileno; este material polimérico fue obtenido en "La Paloma, Compañía De Metales S.A De C.V ", empresa mexicana situada en Morelia, Mich., que comercializa

distintos materiales en distintas medidas y presentaciones. Este material fue adquirido en una presentación de 1m x 35 cm. Para llevar a cabo la unión de los materiales plásticos, estos deben tener ciertas dimensiones, entre las cuales se considera el espesor como un de las más importantes; el espesor de las placas fue de media pulgada (12.7 mm). Se obtuvieron placas con dimensiones de 4 x 17 cm de estos materiales, resultando placas de 8 x 17 cm después de la unión. En la Figura 10 se presentan las placas de los polímeros con las dimensiones antes mencionadas.

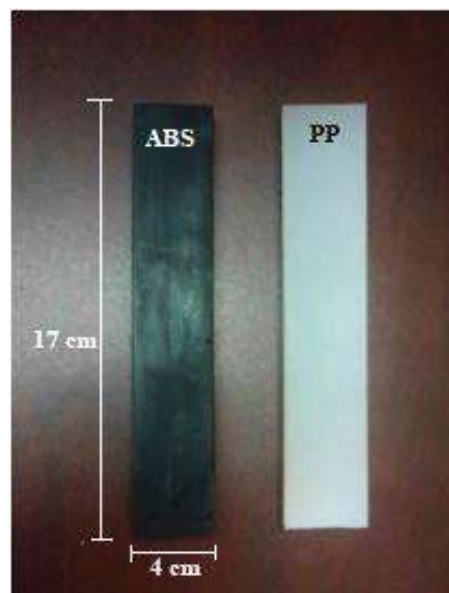


Figura 10. Probetas de ABS y PP para soldarse mediante FSW.

Las placas deben estar limpias, libres de cualquier agente contaminante como algún tipo de aceite o resina, pigmentos o colorantes o cualquier material o cuerpo extraño que pueda afectar la soldadura; en este caso se utilizó acetona o alcohol para la limpieza de las placas. Para el caso del UHMWPE, se obtuvo este material con el mismo proveedor de materiales previamente mencionado. Es pertinente mencionar que para llevar a cabo la presente investigación; un criterio adicional para la selección de este material fue su disponibilidad y su costo; la utilización de otros polímeros podría conducir a costos mayores y dificultad de obtenerlos, conduciendo a retardos en el proyecto de tesis Doctoral.

Se obtuvo una placa grande de este material con las mismas dimensiones mencionadas previamente, aunque los cortes de la placas fueron de: 6 x16 cm. Posterior a la unión del ABS con PP, se procedió a la soldadura entre placas de PP y UHMWPE.

2.4 UNIÓN DE LOS MATERIALES MEDIANTE FSW.

El proceso de soldadura por fricción-agitación abre la posibilidad de unir cualquier material, la implementación de esta técnica de unión en estado sólido en termoplásticos de características iguales o diferentes, resulta factible. En la Tabla 2 se enlistan las propiedades de los termopolímeros: ABS, PP y UHMWPE, utilizados en esta investigación.

Table 2. Principales propiedades mecánicas y físicas de los materiales poliméricos.

	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Temperatura de fusión (°C)	Masa molecular (g/mol)
PP	900	1.3	30	160-168	250,000
ABS	1050	2.3	40	130	105,250
UHMWPE	932-945	0.8- 1.6	39-48	125-138	$2 \times 10^6 - 6 \times 10^6$

Durante el proceso de soldadura FSW, es fundamental la sujeción de los materiales destinados a soldadura; esta sujeción debe ser lo suficientemente fuerte y apropiada para que pueda resistir las fuerzas que se generan por el herramental durante el proceso. La sujeción de los materiales se lleva a cabo mediante piezas metálicas que están adaptadas al equipo CNC de soldadura, que fungen como sujetadores sobre las placas del material a unir, teniendo cuidado que estas piezas no entren en contacto con el herramental. Todos los sujetadores contienen tornillos con sus respectivas tuercas, permitiendo inmovilizar las piezas que se van a unir. Además, los materiales poliméricos deben estar apoyados en una placa de acero que funge como base. En la Figura 11 se distinguen dichas piezas metálicas que son los elementos de sujeción, señalados con un círculo blanco.

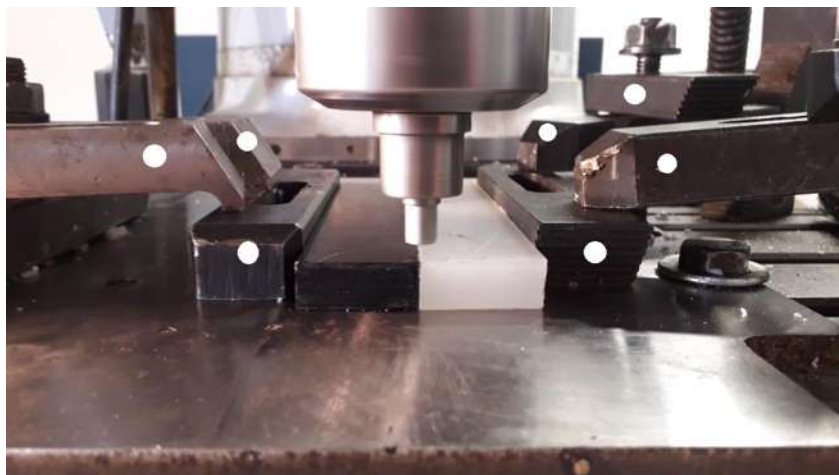


Figura 11. Elementos de sujeción de los materiales poliméricos en el proceso FSW.

2.5 VARIABLES DEL PROCESO FSW.

Antes de realizar pruebas de unión entre el ABS y PP, se llevaron a cabo pruebas de soldadura en cada material. Las pruebas consisten en determinar para cada material los parámetros con los que se obtienen las mejores soldaduras, tomándolos como referencia para seleccionar los parámetros, para el caso de uniones disímiles. La soldadura se llevó a cabo en una fresadora DYNA modelo EM3116, que opera mediante CNC. Los parámetros a evaluar fueron: velocidad de giro del herramental, velocidad de avance, velocidad de penetración y el contacto entre hombro de la herramienta y el material.

Para el caso del PP, se utilizaron dos velocidades de giro: 1060 y 1438 rpm; tres velocidades de avance: 15, 20 y 25 mm/min; cuatro velocidades de penetración: 10, 15, 20 y 25 mm/min; dos geometrías para el pin: cónica y cilíndrica; finalmente, contacto entre el hombro y el material.

Para el caso del ABS se utilizaron 3 velocidades de giro: 600, 1060 y 1438 rpm; cuatro velocidades de avance: 15, 30, 50 y 70 mm/min; tres velocidades de penetración: 10, 15 y 30 mm/min; tres geometrías para el pin: cónica, cilíndrica y cabeza de clavo, y finalmente el

contacto entre el hombro y el material. Para la unión disímil PP y UHMWPE, se utilizaron cinco velocidades de giro: 1100, 1500, 2000, 2500 y 3000 rpm; dos velocidades de avance: 12.5 y 25 mm/min; y 5 mm/min como velocidad de penetración; pin hexagonal, y contacto entre el hombro y el material.

La geometría de la herramienta desempeña un papel importante en el resultado de la unión, además de los parámetros del proceso. Dependiendo del tipo de pin seleccionado y de los parámetros seleccionados durante la soldadura, se podrá obtener determinadas propiedades mecánicas en los materiales unidos. Las geometrías de pines pueden ser muy variadas: cilíndrica, cónica, cuadradas, triangulares u otras más complejas, por ejemplo, con rosca; mientras que el hombro también puede contar con ciertas morfologías [84]. En el desarrollo de esta tesis Doctoral, se utilizaron 3 puntas (pins), o herramientas denominados: cónico, cilíndrico y cabeza de clavo. En la Figura 12 se ilustran las herramientas con su respectiva geometría y dimensiones.

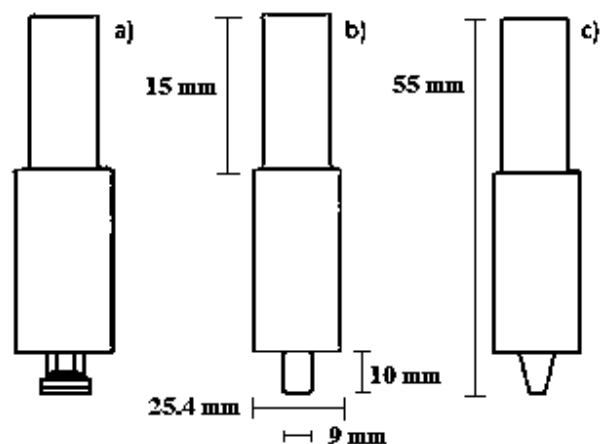


Figura 12. Herramientales utilizados para el proceso de soldadura por fricción-agitación. a) Pin cabeza de clavo, b) Pin cilíndrico y c) Pin cónico.

En el curso de estas investigaciones, se llevó a cabo una modificación en el proceso de soldado para su mejora: para el caso de la soldadura PP-UHMWPE se implementó un hombro

estacionario; tomando como referencia artículos relacionados con el proceso FSW [85]. Para obtener un hombro estacionario, se diseñó un dispositivo que comprende: un balero que presenta un diámetro ligeramente inferior o reducido al diámetro del hombro de la herramienta para que la entrada de la herramienta en el balero sea forzada, quedando fijas y compactadas ambas piezas. En la Figura 13 a), se presenta una herramienta cilíndrica y se puede observar el pin de la herramienta insertada en el balero.

Una vez logrado el ajuste de la herramienta y el balero, se procede a la utilización de una pieza cuadrada metálica (Al 6061-T6), la que tiene la función del hombro estacionario; es decir, esta pieza quedará ajustada al balero permitiendo la salida del pin de la herramienta (Figura 13 b). En estas condiciones, solo el pin de la herramienta queda libre de rotación para efectuar la soldadura, mientras que la placa metálica de aluminio permanecerá en contacto con los materiales, evitando así la expulsión del material durante el proceso de soldado y permaneciendo el material en el cordón de la soldadura, con la consecuente mejora en los resultados de la unión. En la Figura 14 se presenta la configuración de las piezas para llevar a cabo la soldadura por fricción-agitación.

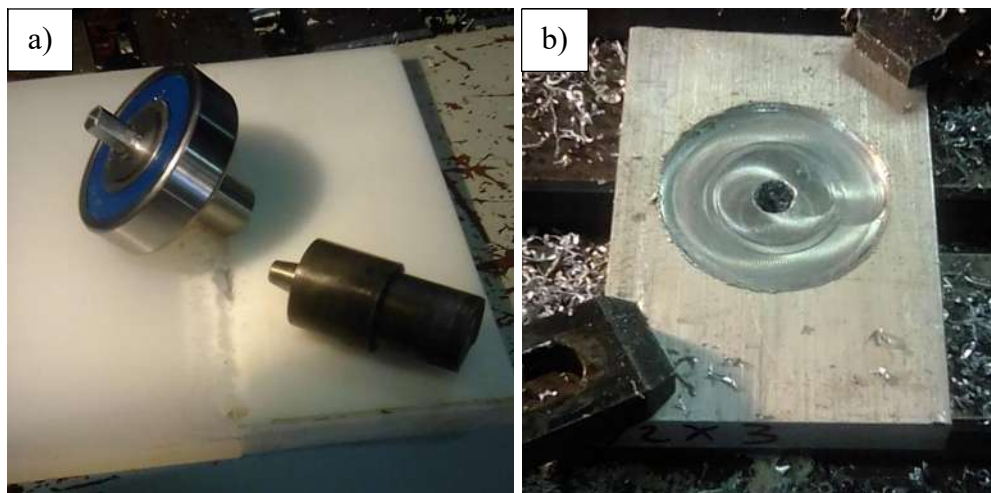


Figura 13. a) Herramienta insertada en el balero, b) placa de aluminio 6061-T6 con preparación para insertarse en el balero.

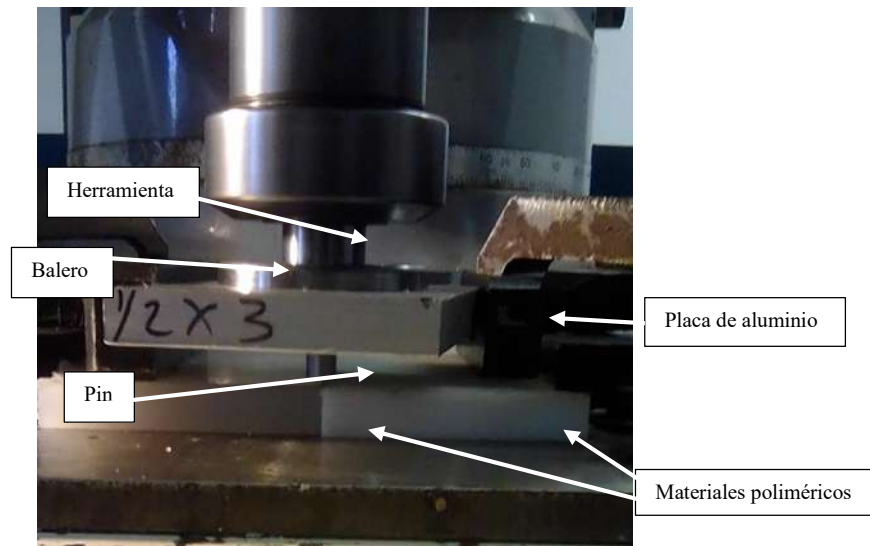


Figura 14. Configuración de la herramienta hexagonal con el balero y la placa de aluminio como hombro estacionario para el proceso de soldadura por fricción-agitación.

De acuerdo a lo reportado por algunos autores que realizan FSW en termoplásticos, donde se aplica un calentamiento previo a la soldadura [86], se procedió a la utilización de un horno marca RCA modelo RC09D1, para someter las placas de PP y UHMWPE a un precalentamiento a 120° C por 30 minutos antes de unirlos. En la Figura 15 se muestra el tipo de horno que se utilizó para el calentamiento de los materiales.



Figura 15. Horno RCA para el precalentamiento de los materiales.

Posteriormente al calentamiento de los termopolímeros, estos fueron sustraídos del horno, montados y sujetos en la máquina de soldadura para llevar a cabo la unión. Durante los ensayos de soldadura se monitoreó la temperatura de los materiales con un termómetro

infrarrojo con puntero laser marca EXTECH 42530 para evaluar la temperatura al inicio y final de la soldadura. Este termómetro infrarrojo realiza mediciones de superficie de objetos que son difíciles de alcanzar, peligrosos al contacto o mediciones de temperatura en procesos. En la Figura 16 se muestra el termómetro laser utilizado para la medición de la temperatura durante el proceso de la unión.



Figura 16. Termómetro con puntero laser para evaluar la temperatura del proceso FSW.

2.6 PRUEBAS MECÁNICAS EN LOS MATERIALES; ENSAYOS DE TENSIÓN, ENSAYOS DE DUREZA, MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Posterior a la soldadura disímil de los materiales utilizados, se procedió a realizar ensayos de tensión para valorar la resistencia de las uniones. Diferentes referencias bibliográficas presentan resultados de este ensayo mecánico de probetas poliméricas [87] [88] [89] [90] [91]; las que se toman como referencia para la realización de dichos ensayos. Se obtuvieron probetas de las placas unidas con las dimensiones establecidas por la norma ASTM D638-14 (Figura 18) para ensayos de tensión [92].

En el caso de la soldadura ABS-PP, no se obtuvieron las probetas bajo la norma antes mencionada, porque las dimensiones de las placas de soldadura fueron más pequeñas para el cumplimiento de la norma. Cuatro piezas de 1.2 cm de espesor, 6.5 cm de largo y 3 mm de

ancho aproximadamente, fueron sometidas a una máquina de tensión que se encuentra en el área de Ingeniería Civil de la UMSNH. Se utilizó una velocidad de 1.5 mm/min como velocidad de tracción. En la Figura 17, se presentan las probetas ABS-PP que fueron sometidas a tensión.

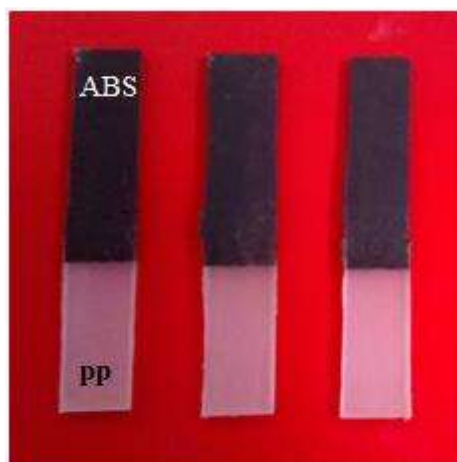


Figura 17. Probetas para ensayos de tensión (PP-ABS).

Para el caso de la unión PP-UHMWPE, se trabajaron 20 soldaduras con parámetros diferentes; se obtuvieron entonces 5 probetas por cada placa soldada con el propósito de realizar los ensayos de tensión. En la Figura 19 se ilustran estas probetas.

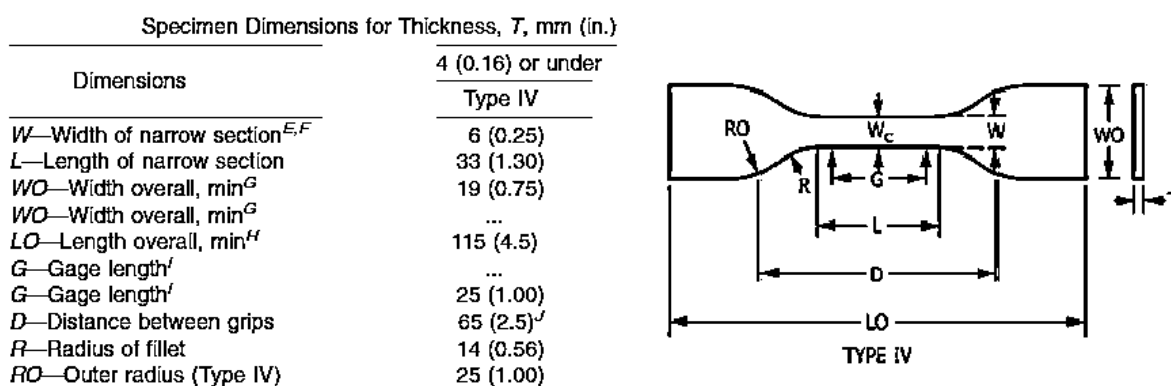


Figura 18. Dimensiones para probetas plásticas destinadas a los ensayos de tensión según la norma ASTM D638-14.



Figura 19. Probetas PP-UHMWPE para ensayos de tensión (norma ASTM D638-14).

Los ensayos de tensión para la unión disímil PP-UHMWPE se realizaron en una máquina Zwick /Roell Z100 (Figura 20), a una velocidad constante de 5 mm/min.



Figura 20. Máquina de tensión Zwick /Roell Z100.

Se obtuvieron perfiles de microdureza de las soldaduras, los cuales se realizaron con un microdurómetro Mitutoyo modelo HM 200, con una carga aplicada de 100 gramos, y con un tiempo de permanencia de indentación de 15 segundos. Las mediciones de microdureza se realizaron en la zona de la soldadura o cordón de soldadura, también conocida como la zona de agitación, y se obtuvieron adicionalmente mediciones en ambos materiales base (polipropileno y polietileno de ultra alto peso molecular) para comparar los valores entre estas zonas. Finalmente, se realizaron visualizaciones con el microscopio electrónico de barrido para hacer un análisis en la zona de unión y alrededores. Estos procedimientos también se aplicaron para la soldadura ABS-PP.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación. La primera parte trata sobre la soldadura mediante la técnica FSW entre el ABS y el PP; posteriormente se presentan los resultados de los ensayos de tensión resaltando la influencia de las variables utilizadas en estas uniones. Posteriormente, se evaluó la dureza en el cordón de soldadura y en los materiales base; así como se llevó a cabo el análisis de las fracturas en las probetas sometidas a ensayos de tensión. Finalmente, se obtuvo el análisis de fractura y difusión de los materiales mediante microscopía electrónica de barrido. La segunda parte estuvo orientada al estudio de la soldadura entre el polipropileno y el polietileno de ultra alto peso molecular.

3.2. SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE MATERIALES BASE Y DISÍMILES (PP - ABS).

La primera prueba de soldadura se llevó a cabo con los siguientes parámetros: velocidad de giro de 1060 rpm; 25 mm/min como velocidad de avance y de penetración con una herramienta cónica sin entrar en contacto con el material. Posteriormente, estos valores se modificaron con el fin de obtener los parámetros que generaron la soldadura con la mejor calidad. En la Tabla 3 se muestran los parámetros utilizados para la unión de placas de PP.

En las uniones 1 y 2 de la tabla anterior, se observó el paro de la fresadora; este efecto se atribuyó a la fuerza insuficiente en la fresadora. El problema se solucionó con los parámetros de la unión 3; si bien el defecto de túnel estuvo presente con los parámetros de soldadura usados. Para las uniones 1, 2 y 3, se utilizó un herramental cónico y un hombro sin contacto con el material durante el proceso de soldadura. En la cuarta unión se logró la soldadura con la misma herramienta y, si bien hubo contacto entre el hombro y el material, apareció de nuevo el defecto túnel. Este defecto es producido por la fuga del material a través de los

bordes donde se produce la soldadura; consecuentemente, los parámetros de estos cuatro primeros ensayos se descartaron. En la quinta unión, los problemas anteriores fueron resueltos, presentado soldaduras sin la presencia de los defectos mencionados; no obstante, las pruebas con otros parámetros de proceso continuaron investigándose.

Tabla 3. Parámetros de soldadura para la unión de placas de PP.

Unión	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta	Contacto entre la herramienta y el material
1	1060	25	25	Cónico	No
2	1060	20	20	Cónico	No
3	1060	15	15	Cónico	No
4	1060	15	15	Cónico	Si
5	1060	15	10	Cilíndrico	No
6	1060	15	10	Cilíndrico	Si
7	1060	15	10	Cilíndrico	No
8	1438	15	10	Cilíndrico	Si

En la sexta unión, hubo un calentamiento excesivo del material produciendo un desbordamiento de material por los bordes de la soldadura, que originó una unión deficiente; este efecto lo produce el hombro del herramental que está en contacto con el polipropileno. En la octava unión, se incrementó la velocidad de giro, incrementando la fricción y la temperatura, generando la expulsión del material e impidiendo la unión de los materiales. Habiendo obtenido buenas características de soldadura en la quinta unión, se repitieron estos parámetros con la 7^{ma} unión, con el objeto de comparar los resultados. Los parámetros utilizados en los ensayos 5 y 7 de la Tabla 3, fueron seleccionados para las posteriores soldaduras en el polipropileno: pin cilíndrico, velocidad de rotación de 1060 rpm y una velocidad de avance de 15 mm/min. Condicionando el contacto del hombro del herramental con las piezas a unir, se produce una rebaba del material hacia los bordes de la soldadura; esta rebaba se puede observar en la Figura 21 (unión 4 y 6, Tabla 3), generando además el defecto túnel y una mala calidad en la unión. Cuando no hay contacto entre el herramental y el material, los resultados de soldadura mejoran (Figura 21, unión 5, Tabla 3).

Una vez concluido las uniones de placas de polipropileno se procede con las uniones de placas de ABS. En la Tabla 4 se enlistan los distintos parámetros que se usaron para la unión del ABS, iniciando con una velocidad de giro de 1438 rpm, 15 mm/min como velocidad de avance y de penetración con una herramienta cilíndrica, y sin contacto entre el hombro de la herramienta y el material; posteriormente se modificaron estos parámetros de soldadura. En las primeras siete uniones se empleó una herramienta cilíndrica y posteriormente en las restantes se utilizó un herramental cónico. En todas las uniones no hubo contacto entre el hombro de la herramienta y el material, salvo en la décima y doceava unión.

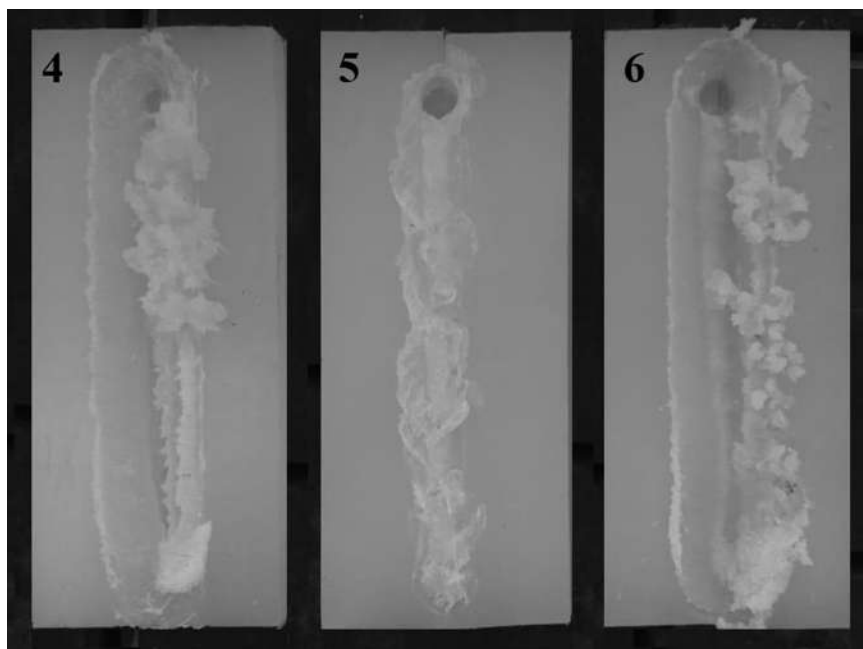


Figura 21. FSW de placas de polipropileno.

Los resultados de soldadura presentaron unión aparente; no obstante, cortes transversales y longitudinales en las uniones revelaron la presencia del defecto de túnel y porosidades a lo largo de las mismas; algunas con mayor longitud que otras. Adicionalmente, en todas las uniones una parte del material presentaba una apariencia de polvo fino, esto puede ser el resultado de una deficiencia en la plastificación del material, debido a un bajo calentamiento generado por la fricción del pin durante la unión. El deficiente calentamiento puede estar

asociado a una alta velocidad de avance en la unión y/o bajas velocidades de rotación del pin (rpm). En las Figuras 22, 23 y 24 se muestran los defectos antes mencionados. Se intentaron llevar a cabo un par de uniones con un pin presentando forma de cabeza de clavo con los parámetros señalados en la Tabla 4; no obstante, la potencia de la máquina fue insuficiente, generando el paro automático durante el proceso de soldadura.

Tabla 4. Parámetros de soldadura para la unión de placas de polímero ABS.

Unión	Velocidad de giro del pin (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta	Hombro en contacto con el material
1	1438	15	15	Cilíndrico	No
2	1438	70	10	Cilíndrico	No
3	1438	70	30	Cilíndrico	No
4	1438	50	30	Cilíndrico	No
5	1060	70	10	Cilíndrico	No
6	1060	50	30	Cilíndrico	No
7	600	70	10	Cilíndrico	No
8	1438	70	30	Cónico	No
9	1060	50	30	Cónico	No
10	1060	50	30	Cónico	Si
11	1060	30	30	Cónico	No
12	1060	30	30	Cónico	Si
13	1060	50	30	Cabeza de clavo	No
14	1060	50	10	Cabeza de clavo	No



Figura 22. Corte longitudinal de la soldadura de placas de ABS (porosidad).



Figura 23. Corte transversal de la soldadura de placas de ABS (defecto túnel).



Figura 24. FSW de placas de ABS (rebabas).

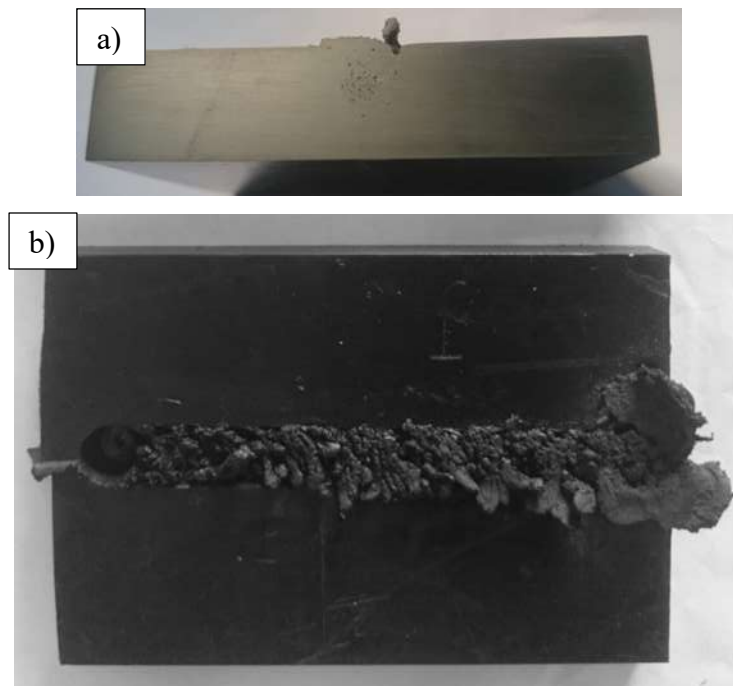


Figura 25. a) Corte transversal FSW de ABS (porosidad) y b) Soldadura ABS (unión 9).

La novena unión listada en la Tabla 4, presenta los mejores resultados para la soldadura de las placas ABS; el análisis mediante cortes transversales no mostró defectos, solamente pequeñas porosidades. Los parámetros de la unión 9 en la Tabla 4 fueron considerados los mejores para la unión de placas ABS, Figura 25.

Después del estudio de las uniones en placas homogéneas de ABS y PP bajo diferentes parámetros y habiendo determinado los mejores parámetros de soldadura para estos casos, se abordó la unión disímil entre estos termoplásticos, partiendo con los parámetros de soldadura previamente obtenidos para cada material, que generaron los mejores resultados. En la Tabla 5A se muestran los parámetros usados para llevar a cabo las uniones disímiles. En el primer intento, la máquina se detuvo; en efecto, los parámetros no fueron adecuados para que el equipo efectuara la soldadura. En el segundo intento no se logró la unión; con los parámetros del tercer ensayo se logró unir las dos placas; no obstante, al ser manipuladas manualmente estas fueron separadas. En la Figura 26 se puede apreciar que parte del ABS (polímero color negro) queda unido al polipropileno. Para la cuarta unión, se decide disminuir la velocidad de avance a 10 mm/min; en este caso, se obtuvo una mejoría en la unión de estos polímeros disímiles; no obstante, las placas fueron separadas manualmente una vez más. Una disminución de la velocidad de avance se practicó con el ensayo número 5; logrando una unión mejorada, aunque con un defecto de túnel de 5 cm, como se muestra en la Figura 27.

Tabla 5A. Parámetros de soldadura para la unión de placas de ABS-PP.

Unión	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta (mm/min)	Hombro en contacto con el material
1	1060	30	20	Cilíndrico	No
2	1060	15	10	Cilíndrico	No
3	1060	15	10	Cilíndrico	Si
4	1060	10	10	Cilíndrico	Si
5	1060	5	5	Cilíndrico	Si
6	1060	5	5	Cilíndrico	Si
7	1060	3	5	Cilíndrico	Si
8	2000	1.5	2.5	Cilíndrico	Si
9	2000	3	5	Cilíndrico	Si
10	2000	1.5	5	Cilíndrico	Si
11	3000	3	2.5	Cilíndrico	Si



Figura 26. FSW de placas de ABS y PP.

Se asume que este defecto es debido a la falta de calentamiento del herramental y de los materiales plásticos al iniciar el proceso de soldadura. Con una sexta soldadura se repitieron los parámetros que se utilizaron en la quinta unión, con objeto de comparación: los resultados mostraron similitudes entre los ensayos 5 y 6. En este proceso de soldadura se considera la velocidad de avance como uno de los parámetros con mayores efectos; con el ensayo 7 se mantienen los mismos parámetros, excepto la velocidad de avance la cual se reduce a 3 mm/min; el resultado de soldadura presenta aún el defecto de túnel, aunque esta vez se reduce a 3 cm aproximadamente. Durante el proceso de soldadura se concluye que: el incremento de la velocidad de giro y la reducción en la velocidad de avance del herramental, se genera mayor disipación de energía y de temperatura, mejorando la difusión de los materiales en el proceso de unión. Para eliminar el defecto de túnel, se incrementó la velocidad de giro a 2000 rpm con objeto de generar más calor de fricción entre los materiales disímiles y el pin; al mismo tiempo se opta por disminuir nuevamente la velocidad de avance y penetración del herramental, con los parámetros del ensayo 8.

Con estos últimos parámetros de soldadura, se presentó una reducción significativa del defecto de túnel, reduciéndose a 1 cm aproximadamente.



Figura 27. FSW de ABS y PP (defecto de túnel de 5 cm aproximadamente).

Con los parámetros de la novena unión se logró eliminar el defecto de túnel, como se ilustra en la Figura 28. En la Tabla 5B se muestran los parámetros que se utilizaron para realizar esta soldadura, correspondiente al ensayo 9 de la Tabla 5A, variando la velocidad de avance y de penetración. Cabe mencionar que la velocidad de penetración se retomó a 5mm/min en esta prueba, puesto que se asume que a 3mm/min de penetración se generaba un exceso de temperatura asociada a la generación del defecto de túnel. En la décima unión (Tabla 5A), se mantuvo la velocidad de giro y penetración y se utilizó 1.5 mm/min como velocidad de avance. En esta unión se logra obtener una buena unión, aunque aparece nuevamente una pequeña cavidad de aproximadamente 1 cm; la conclusión fue que esta velocidad de avance es baja y el herramental no empuja y/o mezcla el material lo suficiente para generar una adecuada soldadura. Para completar la variación de los parámetros en el proceso de soldadura, se prospecta el aumento de la velocidad de giro del herramental, hasta un valor de 3000 rpm, correspondiente al ensayo número 11 en la Tabla 5A. Este ensayo arrojó resultados deficientes, presentado defectos relacionadas con el exceso de disipación de calor e incremento de temperatura. En la Figura 29 se muestra la unión, señalando con flechas la

localización de los defectos. La velocidad de giro de 3000 rpm se revela excesiva para la correcta soldadura de estos polímeros disímiles, debido a la excesiva disipación de calor, sobrepasando la temperatura de transición vítrea, que dificulta la correcta mezcla de los dos polímeros.



Figura 28. FSW de placas de ABS y polipropileno (sin defecto de túnel).

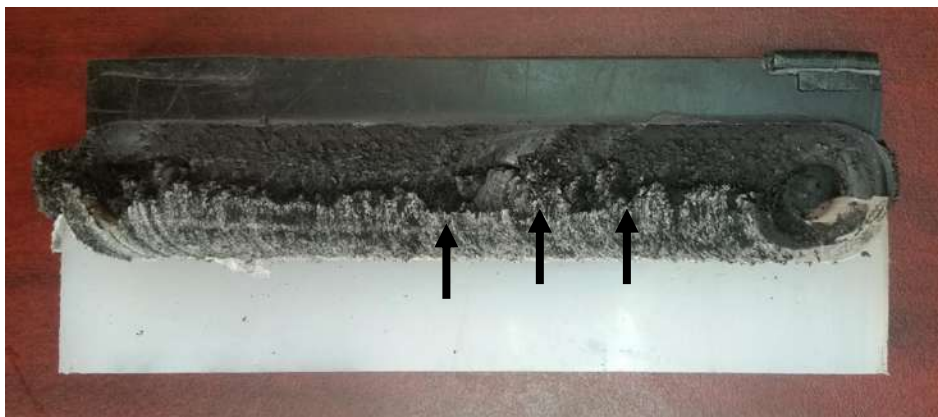


Figura 29. FSW de placas de ABS y polipropileno (defectos de soldadura).

Una vez definidas los valores de los parámetros con los mejores resultados para la unión de termoplásticos disímiles, se retienen estos parámetros para los subsecuentes ensayos. Los ensayos 12, 13 y 14 listados en la Tabla 5B, se realizaron por triplicado para confrontar los

resultados, variando únicamente la velocidad de avance. En el ensayo número 12 los materiales lograron unirse; no obstante, la adherencia fue muy débil, puesto que se separaron con una simple manipulación. Los parámetros del ensayo 12 se descartan para la unión de estos termoplásticos disímiles.

Tabla 5B. Parámetros de soldadura para la unión de placas de ABS-PP.

Unión	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta (mm/min)	Hombro en contacto con el material
12	2000	5	2.5	Cilíndrico	Si
13	2000	3	2.5	Cilíndrico	Si
14	2000	1.5	2.5	Cilíndrico	Si

Con el ensayo 13 se decidió disminuir la velocidad de avance a 3 mm/min. Los resultados para las tres soldaduras bajo estos parámetros presentan una buena homogeneidad de mezcla a lo largo del cordón de soldadura. El siguiente paso fue utilizar los parámetros del ensayo 14 en la Tabla 5B, con una reducción adicional de la velocidad de avance, hasta el valor de 1.5 mm/min, con buenos resultados para la unión de estos materiales disímiles. Los resultados con los ensayos 13 y 14 mostraron suficiente rigidez, resistiendo manipulaciones manuales de flexión; aunque los cordones de soldadura siguieron presentando defectos de tipo túnel: con la velocidad de 3mm/min se presentó una ligera cavidad a lo largo de la unión; mientras que con la velocidad de 1.5 el defecto de tipo túnel prácticamente desapareció. La conclusión que se desprende de estos resultados es que, a mayor velocidad de avance del herramental, la unión de estos materiales disímiles será más débil debido a que el surco que se produce se asocia con la expulsión de estos materiales producidos por la velocidad de fricción del pin, a medida que la velocidad de avance se incrementa. Las uniones bajo los parámetros de ensayo 13 y 14 se maquinaron para obtener probetas de ensayos de tensión, con objeto de obtener su resistencia bajo esta sollicitación mecánica. En la figura 30 se muestran las dos soldaduras de estos polímeros disímiles, utilizando 3 y 1.5 mm/min como velocidad de avance, respectivamente.



Figura 30. Polímeros soldados con velocidades de avance de 3 mm/min (izquierda) y 1.5 mm/min (derecha).

3.2.1. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA Tensión DE LA UNIÓN ABS Y PP.

En la Tabla 6 se enlistan los resultados de los ensayos en tensión de las soldaduras ABS-PP, las máximas fuerzas registradas fueron las siguientes: 326 y 298 Newtons para la probeta 14; 269 y 291 Newtons para la unión 13 (Tabla 5B). En cuanto al desplazamiento hasta fractura, se obtiene un promedio de 0.51 mm, representando el desplazamiento promedio que genera desprendimiento en estas uniones disímiles. En la figura 31 se puede apreciar los resultados de los ensayos de tensión en las probetas de las uniones 13 y 14, presentando fractura hasta un punto máximo de fuerza. Paralelamente, se llevaron a cabo pruebas de tensión en los materiales base; es decir, se manufacturaron probetas de PP y de ABS, con el propósito de

ensayarlos en tensión y compararlos con los resultados de los ensayos de tensión de las uniones disímiles.

Tabla 6. Ensayos de tensión en probetas soldadas mediante soldadura por fricción-agitación (PP-ABS).

PP-ABS FSW	Pruebas UTS	Dimensiones	UTF	Desplazamiento (UTS)
# 13	1	1.2 cm de ancho 6.5 cm de largo 3 mm de grosor	291.965 Newton	0.4637 mm
	2		269.517 Newton	0.4857 mm
# 14	3		326.504 Newton	0.5779 mm
	4		298.006 Newton	0.5494 mm

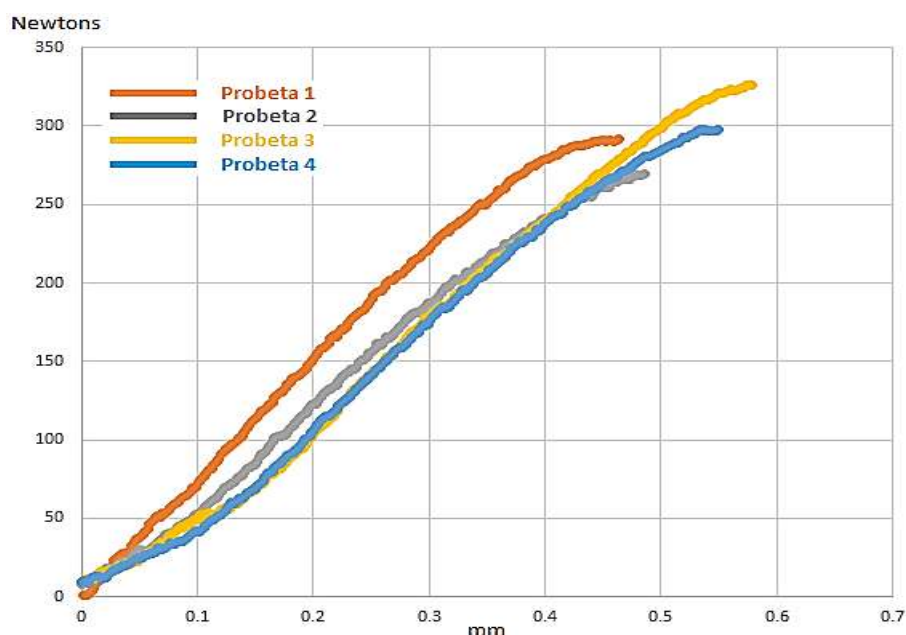


Figura 31. Ensayos de tensión en probetas disímiles PP-ABS, soldadas mediante la técnica de fricción-agitación.

En la Figura 32 se muestran dos gráficos de tensión que se obtuvieron de estos materiales de base. Para el caso del polipropileno (PP), se obtuvo una fuerza máxima de 360.6 Newtons; mientras que para el caso del ABS, se obtuvo un valor máximo de 480.3 Newtons. La comparación entre ensayos de tensión de materiales de base y disímiles arrojan los siguientes

resultados: tomando los valores para los ensayos 14 de la Tabla 6, y el valor máximo de tensión para el PP (360.6 Newtons), las eficiencias de soldadura fueron: 90% (prueba 3), y 83% (prueba 4).

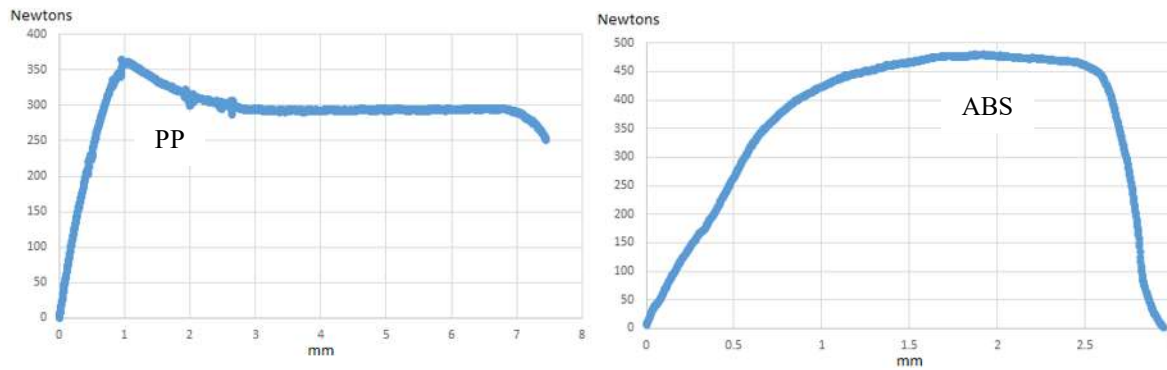


Figura 32. Ensayos de tensión para el polipropileno (PP) y el ABS (acronitrilo-butadieno-estireno).

Los anteriores resultados muestran que los parámetros utilizados en los ensayos 14 de la Tabla 6, fueron los que arrojaron mejores resultados para la eficiencia de soldadura, medida mediante ensayos de tensión.

3.2.2. PERFIL DE MICRODUREZA EN LA SOLDADURA

La medición de microdureza se realizó en 5 partes a lo largo de la placa de soldadura de PP-ABS. Se realizaron cortes para obtener 5 piezas y se obtuvieron las mediciones de microdureza Vickers en dirección transversal al sentido de la soldadura. El valor de dureza del ABS es de alrededor 14 HV; mientras que el valor correspondiente para PP fue 11 HV, aproximadamente. Los valores de dureza obtenidos en la soldadura son menores respecto a ambos materiales. Por ejemplo, en la soldadura del ensayo 13 el valor fue de 8.82 HV; mientras que este valor alcanzó 9.42 HV para el caso de la soldadura 14, Tabla 6. Comparando los valores de ambas gráficas de microdureza (Figuras 33 y 34), se puede apreciar que en el caso de la soldadura 14 los valores son ligeramente mayores; lo que traduce una mezcla más eficiente de los materiales usando los parámetros de los ensayos 14,

comparados con los parámetros de los ensayos 13, de la misma tabla. Las mediciones de microdureza muestran una caída en la zona central de las probetas, la zona donde se lleva a cabo la mezcla por fricción de los dos materiales disímiles.

El perfil de dureza es característico de polímeros disímiles usando la técnica FSW; esta disminuye al mínimo valor en la zona de agitación. Este comportamiento también es mencionado por varios otros autores que unen materiales disímiles: metal y polímero [93] [94] [95]. En las Tablas 7 y 8 se muestran los valores de microdureza obtenidos para la soldadura 13 y 14 respectivamente.

Tabla 7. Valores de microdureza de la soldadura #13.

Zona de medición a lo largo de la probeta	ABS (HV)			Stir zone (HV)			PP (HV)		
1 ■	12.9	14.1	12.7	8.4	9.2	7.9	11.1	10.7	13.3
2 ◆	14.2	16.4	13.2	9.4	8.6	8.5	12.9	10.6	10.9
3 ▲	13.5	14.9	12.6	9.5	10.3	8.7	12.3	9.7	10.7
4 ●	10.8	14.6	9.7	8.9	9.1	8.1	11.3	12.9	9.9
5 ✕	15.3	14.9	17.4	8.8	8.7	8.2	8.7	10.6	10.9

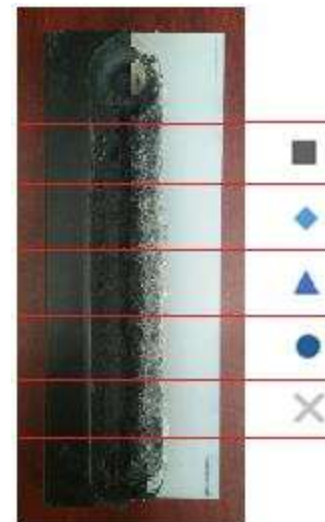
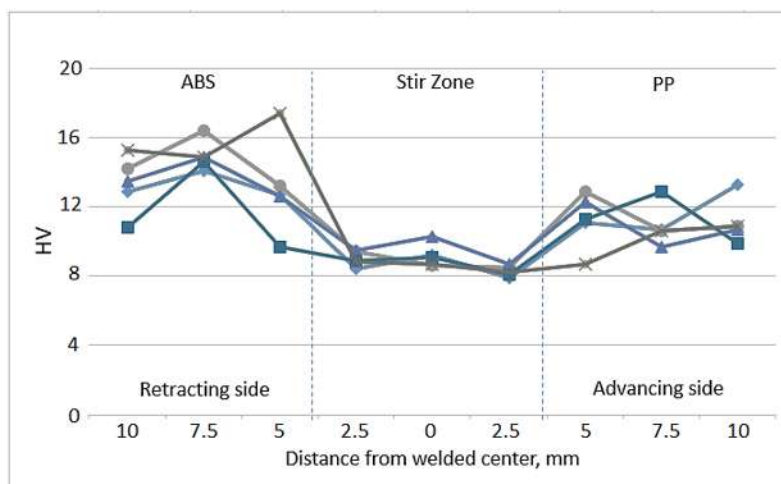


Figura 33. Perfil de dureza para la soldadura #13.

En las Figuras 33 y 34 se ilustran las placas de soldadura, en las que se localizan 5 zonas a lo largo de las placas soldadas, las que se identifican con un símbolo, acompañando la gráfica correspondiente. Así, cada símbolo representa una zona a lo largo de la probeta soldada, y en cada zona se mide la microdureza perpendicularmente, desde la región del polímero ABS, pasando por la región de agitación y terminando en la región de PP (de izquierda a derecha, como aparece en la gráfica de la Figura 33).

Tabla 8. Valores de microdureza de la soldadura #14.

Zona de medición a lo largo de la probeta	ABS (HV)			Stir Zone (HV)			PP (HV)		
1 ■	15.3	12.8	14.7	10.1	8.9	10	10.5	12.4	12
2 ◆	13.9	12.5	15.5	9.1	9.6	10.1	12.3	10.3	12.4
3 ▲	14.1	14.3	12.8	8.3	9.9	8.9	11.3	10.4	10.9
4 ●	12.3	14.6	13.7	8.7	8.6	9.2	11.7	10.7	9.9
5 ✕	16.9	14.2	13.8	9.7	10.4	9.8	15	13.4	10.3

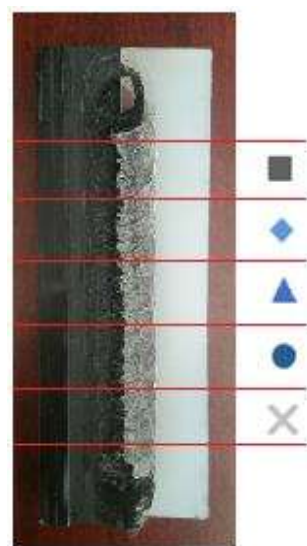
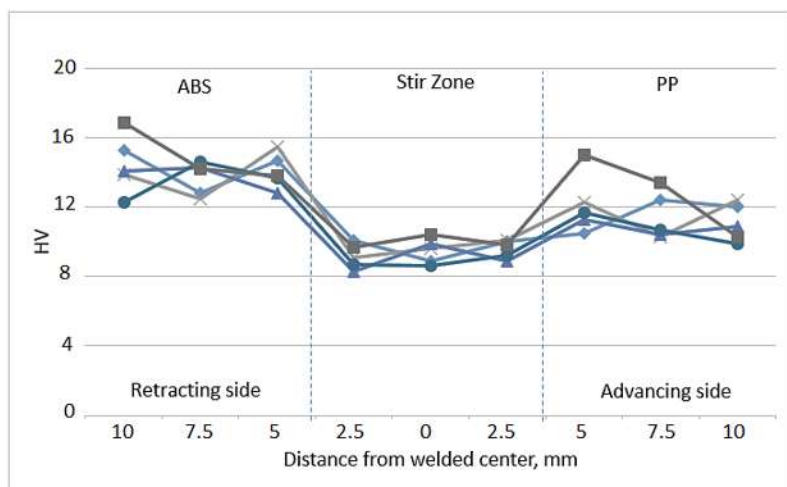


Figura 34. Perfil de dureza para la soldadura #14.

3.2.3. SUPERFICIES DE FRACTURA.

En esta sección se presentan las fracturas de los especímenes sometidos a ensayos de tensión. En la Figura 35 se muestran dos imágenes de las probetas en la zona fracturada. Todas las fracturas de las probetas presentan similitud en cuanto a la zona donde ocurre la fractura. En esta figura se observa que la ruptura se presenta en la zona de agitación o “stir zone”, la zona donde se lleva a cabo la mezcla de ambos materiales. Aunque la fractura parece presentarse en la parte oscura (ABS); en realidad se sitúa en la zona de mezcla, donde la agitación provoca que el color oscuro del ABS prevalezca, en detrimento del color blanco del PP. Así mismo, en la imagen se indican dos límites con líneas blancas, indicando la separación entre la zona PP con la zona de agitación, y de esta última con la zona de ABS.

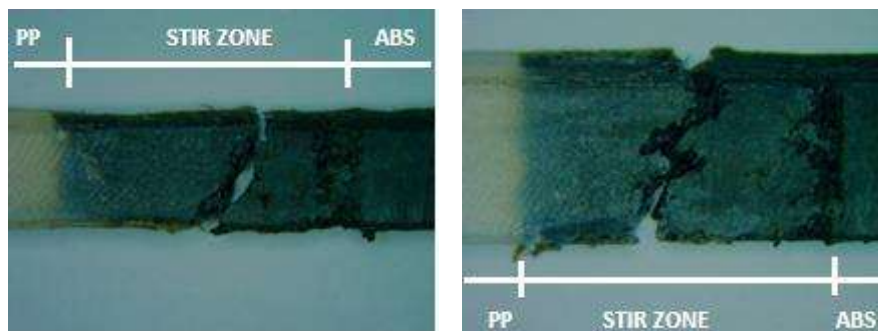


Figura 35. Probetas fracturadas mediante ensayo de tensión.

Por otra parte, la naturaleza de la fractura en materiales polímeros unidos por FSW, ha sido estudiada por Vijendra y Sharma [93]. En este trabajo se mencionan 5 tipos de fractura que se pueden presentar en ensayos de tensión en probetas obtenidas por la unión de termoplásticos mediante la técnica FSW. La Figura 36 muestra los 5 tipos de fractura aludidos. Estos autores refieren que las muestras soldadas fracturan según diferentes modalidades; cuando la fractura se forma en el centro de la soldadura (tipo d), la eficiencia de la unión se encuentra entre un 78-98%. La zona de la fractura de la Figura 35, parece localizarse en la parte central de la trayectoria: PP-Stir zone-ABS; es posible entonces avanzar la hipótesis que correspondería al tipo (d) de la Figura 36. Esta hipótesis parece

reforzarse con los resultados de dureza obtenidos en la zona de agitación, que corresponden a 80% de la dureza en los materiales base (PP y ABS).

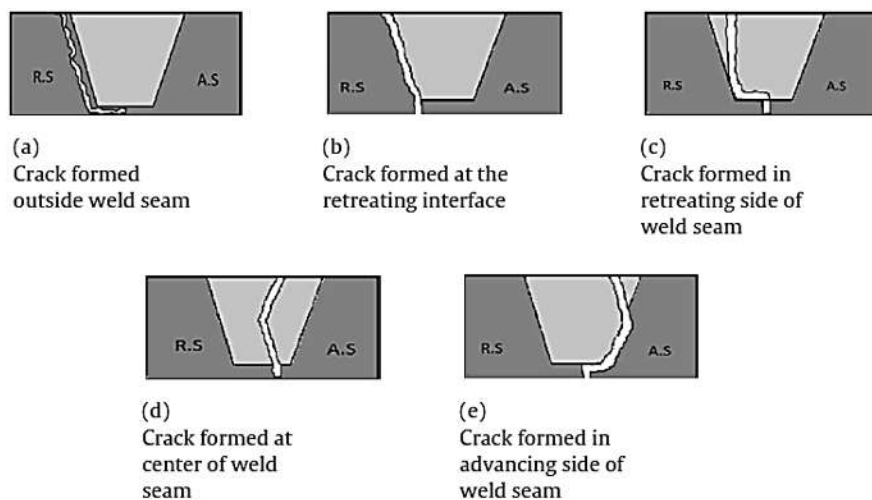


Figura 36. Tipos de fractura en polímeros unidos por FSW y sometidos a tensión [93].

3.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Se llevó a cabo el análisis mediante microscopia electrónica de barrido de la unión disímil mediante FSW, como se ilustra en las Figuras 37 y 38, para los ensayos 13, y 14, respectivamente. Las principales tendencias se pueden describir de la siguiente manera: el lado de retirada está asociado con una zona de defectos más pronunciada [96], como se ilustra en las Figuras 37, donde el ABS (zona oscura), corresponden al lado de retirada. Se observa también una mejor mezcla para el lado de avance, donde la menor densidad de PP en comparación con el ABS induce una alta presencia superficial de PP [57]. Aparentemente, no se observa enlace químico entre estos dos polímeros termoplásticos; parece más bien que se desarrolla un enlace mecánico de interface entre las partículas aleatorias de estos dos polímeros, a través de la zona de agitación [97]. La deficiencia de material del lado de retirada (ABS, lado oscuro), es característico de los procesos de unión FSW de polímeros

termoplásticos, donde se presentan discontinuidades en la difusión del material y defectos de esta naturaleza.

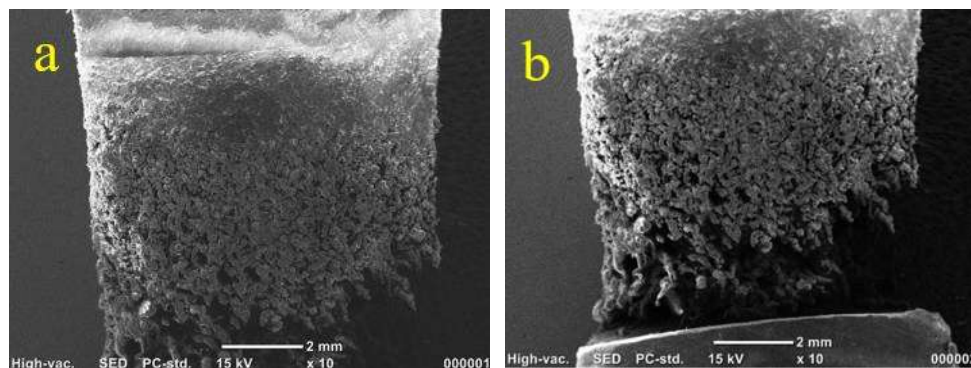


Figure 37. MEB para los ensayos 13; zona de PP (a), y zona de ABS (b).

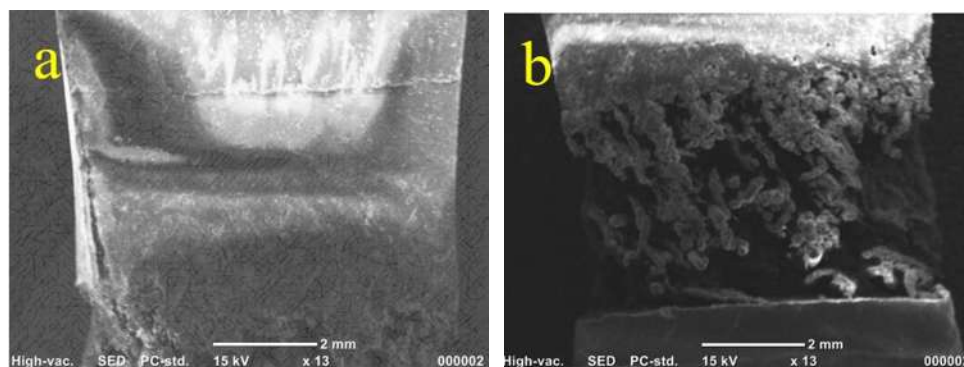


Figure 38. MEB para los ensayos 14; zona de PP (a), y zona de ABS (b).

3.3. SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE LA UNIÓN PP-UHMWPE

La segunda unión disímil usando FSW de polímeros termoplásticos, fue desarrollada para la dupla: PP y el UHMWPE. Para la primera prueba de unión se utilizó la velocidad de giro de 1000 rpm; 3 mm/min como velocidad de avance, una velocidad de penetración 2.5 mm/min con una herramienta cilíndrica en contacto con el material. En la Tabla 9 se muestran los parámetros utilizados para la unión de estos materiales. En la Figura 39 a) se puede apreciar

que la soldadura no ha alcanzado una unión aceptable; en la parte superior de la muestra se observa una discontinuidad en el cordón de soldadura, indicando una fricción defectuosa, para los tres parámetros de proceso utilizados y listados en la Tabla 9. En estos tres primeros ensayos se utilizaron 3 velocidades de avance; 3, 10 y 50 mm/min, 2 velocidades de penetración; 2.5 y 5 mm/min, mientras que la velocidad de giro se mantuvo constante a 1000 rpm. Para los parámetros del cuarto ensayo se propone un cambio en el pin: de cilíndrico a hexagonal; el resultado se ilustra en la Figura 39 b), con una mejora apreciable en la calidad de la unión, aunque se siguen presentando discontinuidades para los ensayos 4 y 5. Para resolver esta deficiencia, se propone la introducción de un hombro estacionario, concebido, diseñado y fabricado en el marco de esta tesis Doctoral. El diseño del hombro estacionario fue con dimensiones apropiadas, para evitar la expulsión de los materiales durante el proceso de soldado: la casi totalidad del material permaneció en el cordón de soldadura.

Tabla 9. Parámetros preliminares de soldadura para la unión de placas de PP y UHMWPE.

Unión	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta	Hombro en contacto con el material
1	1000	3	2.5	Cilíndrico	Si
2	1000	10	2.5	Cilíndrico	Si
3	1000	50	5	Cilíndrico	Si
4	1000	50	5	Hexagonal	Si
5	1000	25	5	Hexagonal	Si
6	1000	25	5	Hexagonal	Si Hombro Estacionario
7	1000	25	5	Hexagonal	Si Hombro Estacionario

Los ensayos 6 y 7 de la Tabla 9 se llevaron a cabo con este hombro estacionario. El ensayo 6 guardó los parámetros del ensayo 5, cambiando únicamente a un hombro estacionario. La pieza de aluminio del hombro estacionario queda ligeramente en contacto con los materiales poliméricos durante el proceso. Los resultados durante el proceso de soldado revelan que no se presenta desperdicio de material; es decir, no existe la expulsión del material provocado por la fricción de la herramienta. Bajo estas condiciones, se puede estimar hasta un 98% del

material permaneciendo en el cordón de la soldadura gracias a la placa de aluminio que funciona como hombro estacionario.

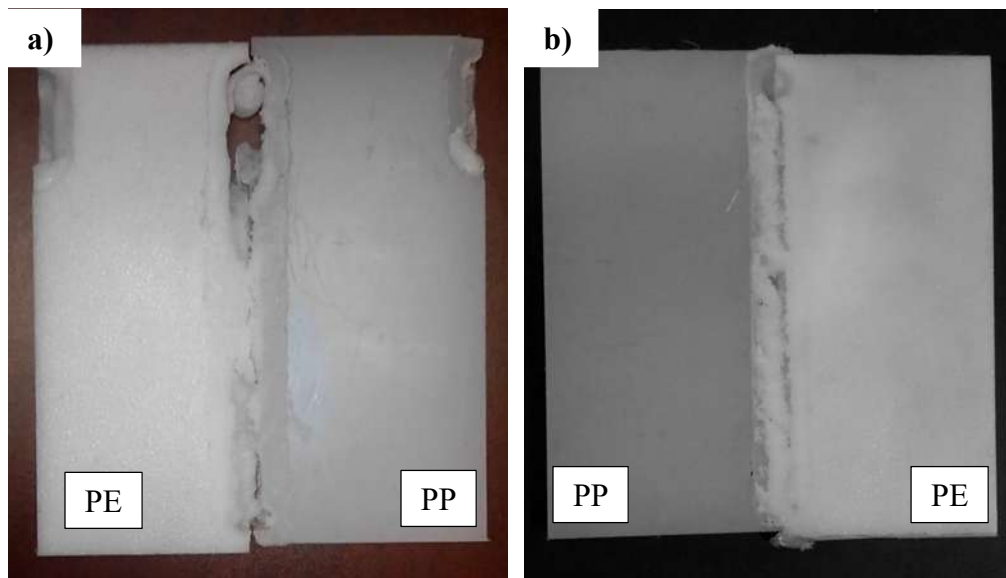


Figura 39. a) Soldadura por fricción-agitación de placas de PP y UHMWPE, parámetros de proceso del ensayo 3, b) parámetros de proceso del ensayo 4.

Bajo la implementación del hombro estacionario, los resultados de la unión FSW se mejoraron considerablemente. En la Figura 40 se muestra el arreglo de hombro estacionario y el resultado sobre el cordón de soldadura; un cordón uniforme y sin la presencia de defectos, mejorando considerablemente los resultados anteriores. En esta misma figura aparece un cordón color grisáceo u oscuro, que representa el resultado de un parámetro desconocido. Después de la revisión detallada del herramental se concluyó que aceite había sido expulsado por el balero; no obstante, la limpieza del herramental y el balero no arrojó un cambio sustancial con el ensayo número 7. Los resultados mostraron el mismo efecto en el cordón de la soldadura: se concentró el material en el cordón de la soldadura, y se obtuvo el mismo color a lo largo del cordón. Los parámetros utilizados en la soldadura disímil PP-UHMWPE, se muestran en la Tabla 10; un parámetro adicional fue introducido: calentamiento previo a la soldadura para analizar los efectos resultantes. En la Figura 41 se muestran las imágenes relacionadas con la soldadura de estos materiales.

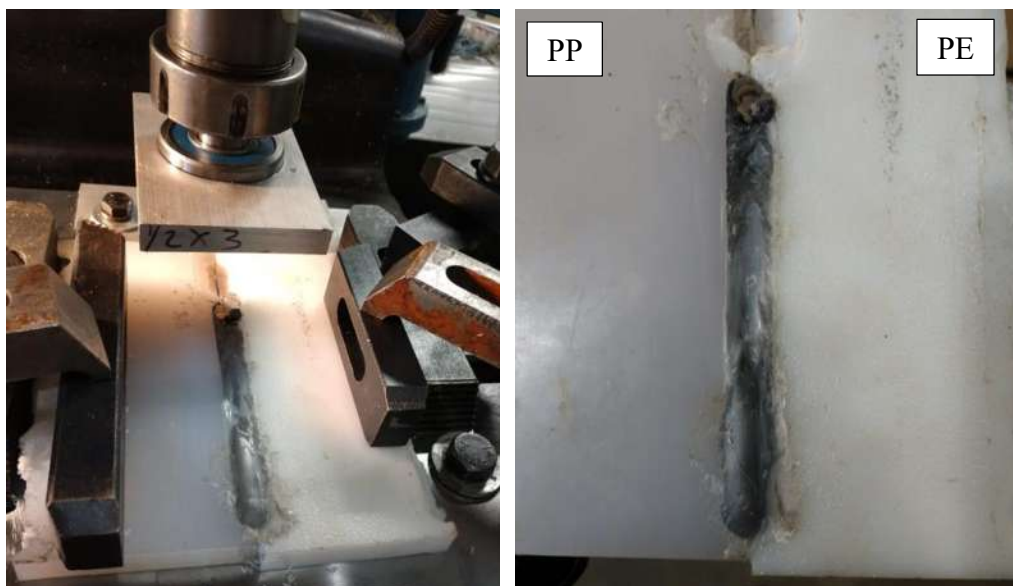


Figura 40. Hombro estacionario y cordón de soldadura PP – UHMWPE.

Tabla 10. Parámetros de soldadura para la unión de placas de PP y UHMWPE.

Unión	Velocidad de giro (rpm)	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de penetración (mm/min)	Modelo de la herramienta	Pre calentamiento
1	1100	12.5	5	Hexagonal	No
2	1500	12.5	5	Hexagonal	No
3	2000	12.5	5	Hexagonal	No
4	2500	12.5	5	Hexagonal	No
5	3000	12.5	5	Hexagonal	No
6	1100	12.5	5	Hexagonal	Si
7	1500	12.5	5	Hexagonal	Si
8	2000	12.5	5	Hexagonal	Si
9	2500	12.5	5	Hexagonal	Si
10	3000	12.5	5	Hexagonal	Si
11	1100	25	5	Hexagonal	No
12	1500	25	5	Hexagonal	No
13	2000	25	5	Hexagonal	No
14	2500	25	5	Hexagonal	No
15	3000	25	5	Hexagonal	No
16	1100	25	5	Hexagonal	Si
17	1500	25	5	Hexagonal	Si
18	2000	25	5	Hexagonal	Si
19	2500	25	5	Hexagonal	Si
20	3000	25	5	Hexagonal	Si

La Figura 41 a), b), c), d) y e), muestran los resultados de la soldadura según los parámetros de la Tabla 10 (los primeros 10 ensayos, con 12.5 mm/min de velocidad de avance), donde las placas de lado izquierdo sufrieron un precalentamiento de 120°C por 30 minutos.

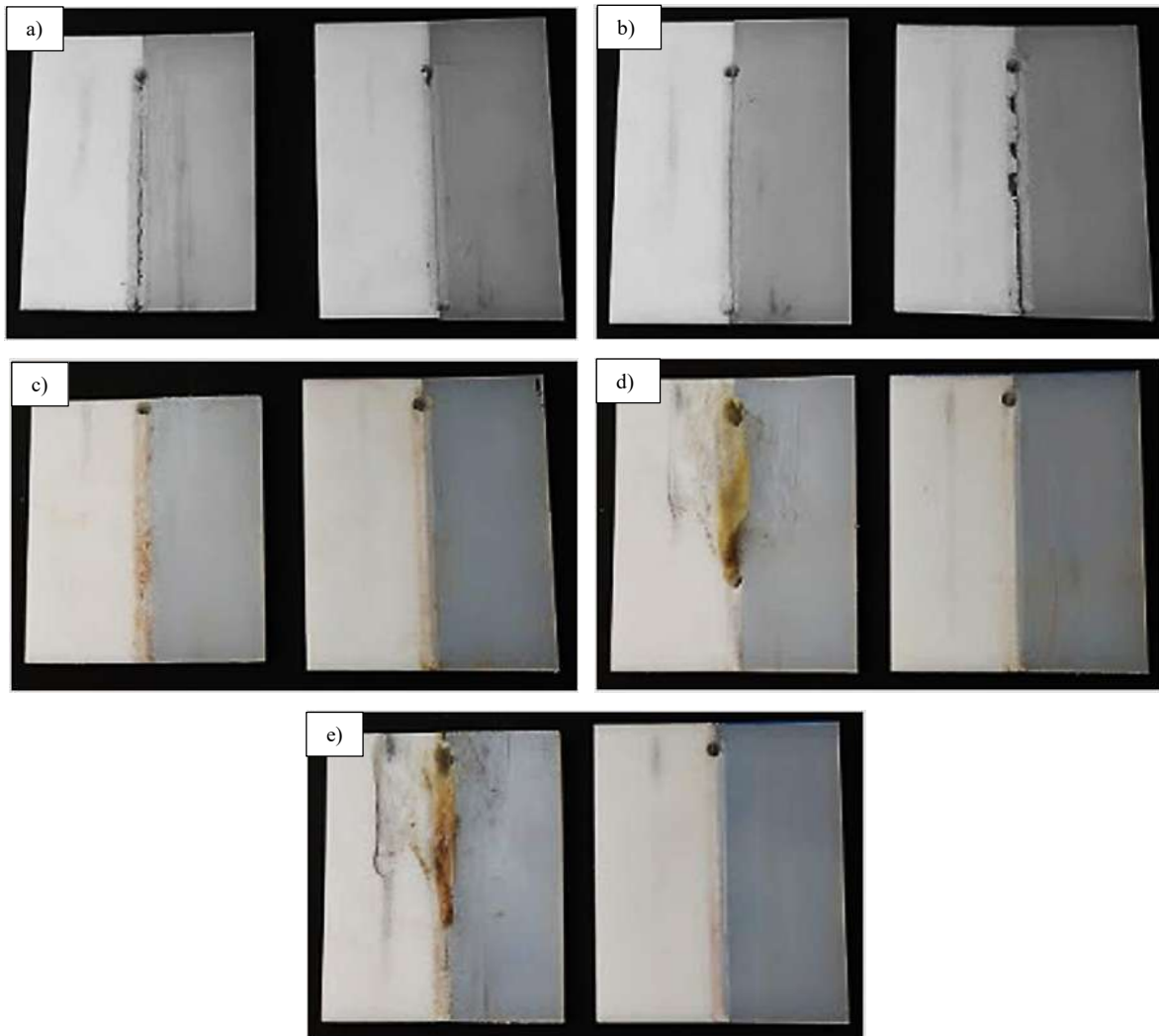


Figura 41. FSW PP-UHMWPE; a) unión 6 y 1, b) unión 7 y 2, c) unión 8 y 3, d) unión 9 y 4, e) unión 10 y 5.

Las uniones resultantes fueron deficientes: las placas se separaron con una manipulación manual; mientras que con la aplicación de calentamiento, hubo adherencia, aunque esta fue débil. En la Figura 41 b) se aumentó la velocidad de giro, obteniendo mejoras en la unión;

esta vez, sin precalentamiento. En la Figura 41 c) se observó una buena mezcla de materiales, aunque en ambas placas se presentaron porosidades. Para las Figuras 41 d) y 41 e), se aplicó precalentamiento a las placas, presentando un defecto: la mezcla de materiales sobresale de la superficie. Este defecto se relaciona con el exceso de calor que combina el precalentamiento con el calor producido por fricción, provocando la fusión del material y el desborde del cordón de soldadura, generando una soldadura de mala calidad. La validación de estos resultados fue mediante ensayos mecánicos de tensión.

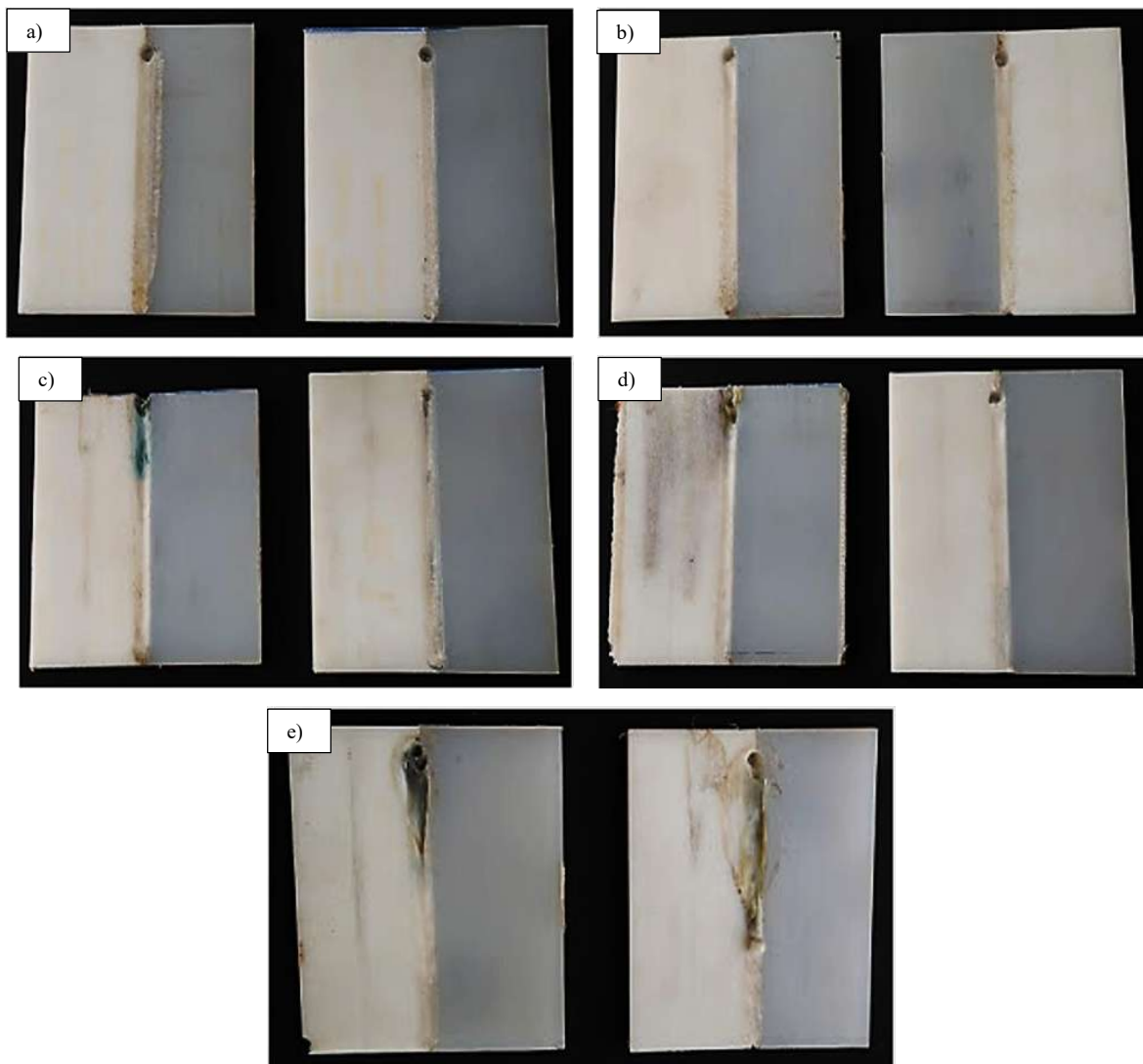


Figura 42. FSW PP-PE; a) unión 16 y 11, b) unión 17 y 12, c) unión 18 y 13, d) unión 19 y 14, e) unión 20 y 15.

En la Figura 42 se muestra los resultados de las 10 condiciones o parámetros que se utilizaron para unir estos polímeros (últimos 10 ensayos de la Tabla 10, con velocidad constante de avance de 25 mm/min). Las placas de lado izquierdo en la Figura 42 se les aplicó calentamiento, como en el caso de la Figura 41. En la Figura 42 a), ambas soldaduras presentaron buena adherencia; debido a que se aumentó la velocidad de avance a 25 mm/min, aunque la soldadura sometida a calentamiento presentó ligeramente pérdida de material. En la imagen 42 b) se aumentó la velocidad de giro a 1500 rpm, obteniendo una mejora en la unión respecto a la que sufrió calentamiento; aunque se presentó porosidad en la superficie del cordón. En la Figura 42 c), en ambas placas se presentó mezcla de materiales. Para el caso de la soldadura donde se aplicó calentamiento, es notable que el cordón de soldadura no presenta aparentes defectos visuales. En el caso donde no se aplicó calor, el cordón de soldadura revela ciertas imperfecciones. Para la Figura 42 d), ambas uniones exponen buena mezcla de materiales, con una adecuada soldadura. La Figura 42 e), muestra en ambos casos defectos, esto puede ser atribuido al calor producido por la fricción (3000 rpm), y la velocidad de avance (25 mm/min); la conclusión es que bajo estos últimos parámetros la unión no se ve favorecida.

3.3.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN PP-UHMWPE

Ensayos de tensión fueron practicados en las placas soldadas de PP-UHMWPE. De un total de 20 modalidades de unión (Tabla 10), se obtuvieron 5 probetas y se escogieron las mejores dentro de éstas. Algunas probetas presentaban pequeñas defectos y fueron descartadas. Los ensayos de tensión se llevaron a cabo por triplicado para cada modalidad con el objeto de comparar resultados. En la Tabla 11 se enlistan los valores más altos obtenidos en los ensayos de tensión para las probetas PP-UHMWPE. Primeramente, los parámetros fueron: 1100 rpm, 12.5 mm/min velocidad de avance y sin calentamiento con una resistencia máxima de 21 MPa; representando una resistencia de 80.8% respecto al polietileno de ultra alto peso molecular como material base. Los 5 siguientes mejores resultados obtuvieron una resistencia entre 14-15 MPa, que representa una resistencia de entre 55-60 % respecto del polipropileno.

Los primeros 6 resultados fueron los valores más altos; los mismos no fueron sometidos al proceso de calentamiento en el horno. Lo anterior resulta opuesto a lo reportado por otros investigadores que utilizan calentamiento en el proceso FSW de polímeros. En este caso, el calentamiento no favoreció la mezcla de materiales y el incremento en la resistencia de la soldadura. Adicionalmente, en la misma tabla se puede apreciar que los valores más bajos de resistencia se obtuvieron cuando las muestras se sometieron al calentamiento. Además, los primeros 4 mejores resultados de resistencia nominados: 1112 S, 1525 S, 2025 S, 2525 S, con el significado siguiente para el primero: 11 (1100 rpm), 12 (velocidad de avance de 12mm/min) y S sin precalentamiento, presentan los valores máximos de tensión para los especímenes no calentados.

Tabla 11. Resistencia a la tensión en función de los parámetros de soldadura, en las uniones PP-UHMWPE.

Velocidad de giro rpm	Velocidad de avance mm/ min	Precalentamiento	Ensayo de tensión MPa	Resistencia respecto al material base
1100	12.5	X	21.0	80.76 %
1500	25	X	15.8	60.76 %
2000	25	X	15.5	59.61 %
2500	25	X	15.1	58.07 %
1500	12.5	X	14.6	56.15 %
2500	12.5	X	14.4	55.38 %
1500	12.5	✓	13.7	52.69 %
3000	25	✓	11.4	43.84 %
2500	25	✓	10.6	40.76 %
3000	25	X	10.2	39.23 %
3000	12.5	✓	8.77	33.46 %
3000	12.5	X	8.23	31.65 %
1100	25	X	7.54	29.00 %
1500	25	✓	6.34	24.38 %
2500	12.5	✓	5.81	22.34 %
2000	25	✓	5.21	20. 03 %
1100	25	✓	3.06	11.76 %
2000	12.5	✓	2.09	8.030 %
2000	12.5	X	1.55	5.960 %

En la Figura 43 se pueden apreciar los gráficos obtenidos de los ensayos de tensión para los materiales base. El UHMWPE obtuvo una resistencia de 26 MPa y 31.8 MPa para el PP.

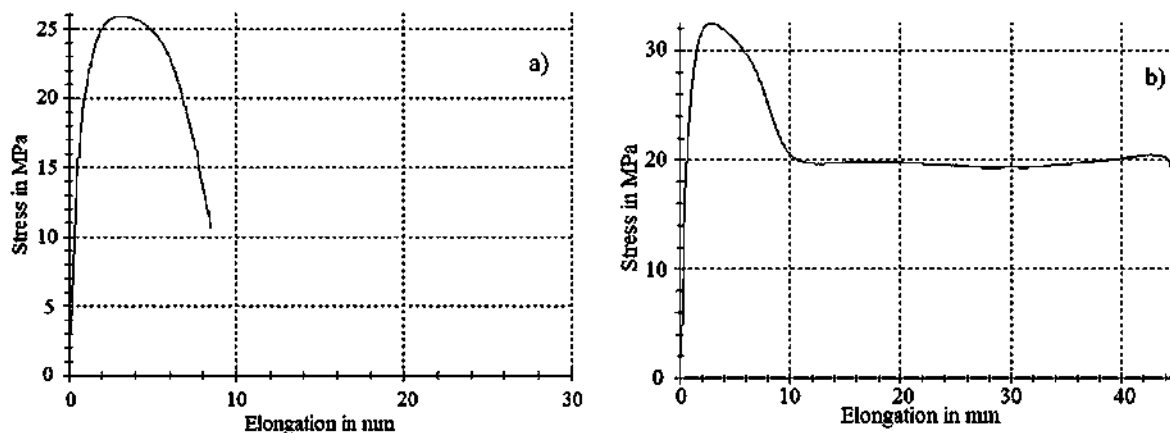


Figura 43. Ensayo de tensión de los termoplásticos base, a) UHMWPE b) PP.

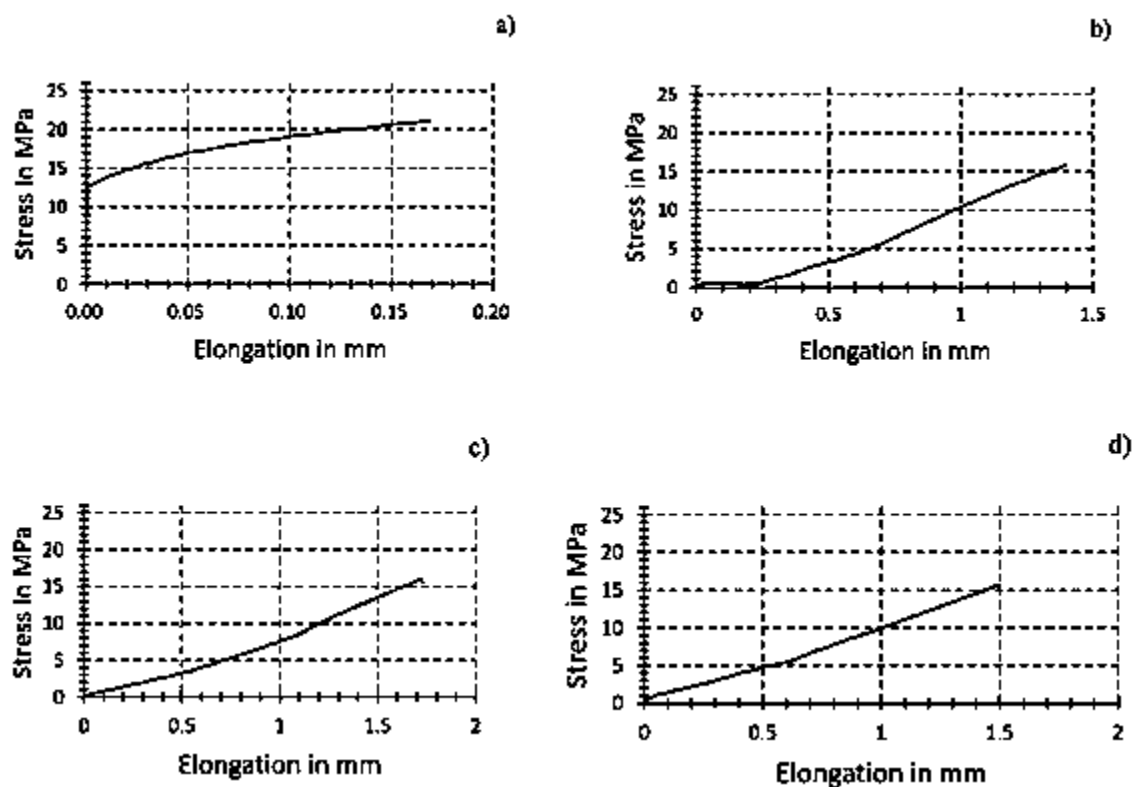


Figure 44. Gráficos de los ensayos de tensión de las cuatro soldaduras con las resistencias más altas: a) 1112 S, b) 1525 S c) 2025 S y d) 2525 S

Concerniente a los ensayos de tensión de las soldaduras disímiles, en la Figura 44 se presentan los gráficos de los ensayos mencionados previamente: 1112 S, 1525 S, 2025 S, 2525 S, las cuatro soldaduras con las resistencias más altas correspondiendo a los parámetros de proceso: 1100 rpm y 12.5 mm/min, velocidad de avance para la Figura 44 a); 1500 rpm con 25 mm/min velocidad de avance, Figure 44 b); 2000 rpm y 25 mm/min de velocidad de avance, Figura 44 c); 2500 rpm y 25 mm/min de avance para la Figura 44 d), las cuatro sin calentamiento.

3.3.2. PERFIL DE MICRODUREZA EN LA SOLDADURA PP-UHMWPE

La microdureza se obtuvo en las probetas soldadas; las mediciones de microdureza Vickers se realizaron en sentido transversal al sentido de la soldadura. Comparando los valores de microdureza en la Figura 45, se puede apreciar que esta es máxima a lo largo de las zonas: PP-SZ- UHMWPE para el ensayo nominado: 1112 S, con la menor velocidad de rotación (1100 rpm). Los tres ensayos restantes: 1525 S, 2025 S, 2525 S, presentan valores de dureza ligeramente menores a lo largo de las tres zonas mencionadas.

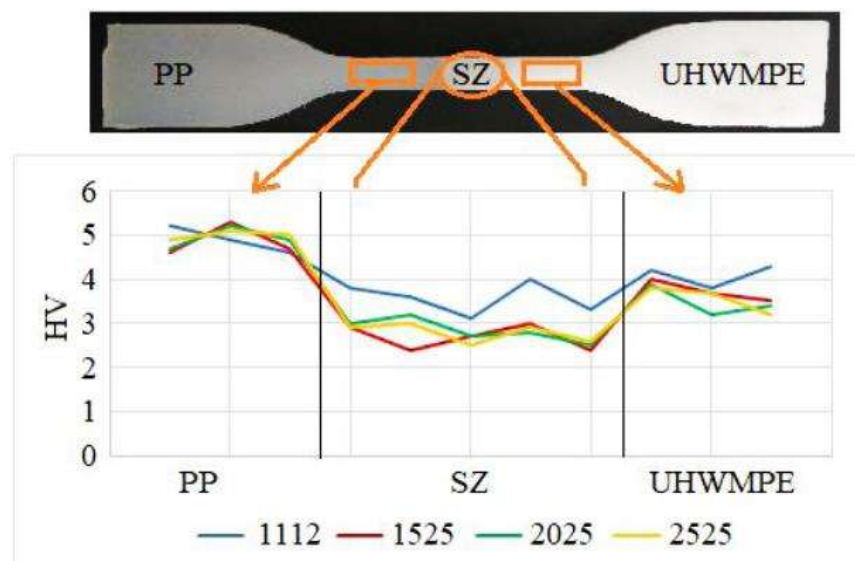


Figura 45. Perfil de dureza para las cuatro modalidades de ensayo FSW, presentando los valores más altos en los ensayos de tensión, para las uniones PP-UHMWPE.

Por otra parte, las mediciones de microdureza muestran una caída en la zona central de las probetas, la zona donde se ha llevado a cabo la mezcla por fricción de los dos materiales disímiles. Esta misma tendencia se observó en las pruebas de microdureza de las soldaduras disímiles ABS-PP. En la Tabla 12 se muestran los valores de microdureza obtenidos para las soldaduras con los 4 mejores parámetros, Los colores asignados en la Tabla 12 corresponden con los colores de los perfiles de dureza de la Figura 45.

Los resultados muestran el valor de microdureza más alto para el perfil de color azul: entre 3.1 y 4.1 HV dentro de la zona de agitación; mientras que este valor estuvo comprendido entre 2.3 y 3.2 HV, para las tres modalidades de prueba restantes. En el origen de este comportamiento está el aumento de la disipación de calor con el aumento de las velocidades de rotación y transversal, que conducen al reblandecimiento de los materiales en la zona de agitación y la reducción de la microdureza. En las zonas de los materiales base: PP y HMWPE, el HV corresponde a la dureza de estos polímeros: cerca de 5 HV para el PP y 3,5 – 4 HV para el UHMWPE.

Tabla 12. Valores de dureza de la soldaduras PP-UHMWPE.

PP			Unión					UHMWPE		
5.2	4.9	4.6	3.8	3.6	3.1	4	3.3	4.2	3.8	4.3
4.6	5.3	4.7	2.9	2.4	2.7	3	2.4	4	3.7	3.5
4.7	5.2	4.9	3	3.2	2.7	2.8	2.5	3.9	3.2	3.4
4.9	5.1	5	2.9	3	2.5	2.9	2.6	3.8	3.7	3.2

3.3.3. SUPERFICIES DE FRACTURA

Las fracturas en las probetas generadas por lo ensayos de tensión, se muestran en la Figura 46 a, b, c y d, correspondiendo a los especímenes de la graficas de tensión de la Figura 44 a, b, c y d respectivamente. Todas las fracturas se desarrollaron en la zona de mezcla o *Stir Zone* cercas del PP. Las fracturas en esta zona están relacionadas con una buena mezcla y

difusión molecular, lo que permite obtener buenas propiedades mecánicas; mientras que la similitud de viscosidades de estos dos polímeros facilita el proceso FSW.

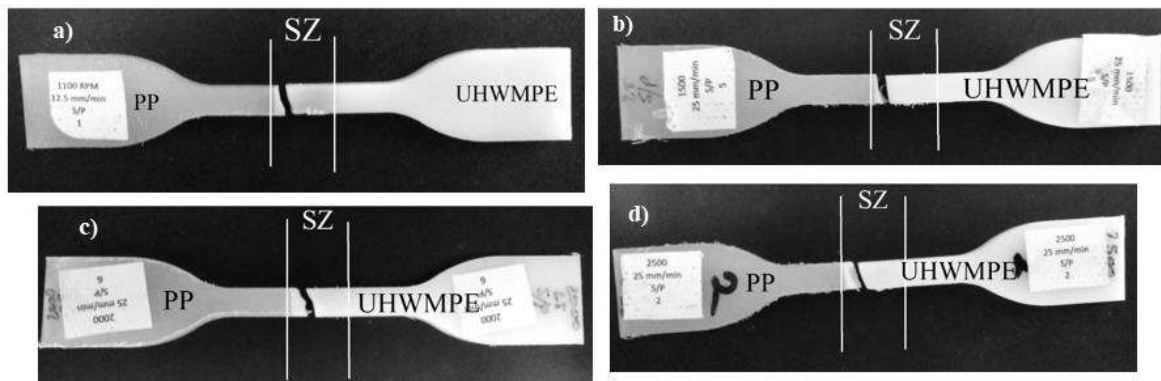


Figura 46. Fracturas de las probetas con los valores más altos de los ensayos de tensión.

Respecto de las 5 modalidades de fractura en polímeros unidos por FSW mostradas en la Figura 36, nuevamente se aprecia que la fractura se localiza en la zona de agitación o parte central, que se traduce a una mayor eficiencia en el proceso de soldado mediante este método de unión. La fractura se sitúa en la zona de mezcla de los dos termoplásticos. La eficiencia de las uniones en este caso se sitúa entre 78-95%, valores altos en la unión de estos materiales termoplásticos disímiles.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Para la soldadura disímil ABS-PP se presentan las siguientes conclusiones:

Se llevaron a cabo inicialmente la soldadura en los materiales base, con el objeto de obtener los parámetros que generen los mejores resultados de unión, para implementarlos posteriormente en la unión disímil. Para la unión ABS-ABS, se observó mejores resultados con herramientas cónicas, en comparación con los cilíndricos; los parámetros utilizados generando los mejores resultados fueron: 1060 rpm, 50mm/min velocidad de avance y 30 mm/min velocidad de penetración. Estos parámetros representaron la mejor combinación para la difusión másica y temperatura, resultando en las mejores uniones.

Concerniente a las uniones PP-PP, los resultados con el herramental cónico fueron deficientes; obteniéndose mejores resultados con el perfil cilíndrico y con los siguientes parámetros del proceso: 1060 rpm, 15 mm/min velocidad de avance, y 10 mm/min de velocidad de penetración. Se puede notar que los mejores parámetros para estos dos materiales polímeros, la velocidad de rotación fue la misma (1060 rpm), mientras que para el PP la velocidad de avance y de penetración fueron considerablemente inferiores; debido, probablemente, a la mayor temperatura de fusión del PP, comparada con el ABS.

Para la unión disímil ABS-PP, los parámetros del proceso de soldadura permitieron una eficiencia del 90 % respecto al material base; estos parámetros fueron: 2000 rpm, 1.5 mm/min como velocidad de avance, 2.5 mm/min como velocidad de penetración, y con una herramienta cilíndrica en contacto con el material. En este caso, se incrementó la velocidad de rotación garantizando la adecuada generación de calor, disminuyendo la velocidad de avance y de penetración. El perfil de dureza reveló una disminución en la zona de agitación o “*Stir Zone*”; también se encontró que el valor de dureza en las zonas PP y ABS de la soldadura, son cercanos a la dureza de los materiales base. Todas las fracturas se situaron en la zona de agitación o mezcla; si bien parecería situarse en la zona oscura (ABS), consecuencia de la dispersión del material ABS (de color oscuro), sobre el material claro

(PP). Las imágenes por microscopía electrónica de barrido muestran algunas tendencias en la unión disímil PP-ABS: mayores discontinuidades se observan en la zona de retirada (zona ABS), comparada con la zona de avance (zona PP). Parece desarrollarse un enlace mecánico de interface entre las partículas de los dos termoplásticos en la zona de agitación, más probable que un enlace de naturaleza química.

Para la soldadura disímil PP-UHMWPE se presentan las siguientes conclusiones:

El análisis de la soldadura PP-PP, se ha presentado en el párrafo anterior. Con los resultados previos, se procedió a la unión disímil: PP-UHMWPE. Para este caso, se implementaron dos parámetros adicionales para el proceso de soldado: se diseñó y construyó un hombro fijo mediante el arreglo de un marco de aluminio y un rodamiento donde se inserta el herramental; también se implementó un precalentamiento en las piezas disímiles a unir.

Los mejores resultados con ensayos preliminares se obtuvieron usando los siguientes parámetros de proceso: herramental hexagonal, 1000 rpm de velocidad de rotación, 25 mm/min de velocidad de avance y 5 mm/min de penetración; no obstante, se presentan defectos de “túnel”. La incorporación del hombro estacionario, en contacto con el material, reduce considerablemente la expulsión del material y genera un cordón de soldadura uniforme, prácticamente sin defectos. La introducción de un precalentamiento en las placas disímiles destinadas a unirse tuvo los siguientes resultados: el precalentamiento presentó una disminución en la calidad de la soldadura, para todos los ensayos llevados a cabo. La disminución en la calidad de la soldadura se relaciona con el exceso de calor: combinando el precalentamiento con el calor producido por fricción, que genera una difusión excesiva del material y el desborde del cordón de soldadura. En el origen de este comportamiento puede estar la baja temperatura de transición vítrea de estos dos termoplásticos, que conducen a una adecuada difusión molecular en estado líquido y mezcla de las cadenas poliméricas, sin

necesidad de precalentamiento. No se observaron defectos internos ni microporosidades para las probetas destinadas a ensayos de tracción.

Respecto de los ensayos de tensión en las uniones disímiles PP-UHMWPE, se alcanzó una eficiencia de soldadura de 81% aproximadamente respecto del PP, con 1100 rpm, y 12.5 mm/min de velocidad de avance y sin precalentamiento. Las fracturas observadas en las uniones disímiles PP-UHMWPE, son próximas a una fractura frágil, con un solo punto máximo en los diagramas Esfuerzo-Elongación; comparadas con el comportamiento dúctil de los materiales base PP y UHMWPE, donde se presenta una disminución del esfuerzo con un incremento en la elongación. Todas las fracturas se situaron en la zona de agitación o mezcla; no se observaron defectos internos ni microporosidades para las probetas destinadas a ensayos de tracción. Además, los perfiles de microdureza muestran que en la zona de agitación los valores disminuyen, como consecuencia del ablandamiento de los materiales inducidos por una baja disipación de calor debido a las propiedades de baja conductividad térmica.

REFERENCIAS

- [1] Santosh K. Sahu, Debasish Mishra, Raju P. Mahto, Surjya K. Pal And Kamal Pal. Friction Stir Welding Of Hdpe Sheets: A Study On The Effect Of Rotational Speed. 6th International & 27th All India Manufacturing Technology, Design And Research Conference (Aimtdr–2016) College Of Engineering, Pune, Maharashtra, India. (2016) P. 1065-1068.
- [2] Pedro Cabot, Alberto Moglioni, Eduardo Carella. Soldadura Por Fricción-Gitacion (Fsw) De Aa 6061 T6. Matéria Revista (2003) P. 187- 195.
- [3] Ariel Burgos, Hernán Svoboda, Estela Surian. Soldadura Por Fricción-Agitación (Fsw) De Aluminio. Segundo Congreso Argentino De Ingeniería Mecánica 2010.
- [4] Larry Horath, Fundamentals Materials Science For Technologist: Properties, Testing, And Laboratory Exercises, Second Edition, Waveland Press, Inc, United States Of America, 2017.
- [5] Myer Kutz, Handbook Of Materials Selection, 1st Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, United States Of America, 2002.
- [6] J. B. Bralla, Design For Manufacturability Handbook, Mcgraw Hill Handbooks, 2nd Edition, New York, 2008.
- [7] Sercer Mladen, Raos Pero, Joining Of Plastics And Composites, Welding Engineering And Technology, Encyclopedia Of Life Support Systems (Eolss), 2016.
- [8] Ranvijay Kumar, Rupinder Singh, I.P.S. Ahuja, Rosa Penna, Luciano Feo. Weldability Of Thermoplastic Materials For Friction Stir Welding- A State Of Art Review And Future Applications. Elsevier, Composites Part B (2018) P. 1–15.
- [9] M. J. Troughton, Handbook Of Plastics Joining, William Andrew Inc, 2nd Edition, New York, 2010.
- [10] A. Zafar, M. Awang, S.R. Khan. Friction Stir Welding Of Polymers: An Overview. 2nd International Conference On Mechanical, Manufacturing And Process Plant Engineering. Springer (2017).
- [11] Chaudhary Kailash, A Review On Advance Welding Processes, International Journal Of Engineering And Technique. 3(2017) 86-96.
- [12] Howard B. Cary, Modern Welding Technology, 4th Edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [13] Mikell P. Groover, Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials, Processes, And Systems, 4th Edition, A John Wiley & Sons, Inc., New York, 2010.
- [14] John Norrish, Advanced Welding Processes, Woodhead Publishing, 2nd Edition, Cambridge, England, 2006.

- [15] Charles A. Harpe, Modern Plastics Handbook, 1st Edition, Mcgraw-Hill, New York, 2000.
- [16] B.T. Gibson, D.H. Lammlein, T.J. Prater, W.R. Longhurst, C.D. Cox, K.J. Dharmaraj, G.E. Cook, A.M. Strauss. Friction Stir Welding: Process, Automation, And Control. Elsevier, Journal Of Manufacturing Processes. (2014), Pp 56–73.
- [17] Kalpakjian, Manufacturing Engineering And Technology, 5th Edition, Prentice Hall, New York, 2001.
- [18] Danilo A. Vucetich; Juan L. Lacoste; Lucas E. Feloy; Alfredo C. González. Soldadura Por Fricción Y Agitación De Placas De Aluminio 5086. Segundas Jornadas De Investigación Y Transferencia - 2013, Pp 636-641
- [19] R.S.Mishra, Z.Y.Ma, Friction Stir Welding And Processing, Materials Science And Engineering R 50 (2005) 1–78
- [20] Lohwasser Daniela, Chen Zhan, Friction Stir Welding: From Basics To Applications, 1st Edition, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2010.
- [21] Cooke, G. ‘Robotic Friction Stir Welding’, Industrial Robot, Vol 33(1) 2004, Pp. 55–63.
- [22] Mikael Soron Esab Ab, Welding Equipment, Sweden Mikael.Soron@Esab.Se Friction Stir Welding Of High-Strength Aluminium Alloys Using An Industrial Robot System: A Feasibility Study; 2008 Fsw International Symposium, Japan.
- [23] Aerospace Technology, 2018, Lunes 6 De Febrero 2018, <https://www.aerospacetechnology.com/mediapacks/>.
- [24] Talwar, R., Bolser, D., Lederich, R.J. And Baumann, J., Friction Stir Welding Of Airframe Structures, 2nd International Fsw Symposium, Gothenburg, Sweden, June 26–28, 2000.
- [25] Colligan, K.J., Xu, J. And Pickens, J.R., Welding Tool And Process Parameter Effects In Friction Stir Welding Of Aluminum Alloys, Friction Stir Welding And Processing II, Jata, K.V., Mahoney, M.W., Lienert, T.J. And Mishra, R.S., Editors, Tms, 181–190, 2003.
- [26] Zettler, R., Lomolino, S., Dos Santos, J., Donath, T., Beckmann, F., Lippman, T. And Lohwasser, D., Effect Of Tool Geometry And Process Parameters On Material Flow In Fsw Of An Aa 2024-T351 Alloy, 5th International Fsw Symposium, Metz, France, September 14–16, 2004.
- [27] Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A. And Bampton, C.C., Effects Of Friction Stir Welding On Microstructure Of 7075 Aluminum, Scripta Materialia, 36 (1997), 69–75.

- [28] Posada, M., Deloach, J., Reynolds, A.P., Skinner, M., Halpin, J.P., Friction Stir Weld Evaluation Of Dh-36 And Stainless Steel Weldments, Friction Stir Welding
- [29] Processing, Jata, K.V., Mahoney, M.W., Mishra, R.S., Semiatin, S.L. And Field, D.P., Editors, Tms, 2001, 43–54.
- [30] Marie, F., Development Of The Bobbin Tool Technique On Various Aluminum Alloys, 5th International Fsw Symposium, Metz, France, 14–16 September 2004
- [31] Subramanian, P.R., Bewlay, B.P., Helder, E.C. And Trapp, T.J., Apparatus And Method For Friction Stir Welding Of High Strength Materials, And Articles Made Therefrom, Us Patent Application 2004/0238599, 2 December 2004.
- [32] Thomas, W.M., Threadgill, P.L. And Nicholas, E.D., Feasibility Of Friction Stir Welding Steel, Science And Technology Of Welding And Joining, 4(1999) 365–372.
- [33] Xu, S., Deng, X., Reynolds, A.P. And Seidel, T.U., Finite Element Simulation Of Material Flow In Friction Stir Welding, Science And Technology Of Welding And Joining, 6 (2001) 191–193.
- [34] Jeffrey Defalco Y Russell Steel. Proceso De Fricción Agitación Ahora Suelda Tubería De Acero. Welding Journal 2009. P. 32-36.
- [35] P. Xue, B.L. Xiao, Q. Zhang And Z.Y. Ma. Achieving Friction Stir Welded Pure Copper Joints With Nearly Equal Strength To The Parent Metal Via Additional Rapid Cooling. Elsevier, Scripta Materialia. (2011), P 1051–1054.
- [36] R. Nandan, T. Debroy, H.K.D.H. Bhadeshia. Recent Advances In Friction-Stir Welding – Process, Weldment Structure And Properties. Elsevier, Progress In Materials Science (2008) P. 980–1023
- [37] Berins, Michael L., Plastics Engineering Handbook, 5th Edition, The Society Of The Plastics Industry, Inc., Chapman & Hall, New York, 1991.
- [38] Yahya Bozkurt. The Optimization Of Friction Stir Welding Process Parameters To Achieve Maximum Tensile Strength In Polyethylene Sheets. Elsevier, Materials And Design (2012) Pp. 440–445
- [39] Husain Im, Mechanical Properties Of Friction-Stir-Welded Polyamide Sheets, International Journal Of Mechanical And Materials Engineering, 10(2015) 1–8.
- [40] B.C. R, Principles Of Heat Treating Of Nonferrous Alloys, In: S.M. Copley, E.L. Langer (Eds.), Asm Handb. Vol. 4, Heat Treat., 9th Editio, Asm International, Ohio, United States, 1991: Pp. 1826–1959.
- [41] Seth R.S, “Effects Of Friction Stir Welding On Polymer Microstructure,” M.Sc Thesis, Brigham Young University, 2004.

- [42] A. Arici, T. Sinmaz, “Effect Of Double Passes Of Tool On Friction Stir Welding Of Polyethylene” Springer Science, Journal Of Material Science, Pp. 3313-3316, 2005
- [43] A. Arici, S. Selale, “Effect Of Tool Tilt Angle On Tensile Strength And Fracture Locations Of Friction Stir Welding Of Polyethylene,” Science And Technology Of Welding And Joining, Pp. 536-539, 2007.
- [44] Pritam Kumar Rana, R. Ganesh Narayanan, Satish V. Kailas. Effect Of Rotational Speed On Friction Stir Spot Welding Of AA5052-H32/HDPE/AA5052-H32 Sandwich Sheets. Elsevier, Journal Of Materials Processing Tech. (2018) P. 511–523.
- [45] Nasser Sadeghian, Mohammad Kazem Besharati Givi. Experimental Optimization Of The Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Acrylonitrile Butadiene Styrene Sheets. Elsevier, Materials And Design (2015) P.145–153
- [46] Arvin Bagheri, Taher Azdast, Ali Doniavi. An Experimental Study On Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Abs Sheets. Elsevier, Materials And Design (2013) P. 402–409.
- [47] N. Mendes, A. Loureiro, C. Martins, P. Neto, J.N. Pires. Effect Of Friction Stir Welding Parameters On Morphology And Strength Of Acrylonitrile Butadiene Styrene Plate Welds. Elsevier, Materials And Design (2014) P. 457–464.
- [48] Ehsan Azarsa Y Amir Mostafapour. Experimental Investigation On Flexural Behavior Of Friction Stir Welded High Density Polyethylene Sheets. Elsevier, / Journal Of Manufacturing Processes (2014) P.149–155.
- [49] Mehdi Pirizadeh, Taher Azdast, Samrand Rash Ahmadi, Sajjad Mamaghani Shishavan, Arvin Bagheri. Friction Stir Welding Of Thermoplastics Using A Newly Designed Tool. Elsevier, Materials And Design (2014) P. 342–347.
- [50] K. Panneerselvam Y K. Lenin. Joining Of Nylon 6 Plate By Friction Stir Welding Process Using Threaded Pin Profile. Elsevier, Materials And Design (2014) P. 302–307.
- [51] Imad M. Husain, Raed K. Salim, Taher Azdast, Soran Hasanifard, Sajjad M. Shishavan, Richard Eungkee Lee. Mechanical Properties Of Friction-Stir-Welded Polyamide Sheets. Springer, International Journal Of Mechanical And Materials Engineering (2015) P. 1 – 8.
- [52] V. Jaiganesh, B. Maruthu, E. Gopinath. Optimization Of Process Parameters On Friction Stir Welding Of High Density Polypropylene Plate. Elsevier, Procedia Engineering (2014) P. 1957 – 1965.
- [53] Sadegh Hoseinlaghhab, Seyed Sajad Mirjavadi, Nasser Sadeghian, Iraj Jalili, M. Azarbarmas, Mohammad Kazem Besharati Givi. Influences Of Welding Parameters On The Quality And Creep Properties Of Friction Stir Welded Polyethylene Plates. Elsevier, Materials And Design 2015 Pp.369–378

- [54] F. Simões, D.M. Rodrigues. Material Flow And Thermo-Mechanical Conditions During Friction Stir Welding Of Polymers: Literature Review, Experimental Results And Empirical Analysis. Elsevier Materials And Design 2014 Pp. 344–351
- [55] Saeid Hoseinpour Dashatan, Taher Azdast, Samrand Rash Ahmadi, Arvin Bagheri. Friction Stir Spot Welding Of Dissimilar Polymethyl Methacrylate And Acrylonitrile Butadiene Styrene Sheets. Elsevier, Materials And Design 45 (2013) Pp. 135–141.
- [56] Jicheng Gao, Chao Li, Unisha Shilpakar, Yifu Shen. Improvements Of Mechanical Properties In Dissimilar Joints Of Hdpe And Abs Via Carbon Nanotubes During Friction Stir Welding Process. Elsevier, Materials And Design (2015) P. 289–296.
- [57] Shayan Eslami, Tiago Ramos, Paulo J. Tavares, P.M.G.P. Moreira. Shoulder Design Developments For Fsw Lap Joints Of Dissimilar Polymers. Elsevier, Journal Of Manufacturing Processes (2015).
- [58] Shayan Eslami, Tiago Ramos, Paulo J. Tavares, P. M. G. P. Moreira. Effect Of Friction Stir Welding Parameters With Newly Developed Tool For Lap Joint Of Dissimilar Polymers. Elsevier, Procedia Engineering 114 (2015) Pp. 199 – 207.
- [59] Shayan Eslami, Paulo J Tavares, P M G P Moreira. Fatigue Life Assessment Of Friction Stir Welded Dissimilar Polymers. Elsevier, Procedia Structural Integrity 5 (2017) Pp. 1433–1438.
- [60] Mojtaba Rezaee Hajideh, Mohammadreza Farahani, Seyed Amir Davoud Alavi, Navid Molla Ramezani. Investigation On The Effects Of Tool Geometry On The Microstructure And The Mechanical Properties Of Dissimilar Friction Stir Welded Polyethylene And Polypropylene Sheets Elsevier, Journal Of Manufacturing Processes 26 (2017) Pp. 269–279
- [61] Rupinder Singh A, Ranvijay Kumar A, Luciano Feo B, Fernando Fraternali. Friction Welding Of Dissimilar Plastic/Polymer Materials With Metal Powder Reinforcement For Engineering Applications. Elsevier, Composites Part B 101 (2016) Pp.77-86

[62] Ranvijay Kumar, Rupinder Singh, I.P.S. Ahuja, Ada Amendola, Rosa Penna. Friction Welding For The Manufacturing Of Pa6 And Abs Structures Reinforced With Fe Particles. Accepted Manuscript, Composites Part B.

[63] Ranvijay Kumar, Rupinder Singh And Ips Ahuja. A Framework For Welding Of Dissimilar Polymers By Using Metallic Fillers. Ijmse, Serials Publications 8 (1) 2017 Pp. 101-105.

[64] Santosh K. Sahu, Debasish Mishra, Raju P. Mahto, Vyas M. Sharma, Surjya K. Pal, Kamal Pal, Susanta Banerjee, Padmanav Dash. Friction Stir Welding Of Polypropylene Sheet. Engineering Science And Technology, An International Journal 21 (2018) 245–254

[65] Julio Verduzco. Implementación De Un Proceso De Soldadura Por Fricción Con Agitación, Aplicación En Aleaciones Metálicas Y Plásticos De Alta Resistencia; Análisis Científico De Las Propiedades Mecánicas Resultantes. Facultad De Ingeniería Mecánica, Umsnh, (2018).

[66] Tecnología De Los Plásticos, Miércoles, 8 De Junio De 2011. <https://Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2011/06/Abs.Html>

[67] El Abs, Publicado En Mayo 9, 2017. <https://Todoenpolimeros.Com/2017/05/09/El-Abs/>

[68] Abs, Acrilonitrilo Butadieno Estireno. <https://Www.Resinex.Es/Tipos-De-Polimeros/Abs.Html>

[69] Wikipedia La Enciclopedia Libre 6 de Marzo De 2002. https://Es.Wikipedia.Org/Wiki/Acrilonitrilo_Butadieno_Estireno

[70] El Blog De Los Profesionales Del Taller. <https://Blog.Reparacion-Vehiculos.Es/Plastico-Abs-Resistente-Ligero-Moldeable>

[71] Qué Es El Polipropileno: Toxicidad, Usos, Propiedades Y Más <https://Www.Squeasy.Es/Que-Es-El-Polipropileno-Toxicidad-Usos-Propiedades-Y-Mas>

[72] ¿Qué Propiedades Tiene El Polipropileno Y Para Qué Se Utiliza?" Actualizado El 20 Junio, 2018. <https://Curiosoando.Com/Que-Propiedades-Tiene-El-Polipropileno-Y-Para-Que-Se-Utiliza>

[73] Plasticos Ascaso, Polipropileno: Qué Es Y Sus Propiedades. <https://Plasticosascaso.Es/Polipropileno-Que-Es-Propiedades>

[74] Aceromafe/ Aceros Especiales, Plásticos De Ingeniería 2020. <https://Www.Aceromafe.Com/Polipropileno-Usos>

- [75] Petrouim, Tecnología Y Servicio En Polipropileno. [Http://Www.Petroquim.Cl/Que-Es-El-Polipropileno](http://Www.Petroquim.Cl/Que-Es-El-Polipropileno).
- [76] Envaselia, Que Es El Polipropileno 2018. [Https://Www.Envaselia.Com/Blog/Que-Es-El-Polipropileno-Id13.Htm](https://Www.Envaselia.Com/Blog/Que-Es-El-Polipropileno-Id13.Htm).
- [77] Todo En Polímeros, Agosto 1, 2018. [Https://Todoenpolimeros.Com/2018/08/01/El-Polipropileno](https://Todoenpolimeros.Com/2018/08/01/El-Polipropileno).
- [78] Polietileno De Ultra Alto Peso Molecular. [Https://Hmn.Wiki/Es/Ultra-High-Molecular-Weight_Polyethylene](https://Hmn.Wiki/Es/Ultra-High-Molecular-Weight_Polyethylene).
- [79] Aceromafe, Aceros Especiales, Plásticos De Ingeniería, 2020. [Https://Www.Aceromafe.Com/Aplicaciones-Del-Polietileno](https://Www.Aceromafe.Com/Aplicaciones-Del-Polietileno).
- [80] Tecnología De Los Plásticos, Viernes, 3 De Junio De 2011. [Https://Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2011/06/Polietileno-De-Ultra-Alto-Peso-Molecular.Html](https://Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2011/06/Polietileno-De-Ultra-Alto-Peso-Molecular.Html).
- [81] Wikipedia, La Enciclopedia Libre. 13 Diciembre 2021. [Https://Es.Wikipedia.Org/Wiki/Polietileno_De_Ultra_Alto_Peso_Molecular](https://Es.Wikipedia.Org/Wiki/Polietileno_De_Ultra_Alto_Peso_Molecular).
- [82] Mexpolimeros, Polietileno De Ultra Alta Masa Molecular [Https://Www.Mexpolimeros.Com/Uhmwpe.Html](https://Www.Mexpolimeros.Com/Uhmwpe.Html).
- [83] María Embid Larrosa. Caracterización Mecánica De Materiales Compuestos De Polietileno De Ultra Alto Peso Molecular (Uhmwpe) Y Fibras De Carbono. Escuela De Ingeniería Y Arquitectura. Universidad De Zaragoza (2013) Pp. 4-5
- [84] Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P., Review Of Tools For Friction Stir Welding And Processing, *Advances In High Temperature Joining Of Materials*, 51(2012) 250-261.
- [85] Mirley Moreno-Moreno, Yorledis Macea Romero, Habib Rodríguez Zambrano, Nora Catalina Restrepo-Zapata, Conrado Ramos Moreira Afonso. Mechanical And Thermal Properties Of Friction-Stir Welded Joints Of High Density Polyethylene Using A Non-Rotational Shoulder Tool. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Springer (2018) 97:2489–2499
- [86] Mustafa Aydin. Effects Of Welding Parameters And Pre-Heating On The Friction Stir Welding Of Uhmw-Polyethylene. Taylor & Francis. *Polymer-Plastics Technology And*
- [87] Engineering, *Polymer-Plastics Technology And Engineering*, Taylor & Francis Group 2010 49: 595–601
- [88] Jintawat Chaichanawong, Chanchai Thongchuea, Surat Areerat. Effect Of Moisture On The Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyamide Composites. Elsevier, A. P. T. (2016) P. 898–902

- [89] Kyle Raney, Eric Lani, Devi K.Kalla, Experimental Characterization Of The Tensile Strength Of Abs Parts Manufactured By Fused Deposition Modeling Process. Elsevier M. T. P. (2017) P. 7956–7961
- [90] Siti Nikmatin, Achmad Syafiuddin, Ahmad Beng Hong Kueh, Akhiruddin Maddu, Physical, Thermal And Mechanical Properties Of Polypropylene Composites Filled With Rattan Nanoparticles. S. / J. Of A. R. And T. (2017) P. 386–395
- [91] Seyyedvahid Mortazavian, Ali Fatemi, Effects Of Fiber Orientation And Anisotropy On Tensile Strength And Elastic Modulus Of Short Fiber Reinforced Polymer Composites. Elsevier. Composites: Part B 72 (2015) 116–129
- [92] Abdulkadir Gullu, Ahmet Ozdemir, Emin Ozdemir, Investigation Of The Effect Of Glass Fibres On The Mechanical Properties Of Polypropylene (Pp) And Polyamide 6 (Pa6) Plastics. Materials And Design 27 (2006) 316–323
- [93] Astm, International. Standard Test Method For Tensile Properties Of Plastics. Astm D638-14
- [94] Vijendra, B., Sharma, A. Induction Heated Tool Assisted Friction-Stir Welding (I-Fsw): A Novel Hybrid Process For Joining Of Thermoplastics. Journmal Of Manuf. Proc. 2015, 234-244
- [95] Patel, A.R., Dalwadi, Ch.G., Rana, H.G, A Review: Dissimilar Material Joining Of Metal To Polymer Using Friction Stir Welding (Fsw). International Journal Of Science Tech. & Engin. 2016, Pp 702-705.
- [96] Patel, A.R., Kotadiya, D.J., Kapopara, J.M., Dalwadi, Ch.G., Patel, N.P., Rana, H.G. Investigation Of Mechanical Properties For Hybrid Joint Of Aluminium To Polymer Using Friction Stir Welding (Fsw). Materials-Today Proc. 2018, Pp. 4242-4249
- [97] Pereira, M.A.R., Amaro, A.M., Reis, P.N.B., Loureiro, A. Effect Of Friction Stir Welding Techniques And Parameters On Polymers Joint Efficiency—A Critical Review. Polym. 13, 2021
- [98] Khodabakhshi, F., Haghshenas, M., Chen, J., Amirkhiz, B.S., Li, J., Gerlich, A.P. Bonding Mechanism And Interface Characterisation During Dissimilar Friction Stir Welding Of An Aluminium/Polymer Bi-Material Joint. Sci. And Tech. Of Weld And Join. 22(7) 2016 Pp 182-190.

ACCIONES DE DIFUSIÓN

DISSIMILAR JOINING OF ABS AND PP USING FRICTION STIR WELDING (FSW) AND MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION, **M.A. Sánchez Miranda**, G.M. Domínguez Almaraz, *, J.J. Villalón López, J.A. Ruiz Vilchez. *Elsevier, Procedia Structural Integrity* 39 (2022) 161–172.

ABS AND POLYPROPYLENE DISSIMILAR JOINING USING FRICTION STIR WELDING (FSW) AND MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION. **Mario Alberto Sánchez Miranda**, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Julio Adrián Ruiz Vilchez, Juan Jesús Villalón. *Advanced Structural Materials: Mechanics, Properties and Applications of Emerging Materials Symposium at the XXIX International Materials Research Congress. Sociedad mexicana de materiales A.C.*

SPECIMEN DESIGN OF MARAGING 300, FOR ULTRASONIC FATIGUE TESTS. Julio Adrian Ruiz Vilchez, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, **Mario Alberto Sánchez Miranda**, Ishvari Fernanda Zuñiga Tello, Manuel Guzmán Tapia. *Aeronautical and Aerospace. Processes, Materials and Industrial Applications Symposium at the XXIX International Materials Research Congress. Sociedad mexicana de materiales A.C.*



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Structural Integrity 39 (2022) 161–172

Structural Integrity

Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

7th International Conference on Crack Paths

Dissimilar joining of ABS and PP using friction stir welding (FSW) and mechanical properties evaluation

M.A. Sánchez Miranda¹, G.M. Domínguez Almaraz¹, *, J.J. Villalón López¹, J.A. Ruiz Vilchez¹

¹University of Michoacan (UMSNH), Faculty of Mechanical Engineering, Santiago Tapia 403, Col. Centro, Morelia, 58000, Mexico

Abstract

This work presents the results of the Friction Stir Welding (FSW) joining of two polymeric materials: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), and Polypropylene PP. The first results showed poor behavior of mechanical properties; nevertheless, in modifying the process parameters, particularly rotation speed, advance speed and approximation speed, an adequate compromise of resulting mechanical properties were obtained. Tensile tests on joining dissimilar specimens ABS-PP, show as high as 90% of strength compared to the parent materials; in the best knowledge of the authors, no previous investigations have been reported for the joining of these two thermoplastic materials, using FSW joining technique. Furthermore, analysis of hardness near the welding zone and visualization with optical and scanning electronic microscope (SEM), were carried out in order to deduce the generalities of effect-cause in the improvement of tension strength.

© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer-review under responsibility of CP 2021 – Guest Editors

Keywords: Dissimilar joining; Thermoplastics ABS-PP; Joining efficiency; Hardness; Material flow

1. Introduction

The FSW technique to joint metals dates back to the last century, it was developed at the end of 1991 by the “The Welding Institute” in the United Kingdom [1]. The joining process implies a no-consumable rotating pin communicating energy by friction to the two facing surfaces, at the beginning metal alloys; nevertheless, in the last



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

August 2021

This is to certify that *Mario Alberto Sanchez Miranda, Gonzalo Mariano Dominguez Almaraz, Julio Adrian Ruiz Vilchez, Juan Jes Villalon* presented the contribution: **ABS AND POLYPROPYLENE DISSIMILAR JOINING USING FRICTION STIR WELDING (FSW) AND MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION** as Oral modality, in the *A7. Advanced Structural Materials: Mechanics, Properties and Applications of Emerging Materials* Symposium at the **XXIX International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 15th to 20th, 2021.

Sincerely,

Patricia del Carmen Zambrano Robledo
President



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

August 2021

This is to certify that *Julio Adrian Ruiz Vilchez, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Mario Alberto Sanchez Miranda, Ishvari Fernanda Zuñiga Tello, Manuel Guzmán Tapia* presented the contribution: **SPECIMEN DESIGN OF MARAGING 300, FOR ULTRASONIC FATIGUE TESTS.** as Poster modality, in the *A1. Aeronautical and Aerospace Processes, Materials and Industrial Applications Symposium* at the **XXIX International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 15th to 20th, 2021.

Sincerely,

Patricia del Carmen Zambrano Robledo
President

Proceedings of
SCIENCEPLUS
INTERNATIONAL CONFERENCE
BRIGHTON, UNITED KINGDOM

Organized by



Date of Event:

25th - 26th April, 2022

Event Co-Sponsored by



Corporate Address

INSTITUTE OF RESEARCH AND JOURNALS
Plot No- 30, Dharma Vihar, Khandagiri, Bhubaneswar, Odisha, India
Mail: info@iraj.in, www.iraj.in

Publisher: Institute for Technology and Research (ITRESEARCH)

© 2022, Scienceplus International Conference, Brighton, United Kingdom

ISBN: 978-93-90150-32-8

Edn: 410

No part of this book can be reproduced in any form or by any means without prior written permission of the publisher.

Disclaimer: Authors have ensured sincerely that all the information given in this book is accurate, true, comprehensive, and correct right from the time it has been brought in writing. However, the publishers, the editors, and the authors are not to be held responsible for any kind of omission or error that might appear later on, or for any injury, damage, loss, or financial concerns that might arise as consequences of using the book.

Type set & Printed by:

Institute for Technology and Research (ITRESEARCH)

Khandagiri, Bhubaneswar

VERY HIGH FREQUENCY FATIGUE TESTS (20 KHz), ON THE AERONAUTICAL STEEL MARAGING 300

¹JULIO A. RUIZ VILCHEZ, ²GONZALO M. DOMINGUEZ ALMARAZ,
³MARIO A. SANCHEZ MIRANDA

^{1,2,3}University of Michoacán (UMSNH), Faculty of Mechanical Engineering, Santiago Tapia 403, Col. Centro, Morelia, 58000, Mexico
E-mail: ¹jarviz@umich.mx, ²dalmaraz@umich.mx, ³0203104e@umich.mx

Abstract - Very high frequency fatigue tests (20 KHz), were carried out on the maraging 300 steel, at room temperature and under full reversed load ratio ($R=-1$). The dimensions of testing specimens (hourglass shape), were determined by modal numerical simulation, using the mechanical properties of this steel: density, Young Modulus and Poisson ratio, and fitting the resonance condition required under this fatigue modality. Ultrasonic fatigue tests were performed under five loading stresses: 585, 535, 486, 438 and 389 MPa, corresponding to industrial loads. Fracture surfaces were analyzed with scanning electronic microscope, in order to obtain the origin and causes of crack initiation and propagation under this testing conditions. In addition, general conclusions were addressed concerning the ultrasonic fatigue endurance of this aeronautical steel under $R=-1$, together with the crack initiation and propagation behavior.

Keywords - Ultrasonic fatigue, Maraging 300, Resonance, Failure Analysis, Crack Initiation Inclusion.

I. INTRODUCTION

The aeronautical maraging 300 steel is characterized by upstanding mechanical properties, which are not common to find in metallic alloys: mechanical strength, machinability, and good weldability capacity; this last property related to low carbon content. Recent investigations have been oriented to improve the additively fabrication process [1,2], or the effect of additively manufactured maraging steel on the plastic deformation associated with the strain-induced phase transformation [3], and the mechanical behavior on this steel obtained by selective laser melting, tested under multiaxial fatigue loading [4]. Selective Laser Melting (SLM), has been used to improve the mechanical properties of the maraging steel: conventional fatigue tests were carried out, concluding that orientation dependence was presented during built SLM, under the following testing

Ultrasonic fatigue tests on high strength steels have been spread from the last two decades; nevertheless, no international standardization is nowadays available concerning the dimensions and shape of testing specimens. Dimensions and shape are determined fitting the resonance condition: the natural frequency of vibration in longitudinal direction of specimen, close to the excitation frequency of ultrasonic fatigue machine (20 KHz $\pm$ 300 Hz). Under high frequency vibration loading, this steel undergoes an important decrease of cyclic strength compared to its original static strength; this behavior is related to cyclic softening and growing of precipitates during cyclic deformation.

A main purpose of this work is to advance in the knowledge of the ultrasonic fatigue endurance on this aeronautical steel.

II. TESTING MATERIAL

